

**АКАДЕМИЯ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ
«ACADEMY OF NATURAL HISTORY»**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ
И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

**INTERNATIONAL
JOURNAL OF APPLIED
AND FUNDAMENTAL
RESEARCH**

Журнал основан в 2007 году
The journal is based in 2007
ISSN 1996-3955

Двухлетний импакт-фактор
РИНЦ = 0,593

Пятилетний импакт-фактор
РИНЦ = 0,299

№ 12 2024

Научный журнал
Scientific journal

Журнал International Journal of Applied and Fundamental Research (Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований) зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС 77-60735.

Электронная версия размещается на сайте www.rae.ru
The electronic version takes places on a site www.rae.ru

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
к.м.н. *Н.Ю. Стукова*
Ответственный секретарь
к.м.н. *М.Н. Бизенкова*

EDITOR
Natalia Stukova
Senior Director and Publisher
Maria Bizenkova

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.б.н., проф. Абдуллаев А. (Душанбе); к.б.н. Алиева К.Г. (Махачкала); д.х.н., к.ф.-м.н., проф. Алоев В.З. (Чегем-2); д.б.н., проф. Андреева А.В. (Уфа); к.географ.н., доцент Аничкина Н.В. (Липецк); к.ф.-м.н. Барановский Н.В. (Томск); д.б.н., доцент Белых О.А. (Иркутск); д.т.н., проф. Бурмистрова О.Н. (Ухта); д.т.н., доцент Быстров В.А. (Новокузнецк); д.м.н., проф. Гарбуз И.Ф. (Тирасполь); д.ф.-м.н., проф. Геворкян Э.А. (Москва); д.х.н., проф. Гурбанов Г.Р. (Баку); д.ветеринар.н., доцент Ермолина С.А. (Киров); к.т.н. Есенаманова М.С. (Атырау); к.ф.-м.н., д.п.н., проф. Ефремова Н.Ф. (Ростов-на-Дону); д.м.н. Жураковский И.П. (Новосибирск); д.т.н., доцент Ибраев И.К. (Темиртау); к.т.н., доцент Исмаилов З.И. (Баку); д.б.н., с.н.с. Кавцевич Н.Н. (Североморск); д.т.н., проф. Калмыков И.А. (Ставрополь); д.б.н. Кокорева И.И. (Алматы); д.г.-м.н., доцент Копылов И.С. (Пермь); к.б.н., доцент Коротченко И.С. (Красноярск); к.с.-х.н., доцент Кряжева В.Л. (Нижний Новгород); д.ф.-м.н., доцент Кульков В.Г. (Волжский); д.б.н. Ларионов М.В. (Балашов); д.б.н., к.с.-х.н., доцент Леонтьев Д.Ф. (Иркутск); д.географ.н., к.б.н., проф. Луговской А.М. (Москва); д.г.-м.н., с.н.с. Мельников А.И. (Иркутск); д.т.н., проф. Несветаев Г.В. (Ростов-на-Дону); д.с.-х.н. Никитин С.Н. (п. Тимирязевский); д.фарм.н., доцент Олешко О.А. (Пермь); д.с.-х.н., с.н.с., проф. Партоев К. (Душанбе); к.п.н., доцент Попова И.Н. (Москва); д.т.н., проф. Рогачев А.Ф. (Волгоград); д.м.н., с.н.с., доцент Розыходжаева Г.А. (Ташкент); д.г.-м.н. Сакиев К.С. (Бишкек); д.т.н., проф. Сугак Е.В. (Красноярск); д.ветеринар.н., проф. Трефилов Б.Б. (Санкт-Петербург); к.т.н., доцент Хайдаров А.Г. (Санкт-Петербург); д.м.н., проф. Чарышкин А.Л. (Ульяновск); д.географ.н., проф. Чодураев Т.М. (Бишкек); д.б.н., проф. Шалпыков К.Т. (Бишкек); к.х.н. Шарифуллина Л.Р. (Москва); д.п.н., проф. Щирин Д.В. (Санкт-Петербург)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНЫХ
И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED
AND FUNDAMENTAL RESEARCH

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ.

Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals directory» в целях информирования мировой научной общественности.

Журнал представлен в ведущих библиотеках страны и является рецензируемым.

Журнал представлен в НАУЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКЕ (НЭБ) –
головном исполнителе проекта по созданию Российского индекса научного
цитирования (РИНЦ) и имеет импакт-фактор Российского индекса научного
цитирования (ИФ РИНЦ).

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,593.

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,299.

Учредитель, издатель и редакция:
ООО НИЦ «Академия Естествознания»

Почтовый адрес: 105037, г. Москва, а/я 47
Адрес редакции и издателя: 410056, г. Саратов, ул. им. Чапаева В.И., д. 56

ISSN 1996-3955

Тел. редакции – 8-(499)-705-72-30

E-mail: edition@rae.ru

Зав. редакцией Т.В. Шнуровозова
Техническое редактирование и верстка Е.Н. Доронкина
Корректор Е.С. Галенкина, Н.А. Дудкина

Подписано в печать – 28.12.2024
Дата выхода номера – 31.01.2025

Формат 60x90 1/8
Типография
ООО НИЦ «Академия Естествознания»
410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5

Распространяется по свободной цене

Усл. печ. л. 7,75
Тираж 500 экз.
Заказ МЖПиФИ 2024/12

© ООО НИЦ «Академия Естествознания»

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

АНАЛИЗ СТРУКТУРНО-АГРЕГАТНОГО СОСТАВА ПОЧВ
РАЗНОВОЗРАСТНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ ПРЕДСАЛАИРЬЯ

Безбородова А.Н., Филимонова Д.А., Миллер Г.Ф., Соловьев С.В. 7

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

ОБЩЕТОКСИКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛЕКАРСТВЕННОЙ
ЭКОТОКСИКОЛОГИИ

Иванов М.Б. 12

ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

МЕТОДИКА РАБОТ И РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ В 131 РЕЙСЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
СУДНА «ПРОФЕССОР ВОДЯНИЦКИЙ»

*Римский-Корсаков Н.А., Пронин А.А., Хортов А.В., Мутовкин А.Д.,
Литвинюк Д.А., Дерюшкин Д.В., Щербаченко С.В., Кортаев В.Н.* 18

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

КЛИНИЧЕСКИЕ СЛУЧАИ

АНГИОМАТОЗ ОСНОВАНИЯ ЧЕРЕПА

Насыров М.В., Бакиева К.К. 25

КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ ИНФИЛЬТРАТИВНО-НАГНОИТЕЛЬНОЙ
ТРИХОФИТИИ ОБЛАСТИ БОРОДЫ

Хисматуллина З.Р., Гиниятова И.В., Корешкова К.М. 30

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬИ

ЛАГРАНЖЕВА ФУНКЦИЯ И ДИНАМИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ
В ДВОЙНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ СЛОЕ: ВЛИЯНИЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ВОДЫ С ПРИМЕСЯМИ

Ибраимов Т.К., Сатыбалдиев А.Б., Ташиполотов Ы. 36

ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ:
ОТ ALPHAZERO К ALPHAPOOF И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
В РЕШЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Курновский Р.М. 41

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНГИЦИДНОЙ АКТИВНОСТИ
ТИТАНОСОДЕРЖАЩИХ ДОМЕННЫХ ШЛАКОВ

*Половнева Д.О., Старостина И.В., Кирюшина Н.Ю.,
Макридина Ю.Л., Поляяка Ю.Т.* 46

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ
АТОМНО-ГЛАДКИХ МЕТАЛЛОВ

Юров В.М., Гончаренко В.И., Олешко В.С., Жангозин К.Н. 52

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

СТАТЬЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ ГРАНУЛИРОВАННЫХ
МАТЕРИАЛОВ, СОЧЕТАЮЩИХ БИОАКТИВНЫЕ И
АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

Солоненко А.П., Шевченко А.Е., Матюшенко А.А., Полонянкин Д.А. 58

CONTENTS

BIOLOGICAL SCIENCES

ARTICLE

THE ANALYSIS OF THE STRUCTURAL-AGGREGATE COMPOSITION
OF SOILS OF DIFFERENT-AGED FALLOWS OF PRE-SALAIR

Bezborodova A.N., Filimonova D.A., Miller G.F., Solovev S.V. 7

REVIEW

GENERAL TOXICOLOGICAL ASPECTS OF DRUG ECOTOXICOLOGY

Ivanov M.B. 12

GEOLOGICAL AND MINERALOGICAL SCIENCES

ARTICLE

METHODOLOGY OF WORKS AND RESULTS OF SEISMOACOUSTIC
RESEARCHES IN CRUISE 131 OF THE RESEARCH VESSEL
“PROFESSOR VODYANITSKY”

*Rimskiy-Korsakov N.A., Pronin A.A., Khortov A.V., Mutovkin A.D.,
Litvinyuk D.A., Deryushkin D.V., Scherbachenko S.V., Korotaev V.N.* 18

MEDICAL SCIENCES

CLINICAL CASES

ANGIOMATOSIS OF THE BASE OF THE SKULL

Nasyrov M.V., Bakieva K.K. 25

A CLINICAL CASE OF INFILTRATIVE-SUPPURATIVE
TRICHOPHYTOSIS OF THE BEARD AREA

Khismatullina Z.R., Giniyatova I.V., Koreshkova K.M. 30

TECHNICAL SCIENCES

ARTICLES

LAGRANGIAN FUNCTION AND DYNAMICS OF CRYSTALLIZATION
IN A DOUBLE ELECTRIC LAYER: THE EFFECT OF AN ELECTRIC
FIELD ON IMPURITY WATERS

Ibraimov T.K., Satybaldiev A.B., Tashpilotov Y. 36

EVOLUTION OF MACHINE LEARNING METHODS:
FROM ALPHAZERO TO ALPHAPROOF AND THEIR
APPLICATION IN SOLVING MATHEMATICAL PROBLEMS

Kurnovskiy R.M. 41

STUDY OF THE FUNGICIDAL ACTIVITY OF TITANIUM-
CONTAINING BLAST FURNACE SLAGS

Polovneva D.O., Starostina I.V., Kiryushina N.Yu., Makridina Yu.L., Polenyaka Yu.T. 46

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

ARTICLE

QUANTUM PROPERTIES OF THE SURFACE LAYER
OF ATOMIC-SMOOTH METALS

Yurov V.M., Goncharenko V.I., Oleshko V.S., Zhangozin K.N. 52

CHEMICAL SCIENCES

ARTICLE

STUDY OF DEGRADATION OF GRANULATED MATERIALS
COMBINING BIOACTIVE AND ANTIBACTERIAL COMPONENTS

Solonenko A.P., Shevchenko A.E., Matyushenko A.A., Polonyankin D.A. 58

СТАТЬЯ

УДК 631.425.4

**АНАЛИЗ СТРУКТУРНО-АГРЕГАТНОГО СОСТАВА ПОЧВ
РАЗНОВОЗРАСТНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ ПРЕДСАЛАИРЬЯ****Безбородова А.Н., Филимонова Д.А., Миллер Г.Ф., Соловьев С.В.***ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения
Российской академии наук, Новосибирск, e-mail: solovyev@issa-siberia.ru*

Анализ структурно-агрегатного состава почв является одной из важных характеристик, влияющих на физические показатели и продуктивность агрофитоценозов. Цель исследования состояла в анализе текущего структурно-агрегатного состояния почв залежей Предсалаирья на территории Новосибирской области. Анализ структурно-агрегатного состава проведен методом Н.И. Саввинова путем определения общего количества агрегатов в почве и последующим исследованием количества водопрочных агрегатов. Выявлено, что из трех рассчитанных показателей структурно-агрегатного состава исследованных залежей разного возраста (коэффициента структурности; критерия водопрочности агрегатов; водостойчивости) наиболее равномерное увеличение в ряду молодых, средневозрастных и старых залежей наблюдается по коэффициенту структурности. При этом общий тренд в сторону улучшения состояния почв по данному показателю представляется хорошо заметным. Что касается двух других показателей (критерия водопрочности агрегатов и водостойчивости), то они изменяются во времени, о чем можно судить по залежам трех возрастных категорий, гораздо быстрее в рамках того же общего тренда восстановления исходных свойств почв залежей. Установлено, что для черноземов и темно-серых лесных почв разновозрастных залежей юго-востока Западной Сибири структурно-агрегатное состояние является весьма лабильным, динамичным почвенным свойством, которое надежно и наглядно маркирует процесс «прохождения» данными залежами различных возрастных категорий (молодые, средневозрастные, старые).

Ключевые слова: залежи, структурно-агрегатный состав, Новосибирская область, Предсалаирье, темно-серые лесные почвы, черноземы, коэффициент структурности, водопрочность агрегатов, водостойчивость агрегатов

Работа выполнена по государственному заданию Института почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук.

**THE ANALYSIS OF THE STRUCTURAL-AGGREGATE COMPOSITION
OF SOILS OF DIFFERENT-AGED FALLOWES OF PRE-SALAIR****Bezborodova A.N., Filimonova D.A., Miller G.F., Solovjev S.V.***Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, e-mail: solovyev@issa-siberia.ru*

Analysis of the structural-aggregate composition of soils is one of the important characteristics affecting the physical indicators and productivity of agrophytocoenoses. The aim of the study was to analyze the current structural and aggregate state of the fallows' soils of the Pre-Salair in the Novosibirsk region. The analysis of the structural-aggregate composition was carried out using the N. I. Savvinov method by determining the total number of aggregates in the soil and subsequently studying the number of water-stable aggregates. It was revealed that among the three calculated indicators of the structural-aggregate composition of the studied fallow lands of different ages (structure coefficient, the criterion of water resistance of aggregates, and waterproofness), the most even increase is observed in the structure coefficient in a series of young, middle-aged, and old fallow lands. At the same time, the general trend towards improving soil condition for this indicator is clearly visible. In contrast, the other two indicators (the criterion of water resistance of aggregates and waterproofness) change over time, as evidenced by the fallows in three age categories, but they do so much more rapidly within the same overall trend of restoring the original properties of fallow land soils. It has been established that for chernozems and dark-gray forest soils of different-aged fallow lands in the southeast of Western Siberia, the structural-aggregate state is a highly labile, dynamic soil property that reliably and clearly marks the process of fallow lands' transition through different age categories (young, middle-aged, old).

Keywords: fallow lands, structural-aggregate composition, Novosibirsk region, Pre-Salair, dark gray forest soils, chernozems, structure coefficient, the criterion of water resistance, waterproofness

The work was carried out according to the state assignment of the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Введение

Работы по изучению структурно-агрегатного состояния почв разновозрастных залежей правобережной части Новосибирской области (Предсалаирской дренированной равнины) являются частью масштабного и систематического исследования

свойств почв залежей и их растительного покрова, проведенного в период с 2017 по 2022 г. [1–3]. Изучение собственно структурно-агрегатного состояния почв было завершено коллективом в 2024 г. Актуальность исследования залежей подтверждается работами и других коллективов [4–5].

Одной из основных почвенных характеристик, влияющих на ее физические свойства и определяющих продуктивность агрофитоценозов, является ее структура [6–8]. При этом следует иметь в виду, что под структурой понимается способность почвы распадаться не только на отдельные определенной формы и размерности, но также и на агрегаты, обладающие различной водопрочностью.

Цель исследования состояла в анализе текущего структурно-агрегатного состояния почв залежей Предсалаирья на территории Новосибирской области.

Материалы и методы исследования

Для исследования использованы данные по шести показательным почвенным разрезам на черноземах выщелоченных и темно-серых лесных почвах, поскольку территория Предсалаирья, согласно почвенно-географическому районированию, относится к провинции черноземов и серых лесных почв [9]. Кроме того, темно-серые лесные почвы по своим характеристикам настолько напоминают черноземы, что их совместное рассмотрение в данном контексте представляется вполне оправданным.

В силу особенностей рельефа правобережной части Новосибирской области часть исследованных в 2017–2022 гг. почв имела различную степень смытости накануне перехода поля (или его части) из категории пашни в категорию залежи. Для того чтобы избежать ситуации, когда пришлось бы сравнивать показатели структурно-агрегатного состояния почв залежей, подвергавшихся и не подвергавшихся эрозионным процессам различной интенсивности в период их нахождения в составе пашни, коллектив намеренно (для данного исследования) абстрагировался от вариантов почв залежей различной степени смытости, рассматривая лишь несмытые варианты.

Почвы молодых залежей в данном исследовании представлены темно-серой лесной почвой (разрез 6/17, Искитимский р-н, окр. с. Морозово; залежь 3–4 лет) и черноземом выщелоченным (разрез 7/17, Искитимский р-н, окр. пос. Александровского; залежь 2–3 лет); почвы средневозрастных залежей – черноземами выщелоченными (разрезы 7/18, Искитимский р-н, окр. с. Улыбино; залежь 7–10 лет и 8/22, Тогучинский р-н, окр. с. Останино; залежь возрастом более 10 лет); почвы старых залежей – темно-серой лесной почвой (разрез 6/22, Болотнинский р-н, окр. с. Витебск; залежь около 20 лет) и черноземом выщелоченным (разрез 7/22, Тогучинский р-н, окр. с. Долгово; залежь 17–19 лет).

Таким образом, на залежи каждой возрастной категории (молодые, средневозрастные и старые) приходится по два разреза. Возраст выделенных и исследованных залежей определялся как по космическим снимкам и по сведениям, полученным от хозяйствующих субъектов, так и согласно методологии, разработанной Институтом почвоведения и агрохимии СО РАН [10]. Разработка пределов верхней и нижней возрастных границ (в годах) для отнесения конкретной залежи к той или иной общепризнанной возрастной категории (молодая, средневозрастная или старая), для территории Западной Сибири также выполнена коллективом авторов [11–12]. Таким образом, из исследованных залежей к молодым отнесены те, чей возраст составляет 2–4 года, к средневозрастным – интервал 5–15 лет, и к старым отнесены те залежи, чей возраст превысил 15 лет. Отбор почвенных образцов для определения структурно-агрегатного состава проводили сплошной колонкой – послойно, с шагом в 10 см, до глубины 50 см. Для анализа структурно-агрегатного состава и его показателей использовался усредненный почвенный образец. Данное исследование проводилось по методу Н.И. Саввинова путем определения общего количества агрегатов в почве и последующим исследованием количества водопрочных агрегатов. Условно принято, что оптимальный размер почвенных агрегатов колеблется в пределах от 10 до 0,25 мм, так как именно они «придают почвенной структуре ее уникальный вид в виде почвенных комочков и определяют почвенное плодородие». Для оценки структурного состояния почв рассчитывался коэффициент структурности, под которым понимается процентное отношение количества агрегатов от 10 до 0,25 мм к суммарному количеству агрегатов больше 10 и меньше 0,25 мм. Результаты оценивались по шкале, предложенной С.И. Долговым и П.У. Бахтиным, где значение больше 1,5 оценивалось как хорошая структурность, 1,5–0,67 – удовлетворительная, меньше 0,67 – неудовлетворительная [13, с. 62]. Также рассчитывался критерий водопрочности агрегатов – отношение суммы агрегатов (1–0,25 мм) при мокром и сухом просеиваниях в процентах, где значение больше 800 соответствует отличной оценке; 500–800 – очень хорошей; 100–500 – хорошей; 50–100 – удовлетворительной; менее 50 – неудовлетворительной [14].

Следующим важным показателем структуры почвы является ее устойчивость по отношению к внешним воздействиям, среди которых водное занимает одну из главенствующих ролей. Водоустойчивость позво-

ляет почве сохранять зернистую структуру даже после длительного увлажнения, а также является одной из важнейших характеристик, определяющих ее противозерозионную стойкость [15]. Кроме того, оценка водоустойчивости необходима для оценки и прогноза устойчивости почвы к водной эрозии, сопротивления воздействию тяжелой техники. Данный показатель рассчитывается как суммарное процентное количество агрегатов размером более 0,25 мм, полученных при мокром просеивании. Если их количество менее 30 %, оценка водоустойчивости принимается за неудовлетворительную, 30–40 % соответствует удовлетворительному показателю, 40–75 % – хорошая оценка, более 75 % – избыточно высокая [13, с. 62].

Анализ усредненных образцов производился в трех повторностях с целью дальнейшей статистической обработки данных в программном продукте Microsoft Excel. Было рассчитано среднее значение и среднеквадратическое отклонение для каждого из показателей по стандартным формулам.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассчитанные характеристики почвенного агрегатного состава разновозрастных залежей (коэффициент структурности, критерий водопрочности агрегатов и водоустойчивость) для наглядности представлены в виде графиков (рис. 1–3).

1. Коэффициент структурности (рис. 1). Почвы молодых залежей (что ожидаемо) отстают по данному показателю от почв залежей средневозрастных и старых; при этом их значения коэффициента структурности соответствуют удовлетворительным и хорошим (1,35 и 1,86 соответственно). Что касается почв залежей средневозрастных и старых, то выявленные для них значения данного показателя находятся на уровне хороших (от 2,51 до 3,87). Следует отметить, что коэффициент структурности оказывается тем параметром структурно-агрегатного состояния почв, который обнаруживает наиболее плавное изменение значений в исследованном ряду почв разновозрастных залежей.

2. Критерий водопрочности агрегатов (рис. 2). По данному показателю молодые залежи имеют в основном удовлетворительные значения (от 74 до 97); при рассмотрении же почв залежей средневозрастных и старых представляется очевидным их нахождение если и не в одной группе (на фоне почв молодых залежей), то в любом случае их почвы по этому показателю имеют значения от хороших до отличных (от 401 до 1002). Обращает на себя внимание то обстоятельство, что изменение значений критерия водопрочности почв средневозрастных и старых залежей происходит плавно, по мере увеличения их возраста, в то время как критерий водопрочности почв молодых залежей четко обособляет их в отдельную группу.

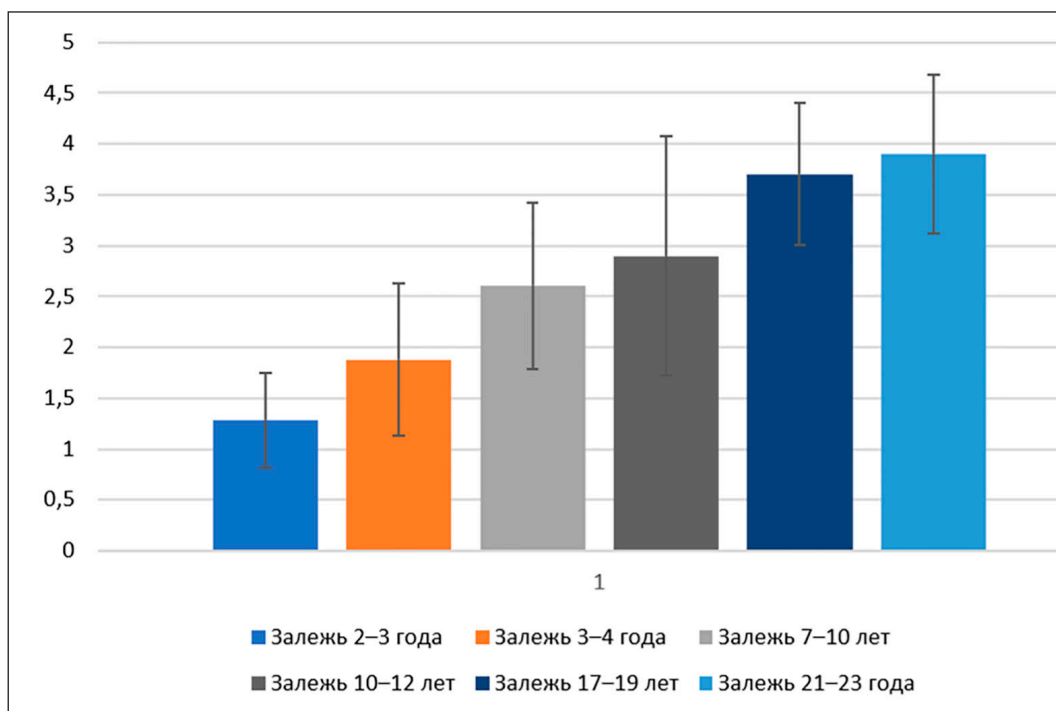


Рис. 1. Коэффициент структурности почв разновозрастных залежей

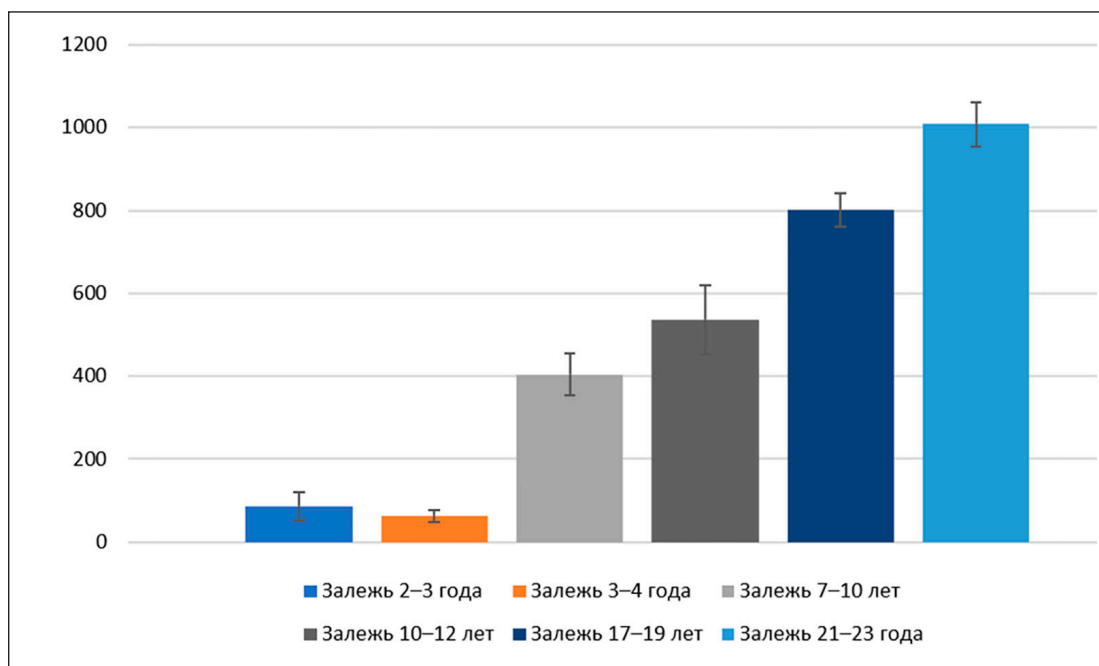


Рис. 2. Критерий водопрочности агрегатов почв разновозрастных залежей

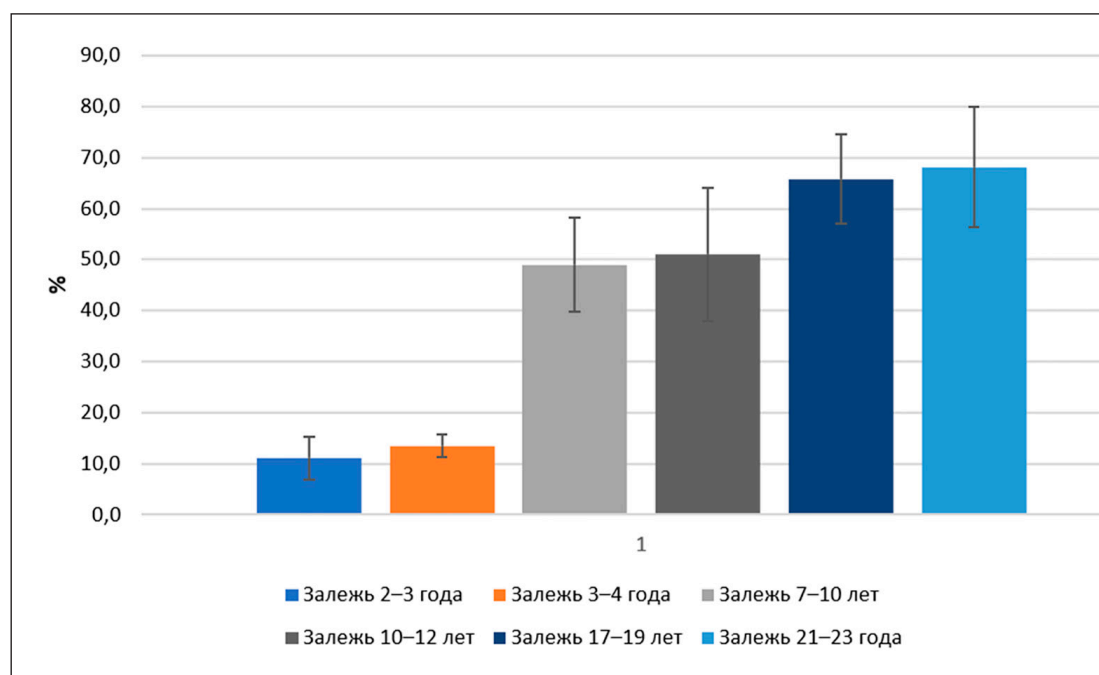


Рис. 3. Водоустойчивость почв разновозрастных залежей

3. Водоустойчивость (рис. 3). В данном случае почвы молодых залежей демонстрируют столь явно выраженную неудовлетворительную водоустойчивость (от 10,8 до 12,6 %), что на их фоне почвы средневозрастных и старых залежей образуют, по сути, одну группу со значениями по дан-

ному показателю от хороших до избыточно высоких (от 48 до 69 %).

В итоге приходим к выводу о том, что для почв разновозрастных залежей Предсалаирья структурно-агрегатное состояние является весьма лабильным, динамичным почвенным свойством.

Заключение

Выявлено, что из трех рассчитанных показателей структурно-агрегатного состояния почв исследованных залежей разного возраста (коэффициента структурности; критерия водопрочности агрегатов; водостойчивости) наименьшее различие между молодыми, средневозрастными и старыми залежами наблюдается именно по коэффициенту структурности. При этом общий тренд в сторону улучшения состояния почв по данному показателю представляется хорошо заметным также именно по коэффициенту структурности. Таким образом, данный показатель структурно-агрегатного состояния является наиболее лабильным из трех рассчитанных.

Что касается двух других показателей (критерия водопрочности агрегатов и водостойчивости), то для их изменения во времени (о чем можно судить по залежам трех возрастных категорий) нужно гораздо больше времени в рамках того же общего тренда восстановления исходных свойств почв залежей.

Таким образом, в целом структурно-агрегатное состояние почв разновозрастных залежей, являясь весьма изменчивым почвенным свойством, надежно и наглядно маркирует процесс «прохождения» данными залежами различных возрастных категорий (молодые, средневозрастные, старые).

Список литературы

1. Миллер Г.Ф., Соловьев С.В., Безбородова А.Н., Филимонова Д.А., Чумбаев А.С. К вопросу об изменении некоторых свойств почв под молодыми залежами на территории Новосибирской области // *Современные проблемы науки и образования*. 2017. № 6. DOI: 10.17513/spno.27133.
2. Безбородова А.Н., Миллер Г.Ф., Соловьев С.В., Филимонова Д.А. Почвенно-экологическая оценка эродированных черноземов юга Западной Сибири с учетом специфики климатических и геоморфологических особенностей территории // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2018. № 8. С. 59–63. DOI: 10.17513/mjprfi.11365.
3. Соловьев С.В., Миллер Г.Ф., Безбородова А.Н., Филимонова Д.А. Сукцессия на молодых и средневозрастных залежах лесостепной зоны Западной Сибири в пределах Новосибирской области // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2018. № 10. С. 116–120. DOI: 10.17513/mjprfi.12427.
4. Нечаева Т.В. Залежные земли России: распространение, агроэкологическое состояние и перспективы использования (обзор) // *Почвы и окружающая среда*. 2023. Т. 6, № 2. e215. DOI: 10.31251/pos.v6i2.215.
5. Нечаева Т.В., Смоленцева Е.Н. Сравнительная характеристика свойств и агрохимического статуса почв разного типа землепользования в лесостепи Западной Сибири // *Почвы и окружающая среда*. 2024. Т. 7, № 3. e281. DOI: 10.31251/pos.v7i3.281.
6. Рычкова М.И. Структурно-агрегатный состав и плотность почвы в зависимости от способа основной обработки и предшественника озимой пшеницы на эрозивно-опасном склоне // *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2019. № 11–1. С. 62–66.
7. Самофалова И.А. Влияние способов основной обработки на структурно-агрегатный состав дерново-подзолистой почвы в Нечерноземной зоне // *Земледелие*. 2019. № 1. С. 24–28. DOI: 10.24411/0044-3913-2019-10107.
8. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Смоленцева Е.Н., Семенова М.П., Личко В.И., Смоленцев Б.А. Влияние типа землепользования на физические свойства черноземов лесостепной зоны Западной Сибири // *Почвоведение*. 2021. № 9. С. 1061–1075. DOI: 10.31857/S0032180X21090045.
9. Булгаков Д.С., Рожков В.А., Карманов И.И. Почвенно-агротелиоративное районирование как информационная основа инвентаризации почвенного покрова пахотных земель России // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*, 2014. № (76). С. 3–32. DOI: 10.19047/0136-1694-2014-76-3-32
10. Степанов М.И., Сысо А.И., Чумбаев А.С., Миронычева-Токарева Н.П. Методические рекомендации по определению сроков пребывания земельных участков сельскохозяйственного назначения Новосибирской области в залежном состоянии. Новосибирск: Наука, 2017. 20 с.
11. Миллер Г.Ф., Филимонова Д.А., Безбородова А.Н., Соловьев С.В. Почвенно-экологическая оценка эрозивно-опасных почв под молодыми и средневозрастными залежами юго-востока Западной Сибири // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2019. № 11. С. 26–29. DOI: 10.17513/mjprfi.12926.
12. Филимонова Д.А., Миллер Г.Ф., Соловьев С.В., Безбородова А.Н. Сравнение почвенных характеристик молодых и средневозрастных залежей эрозивно-опасных территорий юга Западной Сибири // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2019. № 10–1. С. 23–27. DOI: 10.17513/mjprfi.12861.
13. Шейн Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.
14. Цырибко В.Б., Цыбулько Н.Н., Устинова А.М., Логачев И.А., Касьяненко И.И., Юхновец А.В., Митькова А.А. Структурное состояние и противоэрозийная устойчивость дерново-подзолистых почв, сформированных на моренных и лёссовидных суглинках // *Почвоведение и агрохимия*. 2019. № 1. С. 25–32.
15. Цыбулько Н.Н., Цырибко В.Б., Жукова И.И., Логачев И.А. Водостойчивость структуры дерново-подзолистых почв, подверженных водной эрозии, на разных агрофонах // *Научно-агрономический журнал*. 2024. № 1. С. 40–47. DOI: 10.34736/FNC.2024.124.1.005.40-47.

**ОБЩЕТОКСИКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ЛЕКАРСТВЕННОЙ ЭКОТОКСИКОЛОГИИ****Иванов М.Б.***ООО «Научно-производственный центр Энзим», Санкт-Петербург,
e-mail: maybenivamp@gmail.com*

Целью данной статьи является анализ возможных и вероятных последствий взаимодействия компонентов лекарственных средств с элементами окружающей среды и оценка их токсического влияния на экосистемы. Рассмотрено, как они могут способствовать развитию антибиотикорезистентности и других патологий. В рамках данного исследования проведен обширный анализ литературы по проблеме экотоксикологической характеристики поллютантов, охвативший период с 1980 по 2024 г. В общей сложности проанализировано более 170 источников, 26 прямо цитируются в настоящей статье. Особое внимание в исследовании уделено идентификации источников поллютантов, являющейся одним из наиболее важных аспектов экотоксикологического анализа. Указывается на нахождение повсеместно в воде, донных отложениях, почве, в биологических системах, на поверхностях и в атмосфере в широком диапазоне доз и концентраций сотен компонентов десятков фармацевтических препаратов. Определены возможные формы и проявления токсического процесса, как последствий лекарственного загрязнения. Рассмотрены механизмы формирования одного из наиболее серьезных последствий действия экофармполлютантов в популяции – антибиотикорезистентности. В заключении приводятся выводы о том, что насущным является изучение общетоксикологических аспектов лекарственной экотоксикологии, так как экофармполлютанты, попадая в окружающую среду, могут вызывать серьезные последствия как для экосистем, так и для здоровья человека. Запуск токсического процесса в экосистемах ведет к экологическим изменениям, которые требуют активного мониторинга и разработки эффективных методов управления, при этом внедрение комплексного риск-ориентированного подхода на всех этапах жизненного цикла лекарственного препарата – от первоначальной идеи до постмаркетингового мониторинга – критически важно для обеспечения безопасности, эффективности и качества. Требуется обоснование, разработка и внедрение комплексного подхода оценки риска для надорганизменных форм организации жизни (от организмов до биосферы), включая научные, инженерно-технические, юридические и административные решения, которые могли бы способствовать снижению опасности формирования и развития токсических процессов.

Ключевые слова: экофармполлютанты, токсический процесс, фармакотоксикология, экотоксикология, фармакоэкологическая, антибиотикорезистентность

**GENERAL TOXICOLOGICAL ASPECTS
OF DRUG ECOTOXICOLOGY****Ivanov M.B.***LLC “Scientific and Production Center Enzyme”, Saint Petersburg,
e-mail: maybenivamp@gmail.com*

The purpose of this article is to analyze possible and probable consequences of interaction of components of drugs with elements of the environment and to assess their toxic impact on ecosystems. It is considered how they can contribute to development of antibiotic resistance and other pathologies. Within the framework of this study, an extensive analysis of literature on the problem of ecotoxicological characteristics of pollutants was carried out, covering the period from 1980 to 2024. In total, more than 170 sources were analyzed, 26 are directly cited in this article. Particular attention in the study is paid to identification of sources of pollutants, which is one of the most important aspects of ecotoxicological analysis. It is indicated that hundreds of components of dozens of pharmaceuticals are found everywhere in water, bottom sediments, soil, in biological systems, on surfaces and in the atmosphere in a wide range of doses and concentrations. Possible forms and manifestations of the toxic process as a consequence of drug pollution are determined. The mechanisms of formation of one of the most serious consequences of action of ecopharmaceutical pollutants in the population – antibiotic resistance are considered. The conclusions are made that it is urgent to study general toxicological aspects of medicinal ecotoxicology, since ecopharmaceutical pollutants, getting into the environment, can cause serious consequences both for ecosystems and for human health. The launch of a toxic process in ecosystems leads to environmental changes that require active monitoring and development of effective management methods, while the introduction of a comprehensive risk-oriented approach at all stages of the life cycle of a drug – from the initial idea to post-marketing monitoring – is critical to ensure safety, efficiency and quality. It is necessary to substantiate, develop and implement a comprehensive approach to risk assessment for supraorganismal forms of life organization (from organisms to the biosphere), including scientific, engineering, legal and administrative solutions that could help reduce the risk of formation and development of toxic processes.

Keywords: ecopharmaceutical pollutants, toxic process, pharmacotoxicology, ecotoxicology, pharmacoeecotoxicology, antibiotic resistance

Введение

Современное общество функционирует в условиях воздействия широкого спектра угроз как природного, так и антропогенного генеза, от эффектов от накопившихся проблем, оставленных предшествующими поколениями и всей природой формирования и развития нашей цивилизации, до экологических и связанных с ними социальных проблем, вызванных продолжающимся ростом человеческой популяции, ее деятельностью по самообеспечению продуктами производства и поступлением и накоплением в окружающей среде отходов человеческой деятельности [1, с. 105–118; 2; 3]. Одной из таких проблем является загрязнение окружающей среды компонентами активных фармакологических субстанций, вспомогательными веществами лекарственных средств, элементами первичной и вторичной упаковки, которое стало актуальным направлением исследований в области экотоксикологии [1, с. 105–118; 4; 5]. Экофармаполлютанты, попадая в окружающую среду, способны приводить к формированию токсических процессов на всех уровнях организации живых систем, в том числе оказывая негативное воздействие на экосистемы и здоровье населения [5–7]. Токсические процессы – это сложные явления, проявляющиеся на всех уровнях биологической организации, от молекул и клеток до целых экосистем и биосферы в целом. Именно это многоуровневое воздействие делает их omnizotoxicными, то есть затрагивающими все аспекты окружающей среды [1, с. 105–118; 2; 7]. В данной статье будет рассмотрена важность изучения общетоксикологических аспектов лекарственной экотоксикологии, а также выявлены основные источники опасности и последствия для биосферы.

Целью работы является анализ возможных и вероятных последствий взаимодействия компонентов лекарственных средств с элементами окружающей среды и оценка их токсического влияния на экосистемы. Рассмотрим, как эти вещества могут способствовать развитию антибиотикорезистентности и других патологий

Материалы и методы исследования

В процессе исследования была проведена тщательная аналитическая работа, направленная на изучение обширного массива научных публикаций, включая статьи, монографии и учебники, которые доступны в открытом доступе. В частности, акцент был сделан на электронные версии данных материалов, что значительно расширяет до-

ступ к актуальной информации. Для эффективного поиска использовались различные базы данных, такие как eLibrary, PubMed, Scopus, Web of Science и Cyberleninka.ru. Эти ресурсы предоставляют богатую информацию по множеству научных дисциплин и являются важными инструментами для исследователей. Кроме того, в ходе работы был осуществлен поиск по ключевым словам с использованием популярных поисковых систем, таких как Google и Яндекс. Это позволило выявить дополнительные источники, которые могут не быть представлены в специализированных базах данных, но все же содержат ценную информацию по заданной тематике. В результате такого комплексного подхода к поиску литературы в работу были отобраны научные источники, охватывающие период с 1980 по 2024 г., что позволяет получить полное представление о развитии исследуемой области. Общее количество проанализированных литературных источников превысило 170, из которых в тексте статьи процитировано 26 наиболее значимых. Это свидетельствует о глубоком и всестороннем анализе, который был проведен в рамках данной работы. В процессе исследования также были рассмотрены и обоснованы общетоксикологические аспекты, касающиеся существующих терминологических и мировоззренческих проблем в области экотоксикологии.

Результаты исследования и их обсуждение

На современном этапе развития человеческого познания окружающего мира, в рамках классификации направлений научного поиска принято считать, что лекарственной токсикологией (фармакотоксикологией) является раздел токсикологии (фармакологии) и токсикологической химии, предметом исследования которого служат патологические проявления на всех уровнях организации живых систем, вызываемые активными фармакологическими субстанциями, а также композициями лекарственных и вспомогательных веществ [3, 4]. При этом фармакотоксикология подразумевает в том числе, кроме изучения последствий токсического воздействия фармацевтических препаратов и предметов медицинского применения, обоснование и разработку средств, методов и схем лечения и профилактики побочных эффектов, вызванных фармацевтическими препаратами. Не следует исключать из сферы интересов лекарственной токсикологии и отравления лекарствами, которые тоже являются предметом исследований, как и пути детоксика-

ции. Кроме того, лекарственная токсикология не только может, но и должна рассматриваться как раздел экотоксикологии [8].

Важно отметить, что ключевым аспектом экотоксикологической оценки поллютантов является выявление их источников. Иногда бывает достаточно трудно с высокой точностью установить источник загрязнения, поскольку экотоксиканты могут поступать в окружающую среду в крайне малых концентрациях, порой в виде примесей к совершенно безвредным веществам. Так, например, активные фармобстанции и их метаболиты, вспомогательные вещества становятся фармэкополлютантами (фармэкоксикантами, ксенобиотиками), попадая в окружающую среду, зачастую в количествах на грани чувствительности современных аналитических приборов, разными путями: через выбросы в атмосферу; производственные (лабораторные) сбросы в сточные воды; некачественную утилизацию просроченных препаратов (свалки); физиологические процессы растений, животных и человека, употребляющих препараты и выделяющих остатки активных фармобстанций и/или сопутствующих веществ, а также продукты их биотрансформации в окружающую среду [1, с. 105–118; 8; 9].

На сегодняшний день среди основных источников загрязнения можно выделить несколько ключевых факторов: производственные предприятия и научно-исследовательские центры, занимающиеся разработкой новых лекарственных средств, где на этапах производства могут происходить утечки и сбросы, способствующие загрязнению атмосферного воздуха, водоемов и почвы; медицинские и аптечные учреждения, где неправильная утилизация использованных медикаментов и медицинских изделий также играет значительную роль в их попадании в экосистемы; сельское хозяйство (животноводство, птицеводство, рыбководство, плодоводство, где используются антибиотики и гормоны для повышения продуктивности животных, а также агрохимикаты как средства защиты растений, что ведет к их распространению в наземных и водных экосистемах) и ветеринария; население как потребитель лекарственных средств. Таким образом, интенсивное производство и потребление фармацевтических препаратов, средств гигиены, косметических средств, пищевых добавок приводит к постоянному их поступлению в природную среду, тем самым приводя к формированию всего спектра форм и проявлений токсического процесса на всех уровнях организации жизни [7–9].

По всему миру в воде, донных отложениях, почве, в биологических системах, на поверхностях и в атмосфере в широком диапазоне доз и концентраций обнаруживаются сотни компонентов десятков фармацевтических препаратов, в том числе отпускаемые по рецепту и без рецепта лекарства, изготовленные для использования человеком, в ветеринарии или агробизнесе, среди них: антибиотики, антимикробные и антигельминтные средства; гормоны, в том числе компоненты оральных контрацептивов; анальгетики и противовоспалительные средства, в том числе нестероидные противовоспалительные препараты, например диклофенак; регуляторы липидов; бета-блокаторы; психотропные препараты, в том числе антидепрессанты и нейролептики, транквилизаторы, кофеин и запрещенные наркотики, такие как кокаин и метамфетамин; противосудорожные средства; антигиперлипидемические средства и диагностические контрастные вещества [8, 10].

Обладая заложенными разработчиками и производителями высокоспецифичными свойствами и являясь в значительной части случаев представителями ксенобиотиков, лекарственные средства (их компоненты), попадая в окружающую среду, вносят существенный вклад в изменение складывающегося поллютантного профиля, способно приводить к истощению адаптивного потенциала среды и способствовать формированию сочетанных и комбинированных негативных влияний на живые системы всех уровней. В то же время эволюционно сформированные адаптационно-приспособительные механизмы, присущие надорганизменным формам организации живой материи, часто позволяют эффективно реагировать на поступление экополлютантов в окружающую среду. Например, множество абиотических и биотических процессов сосредоточено на удалении экополлютантов. Таким образом, многие поллютанты, попав в наземно-воздушную, водную (водно-воздушную), почвенную или организменную среду обитания, приносят минимальный вред экосистемам, так как период их воздействия крайне мал. Тем не менее поллютанты, проникающие в экосистемы в форме высокоспецифических активных фармакологических веществ, обладающих свойствами ксенобиотиков и не подлежащих трансформации или трансформирующихся с увеличением реакционной способности (токсичности), способны длительно сохраняться в окружающей среде или причинять необратимые повреждения экосистеме. Такие вещества, как правило, представляют собой

потенциально опасные экосистемные фармакотоксиканты [11–13].

Основой для запуска токсического процесса на любом из уровней организации биологических систем является базовое положение о том, что число лекарств, которые в настоящее время известны и производятся в мировом масштабе, огромно, а последствия их применения разнообразны и сложны; любое лекарственное средство обладает токсичностью, в том числе в связи с тем, что действие всех активных фармсубстанций основано на универсальном свойстве веществ – токсичности [1, с. 105–118; 2; 8]. Несмотря на то, что в настоящее время ни один лекарственный препарат (для медицинской или ветеринарной практики) или изделие медицинского (ветеринарного) применения не могут быть разрешены к применению до тех пор, пока не будут тщательно исследованы все формы и проявления токсичности, включая фармакологическую активность, переносимость, определение оптимальных доз и схем применения, тем не менее число регистрируемых фактов формирования проявлений токсических процессов на различных уровнях организации живых систем инициируемых активными компонентами лекарственных препаратов, в том числе острых отравлений (ятрогенных; у людей с повышенной чувствительностью; в результате самолечения; на фоне злоупотребления; суицидных) неизменно растет [8, 14, 15]. Зачастую токсические, в том числе экотоксические, последствия применения лекарства могут быть связаны с некорректным изучением его безопасности. Кроме того, существенной проблемой токсикологии (фармакологии), связанной с применением медикаментов, является то, что многие из них обладают побочными (негативными) эффектами. В целом создать лекарство, воздействующее исключительно на патологический процесс и не влияющее на нормальное функционирование организма, не представляется возможным, и тем более невозможно исключить негативное действие на процессы в надорганизменных биологических системах [15–17]. Попадая в окружающую природную среду, фармацевтические субстанции могут претерпевать трансформации под воздействием как биотических, так и абиотических факторов, зачастую с образованием продуктов трансформации, представляющих потенциальную опасность для индивидуальных живых организмов и человека, а также для популяций, сообществ, биогеоценозов и биосферы [2, 17, 18]. Кроме того, опасность фармэкополлютантов заключается в том, что они могут по-

падать в пищевые цепи (сети) и подвергаться биомагнификации, а в случае контакта с другими фармацевтическими веществами с высокой долей вероятности способны приводить к синергетическим и кумулятивным эффектам [18, 19].

Попадая в экосистемы, экофармполлютанты могут, начиная с молекулярного до организменного уровня, вызвать запуск токсического процесса, который может стать пусковым механизмом для формирования токсических процессов на надорганизменных уровнях и характеризоваться изменениями в биоценозах и функционировании экосистем, а также загрязнять биосферные процессы [1, с. 105–118; 19; 20]. Токсиканты, в том числе экофармтоксиканты, способны, проникая через биологические барьеры, приводить в организмах живых существ к формированию широкого спектра патологических реакций, в том числе вызывая как острые, так и хронические отравления. Явления, сопровождающие действие фармполлютантов, могут существенно изменять биоразнообразие, нарушая естественные цепочки питания и приводя к деградации экосистем [20–22]. Среди возможных форм и проявлений токсического процесса, как последствий лекарственного загрязнения, можно выделить: общее токсическое действие на микробиоту, растения, животных, человека (в том числе гибель видов) [1, с. 105–118; 22; 23]; провоцирование сбоев в работе репродуктивной системы, в том числе снижение фертильности гидробионтов (включая ихтиофауну), рептилий, птиц, млекопитающих и др.; неожиданные изменения в поведении и анатомии некоторых животных; развитие аллобитических состояний, в том числе толерантности или повышения чувствительности целевых групп животных или людей к целым классам лекарственных средств [12, 22, 23]; формирование устойчивости патогенных микроорганизмов по отношению к антибактериальным средствам, антибиотикорезистентности; инициация и развитие специальных форм токсического действия (кластогенеза, онкогенеза, тератогенеза); угнетение свойств микробиоты, в том числе гидробиоты, детоксицировать органические соединения, загрязняющие воду, донные отложения и почву [1, с. 105–118; 23; 24].

Одним из наиболее серьезных последствий действия лекарственных экофармполлютантов является развитие антибиотикорезистентности [1, с. 105–118; 24; 25]. Так, установлено, что наиболее интенсивно поллютанты взаимодействуют с микроорганизмами (вирусами, бактериями, грибами), которые в некоторых случаях реаги-

руют на воздействие через характерные защитные и адаптивные механизмы, а также через формирование и развитие широкого спектра форм и проявлений токсического процесса на субклеточном, клеточном, органном, организменном и популяционном уровнях в их биологических системах, в том числе с выходом в среду физиологически активных веществ, таких как антибиотики [1, с. 105–118; 26]. Кроме того, с увеличением концентрации антибиотиков в природе микроорганизмы начинают адаптироваться, осуществлять горизонтальный перенос информации, что приводит к возникновению устойчивых штаммов. Такой ход событий, в свою очередь, соответственно, запускает формы и проявления токсических процессов в других биосистемах (растений, животных, человека), которые замыкаются во взаимосусливающиеся и самоподдерживающиеся порочные круги, например, антибиотикорезистентности, что создает угрозу для здоровья и жизни человека и животных, так как лечение инфекций становится неэффективным [24–26].

Выводы

1. Таким образом, важность изучения общетоксикологических аспектов лекарственной экотоксикологии невозможно переоценить. Экофармполлутанты, попадая в окружающую среду, могут вызывать серьезные последствия как для экосистем, так и для здоровья человека.

2. Запуск токсического процесса в экосистемах ведет к экологическим изменениям, которые требуют активного мониторинга и разработки эффективных методов управления.

3. Внедрение комплексного риск-ориентированного подхода на всех этапах жизненного цикла лекарственного препарата – от первоначальной идеи до постмаркетингового мониторинга – критически важно для обеспечения безопасности, эффективности и качества.

4. Обоснование, разработка и внедрение комплексного подхода оценки риска для надорганизменных форм организации жизни (от организмов до биосферы), включая научные, инженерно-технические, юридические и административные решения, могли бы способствовать снижению опасности формирования и развития токсических процессов.

Необходимость в проведении дальнейших исследований и мониторинга уровней загрязнения лекарственными средствами, а также разработка новых подходов к утилизации и использованию медикаментов становятся более актуальными. Поддер-

жание усовершенствованных методов контроля и профилактики экофармполлутантов и антибиотикорезистентности поможет снизить риск негативного влияния на биосферу и здоровье человека.

Столь же тщательную проверку на токсичность (способность приводить к формированию токсического процесса на разных уровнях организации живых систем), как и лекарственные препараты, должны проходить вспомогательные вещества, входящие в их состав, а также косметические и гигиенические средства (косметика, парфюмерия, средства по уходу во время менструального цикла, лосьоны, шампуни, мыло, зубные пасты и солнцезащитные кремы), ряд пищевых продуктов и пищевые добавки (наполнители, формообразователи, растворители, стабилизаторы, пищевые красители, антиоксиданты, консерванты, ароматические вещества, вкусовые добавки и т.д.).

Важно, чтобы все заинтересованные стороны, включая государственные учреждения, производители фармацевтической продукции и общество, объединяли свои усилия для решения этой важной задачи.

Список литературы

1. Иванов М.Б. Токсикология. Т. I. Начала токсикологии: монография. Гатчина: Книгиня Ольга, 2024. 224 с.
2. Иванов М.Б. Фундаментальные категории экотоксикологии // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2024. № 10. С. 16–23. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=13661> (дата обращения: 14.11.2024). DOI: 10.17513/mjphi.13661.
3. Ильин А.Н. Кризис экологии и экологического сознания в обществе потребления // Век глобализации. 2016. № 1–2. С. 147–160.
4. Лыков И.Н. Фармацевтическое загрязнение окружающей среды // Проблемы региональной экологии. 2020. № 3. С. 23–27. DOI: 10.24411/1728-323X-2020-13023.
5. Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д., Розенберг А.Г. Иерархия экологических гомеостазов как принцип системологии // Известия РАН. Серия биологическая. 2023. № 7. С. 118–128. DOI: 10.31857/S1026347023600231.
6. Цюпка В.П. О понимании структурности и системности живого // Научное обозрение. Фундаментальные и прикладные исследования. 2018. № 1. URL: <https://scientificreview.ru/ru/article/view?id=11> (дата обращения: 30.09.2024).
7. Цюпка В.П. О понимании системной организации живого // Norwegian Journal of Development of the International Science. 2018. № 18–2. С. 13–17.
8. Гуськова Т.А. Лекарственная токсикология и безопасность лекарственных средств // Токсикологический вестник. 2014. № 2 (125). С. 2–5.
9. Чуйко Г.М., Законнов В.В., Бродский Е.С., Шелепчиков А.А. Методический подход к оценке источников и путей поступления стойких органических загрязняющих веществ (СОЗ) в пресноводные объекты // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. 2022. № 10. С. 33–39. DOI: 10.35627/2219-5238/2022-30-10-33-39.
10. Новикова Ю.А., Маркова О.Л., Фридман К.Б. Основные направления минимизации рисков здоровью населения, обусловленных загрязнением поверхностных источни-

ков питьевого водоснабжения лекарственными средствами // Гигиена и санитария. 2018. Т. 97, № 12. С. 1166–1170. DOI: 10.18821/0016-9900-2018-97-12-1166-1170.

11. Костюк С.А. Система биотрансформации ксенобиотиков: гены детоксикации // Медицинские новости. 2020. № 11. С. 12–16.

12. Безель В.С. Экологическая токсикология в системе наук о биосфере // Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера». 2012. Т. 4, № 2. С. 131–141.

13. Захаров В.М., Смуров А.В. Концепция здоровья среды: история и перспективы развития (основные вехи) // Жизнь Земли. 2018. № 40 (2). С. 152–157.

14. Бродский А.К., Сафронова Д.В. Глобальный экологический кризис: взгляд на проблему через призму биоразнообразия // Биосфера. Секция: Биологические науки. 2017. Т. 9, № 1. С. 48–70. URL: www.21bs.ru (дата обращения: 12.12.2024). DOI: 10.24855/biosfera.v9i1.323.

15. Бирюкова Н.П., Напалкова В.В., Морозова А.В. Служба мониторинга безопасности лекарственных препаратов в организациях-разработчиках/производителях лекарственных средств для ветеринарного применения // Российский паразитологический журнал. 2019. № 13 (2). С. 73–81. DOI: 10.31016/1998-8435-2019-13-2-73-81.

16. Эльхам Э.А., Романова Т.А. Влияние фармацевтических отходов на окружающую среду и проблемы обращения с ними (Обзорная статья) // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 6 (108). С. 15–17. DOI: 10.23670/IRJ.2021.108.6.034.

17. Салова Т.Ю., Громова Н.Ю. Техногенные системы и экологический риск // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 2. С. 295–296.

18. Коломенская В.А. Анализ воздействия отходов производства на экосистему // Вестник науки. 2024. Т. 4, № 5 (74). С. 1986–1995.

19. Штабский Б.М., Гжегоцкий М.Р., Шафран Л.М. Элементы системного подхода в гигиеническом нормировании ксенобиотиков // Гигиена и санитария. 2016. № 95 (3). С. 311–315. DOI: 10.18821/0016-9900-2016-95-3-311-315.

20. Захаров В.М. Концепция здоровья среды: теория и практика (проблемы и перспективы) // Жизнь Земли. 2018. № 40 (3). С. 293–300.

21. Маликова И.М., Тимофеева А.В., Каримова Л.И. Оценка эффективности мероприятий по обеспечению техносферной безопасности // International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2024. Vol. 5–5 (92). P. 98–101. DOI: 10.24412/2500-1000-2024-5-5-98-101.

22. Гелашвили Д.Б. Популяционная экотоксикология и экологические риски // Теоретические проблемы экологии и эволюции (Шестые Любичевские чтения). Тольятти: Касандра, 2015. С. 89–93.

23. Захаров В.М., Трофимов И.Е. Гомеостатические механизмы биологических систем: пролегомены // Известия РАН. Серия биологическая. 2023. № 7. С. 3–8. DOI: 10.31857/S1026347023600152.

24. Землянко О.М., Рогоза Т.М., Журавлева Г.А. Механизмы множественной устойчивости бактерий к антибиотикам // Экологическая генетика. 2018. Т. 16, № 3. С. 4–17. DOI: 10.17816/ecogen1634-17.

25. Захарова О.И., Лискова Е.А., Михалева Т.В., Блохин А.А. Антибиотикорезистентность: эволюционные предпосылки, механизмы, последствия // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2018. № 64 (3). С. 13–21. DOI: 10.30766/2072-9081.2018.64.3.13-21.

26. Ажогина Т.Н., Скугорева С.Г., Аль-Раммахи А.А.К., Гненная Н.В., Сазыкина М.А., Сазыкин И.С. Влияние поллютантов на распространение генов устойчивости к антибиотикам в окружающей среде // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 6–14. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-3-006-014.

СТАТЬЯ

УДК 551.46.07

МЕТОДИКА РАБОТ И РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В 131 РЕЙСЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СУДНА «ПРОФЕССОР ВОДЯНИЦКИЙ»

¹Римский-Корсаков Н.А., ¹Пронин А.А., ¹Хортов А.В., ¹Мутовкин А.Д.,

²Литвинюк Д.А., ³Дерюшкин Д.В., ³Щербаченко С.В., ⁴Коротаев В.Н.

¹ФГБУН Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук,
Москва, e-mail: nrk@ocean.ru;

²ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского
Российской академии наук», Севастополь, e-mail: ibss@ibss-ras.ru;

³ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт Российской академии наук»,
Севастополь, e-mail: secretary@mhi-ras.ru;

⁴ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
Москва, e-mail: vlaskor@mail.ru

В статье представлены результаты работ по изучению шельфа и континентального склона юго-восточной части Крыма с помощью сейсмоакустического профилирования, выполненного в 131 рейсе научно-исследовательского судна «Профессор Водяницкий» в 2024 г. Эти экспедиционные исследования являются продолжением цикла многолетних работ, связанных с комплексным применением современных средств гидроакустики для изучения геолого-геоморфологического строения шельфа и верхней части материкового склона. Опыт предыдущих исследований показал высокую эффективность применения аппаратуры сейсмоакустического профилирования типа «спаркер» в Институте океанологии Российской академии наук. В статье приведены сведения об изменениях в методике работ, которые пришлось сделать ввиду изменившихся внешних условий. Эти изменения касаются, прежде всего, области навигационного обеспечения работ в современных условиях, а также технической обработки и вида представления полученных геофизических данных. В результате проведенных экспедиционных исследований авторами был получен большой объем новых данных, позволивших существенно уточнить и расширить представления о строении юго-восточной континентальной окраины Крыма в области знаний о ее структурно-тектоническом и литолого-стратиграфическом строении. Выделение трансгрессивно-регрессивных комплексов с типичным набором сейсмофаций позволило получить дополнительные сведения о колебаниях уровня моря в плейстоцен-голоценовое время. Также были выделены ранее неизвестные газовые скопления в придонной части разреза, отвечающей четвертичным отложениям. Полученные результаты имеют также практическое значение с точки зрения обнаружения на шельфе газовых скоплений, представляющих определенную опасность для судоходства и инженерного строительства.

Ключевые слова: шельф, Крым, непрерывное сейсмоакустическое профилирование, сейсмокомплекс, бровка шельфа, отражающий горизонт, каньон, палеорусло, плейстоцен

Исследования проведены в рамках государственного задания по теме № FMWE-2024-0024, экспедиционные исследования выполнены в Центре коллективного пользования «Научно-исследовательское судно “Профессор Водяницкий”».

METHODOLOGY OF WORKS AND RESULTS OF SEISMOACOUSTIC RESEARCHES IN CRUISE 131 OF THE RESEARCH VESSEL “PROFESSOR VODYANITSKY”

¹Rimskiy-Korsakov N.A., ¹Pronin A.A., ¹Khortov A.V., ¹Mutovkin A.D.,

²Litvinyuk D.A., ³Deryushkin D.V., ³Scherbachenko S.V., ⁴Korotaev V.N.

¹Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Science, Moscow, e-mail: nrk@ocean.ru;

²Kovalevsky South Seas Biology Institute Russian Academy of Sciences,
Sevastopol, e-mail: ibss@ibss-ras.ru;

³Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of Sciences,
Sevastopol, e-mail: secretary@mhi-ras.ru;

⁴Lomonosov Moscow State University, Moscow, e-mail: vlaskor@mail.ru

The article presents the results of the work on studying the shelf and continental slope of the southeastern part of Crimea using seismoacoustic profiling performed during the 131st cruise of the research vessel Professor Vodyanitsky in 2024. These expeditionary studies are a continuation of a cycle of long-term works related to the integrated use of modern hydroacoustics to study the geological and geomorphological structure of the shelf and the upper part of the continental slope. The experience of previous studies has shown the high efficiency of using seismoacoustic profiling equipment of the Sparker type at the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences. The article provides information on changes in the work methodology that had to be made due to the changed external conditions. These changes concern, first of all, the area of navigation support for work in modern

conditions, as well as technical processing and the type of presentation of the obtained geophysical data. As a result of the expeditionary research, the authors obtained a large volume of new data that allowed them to significantly clarify and expand their understanding of the structure of the southeastern continental margin of Crimea in the field of knowledge of its structural-tectonic and lithological-stratigraphic structure. The identification of transgressive-regressive complexes with a typical set of seismic facies provided additional information on sea level fluctuations in the Pleistocene-Holocene period. Previously unknown gas accumulations were identified in the bottom part of the section corresponding to Quaternary deposits. The results obtained are also of practical importance in terms of detecting gas accumulations on the shelf, which pose a certain danger to shipping and engineering construction.

Keywords: shelf, Crimea, continuous seismoacoustic profiling, seismic complex, reflecting horizon, shelf edge, canyon, paleochannel, Pleistocene

The research was conducted within the framework of the state assignment on topic No. FMWE-2024-0024, the expeditionary research was carried out at the Center for Collective Use «Research Vessel “Professor Vodyanitsky”».

Введение

Район исследований находился между м. Сарыч и м. Чауда, располагаясь вдоль Южного берега Крыма, который относится к единой крупной тектонической структуре – Крымскому мегантиклинорию внешней зоны альпийского складчатого пояса. Основным элементом ядра мегантиклинория является Главная гряда Крымских гор, а Южная часть ядра мегантиклинория и его южное крыло находятся на дне Черного моря [1]. Этот район неоднократно изучался и ранее, в том числе и авторами, в ходе 115, 116, 124 и 126 рейсов НИС «Профессор Водяницкий» [2–4]. Такой большой интерес к данному району объясняется как его сложным строением, так и многообразием различных геолого-геоморфологических объектов и процессов, а также их взаимодействием. На первоначальном этапе работ, в первых экспедициях на южном шельфе Крыма, целью и наиболее интересным объектом исследований представлялась древняя речная сеть и древние береговые линии [5], сохранившиеся следы которых искали с помощью гидролокации и акустического профилирования. По результатам этих экспедиционных исследований была построена палеогеоморфологическая карта – схема дна участка материкового склона Южного Крыма (схема расположения древней гидрографической сети). В ходе камеральной обработки данных этой экспедиции (115 рейс) стало ясно, что этих технических средств недостаточно, и есть необходимость иметь более полные данные о глубинном строении осадочной толщи.

С этой целью к следующему сезону экспедиционных работ была подготовлена аппаратура для непрерывного сейсмического профилирования толщи донных отложений с электроискровым возбуждением сигнала и специально изготовленной приемной косой, с оптимальными для района исследований характеристиками [2, 6]. Применение этой аппаратуры сразу показало свою

эффективность, и она стала интенсивно использоваться в последующих экспедициях. В ходе этих экспедиций совершенствовалась методика и технология проведения работ, также крупным положительным фактором явилась возможность обследовать выявленные природные объекты, представляющие интерес планомерно, с учетом данных, полученных в предыдущих экспедициях. В этом отношении материалы НСП, полученные в 131 рейсе НИС «Профессор Водяницкий», являются наиболее полными и качественными. Кроме объектов, непосредственно связанных с древней гидрографической сетью, на профилях сейсмоакустического профилирования хорошо читаются разрывные нарушения, связанные с сейсмоактивными разломами, которые, в свою очередь, имеют непосредственное отношение к зонам субаквальной разгрузки углеводородов [7, 8].

Целью экспедиционных работ 131 рейса НИС «Профессор Водяницкий» было получение новой сейсмоакустической информации, которая бы существенно дополнила данные, полученные в предыдущих рейсах, и позволила уточнить характер и последовательность геолого-геоморфологических процессов на шельфе и континентальном склоне Крыма в плейстоцене.

Второй (но не менее важной) задачей экспедиционных работ было развитие и совершенствование методологии и технологии инструментальных морских геофизических наблюдений для исследования физических полей, подводных объектов и экологии в гидросфере.

Материалы и методы исследования

В 131 рейсе научно-исследовательского судна (НИС) «Профессор Водяницкий» были проведены экспедиционные сейсмоакустические работы методом непрерывного сейсмического профилирования (НСП) на участке материковой окраины юго-восточного Крыма. Схема выполненных сейсмоакустических профилей представлена на рис. 1. Их общая протяженность составляет более 337 морских миль.

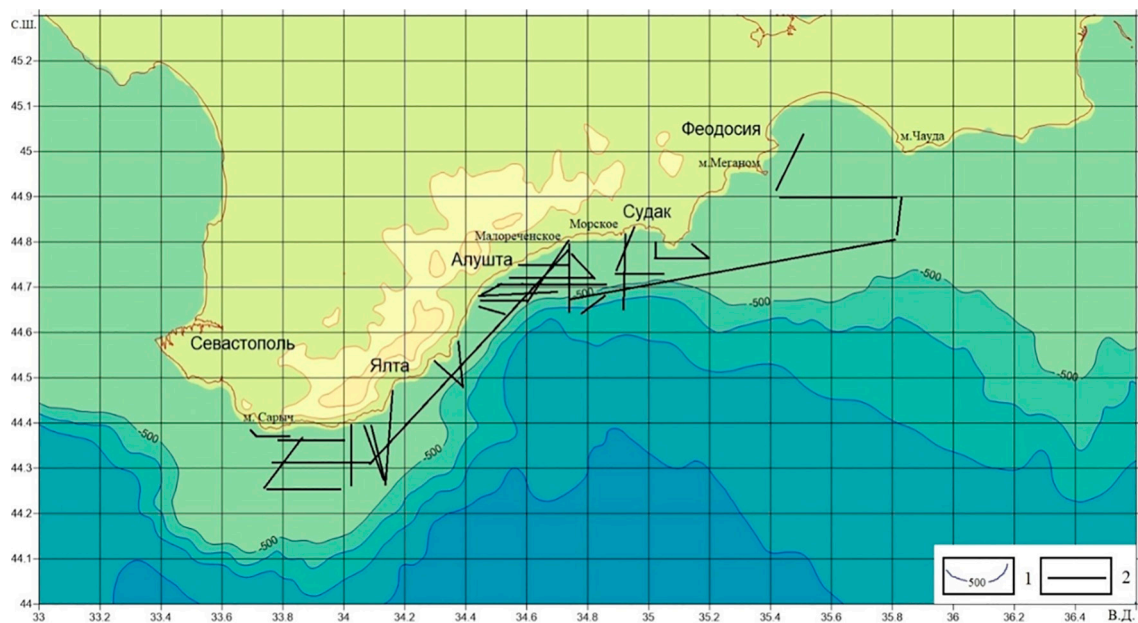


Рис. 1. Схема сейсмоакустических профилей 131 рейса НИС «Профессор Водяницкий»: 1 – изобаты; 2 – линии сейсмоакустических профилей

Метод НСП с применением электроискрового источника хорошо известен и неоднократно описан в литературе [2, 6], в том числе в виде, применяемом авторами в работах на НИС «Профессор Водяницкий» [3], поэтому нет нужды описывать его еще раз. Следует отметить, что условия проведения морских экспедиционных работ летом 2024 г. в прибрежных водах Крыма существенно отличались от условий работы, которые были ранее. Прежде всего, это относится к методике навигационного обеспечения исследований. Если раньше отсутствие корректного приема сигнала средствами космических навигационных систем (КНС) было редким исключением, то в 131 рейсе отсутствие навигационных данных от КНС стало скорее правилом. Это обстоятельство потребовало коренного изменения организации процесса фиксации навигационных данных.

В этих условиях пришлось проводить сбор навигационных данных силами двух отрядов. Отряд гидрофизики Морского гидрофизического института, имеющий большой опыт морских экспедиционных работ у побережья Крыма в современных условиях, собирал навигационные данные от целой группы стационарных и мобильных (носимых) приемников КНС, которые располагались в различных частях судна. Периодически (через 15 мин) производился обход судна для контроля функционирования приемников КНС с фотофиксацией показаний приемников, имеющих дисплей

с индикацией текущих данных. Данные с приемников КНС, не имеющих индикации текущих координат, получали по завершении работ в виде текстового файла с привязкой координат по времени. Так же сохранялся сбор данных судовой навигационной системы в гидрофизической и геофизических лабораториях.

В случаях, когда ни один из приемников КНС не давал достоверных координат, использовалась привязка пути судна методом обратных засечек, с помощью репитеров навигационного судового гирокомпаса, штатно установленных на крыльях мостика НИС «Профессор Водяницкий». Если видимость береговых ориентиров была недостаточной, то использовалась штатная навигационная радиолокационная станция (РЛС) MDC 7012P (при удалении судна от береговой линии). РЛС MDC 7012P работает на частоте 9410 МГц и снабжена антенной RW 701A-06 с горизонтальной поляризацией и углом охвата $1.2^\circ \times 22^\circ$ соответственно в вертикальной и горизонтальных плоскостях.

В этих условиях необходимым элементом навигационного обеспечения съемочных работ является ведение прокладки пути судна на рабочем планшете (навигационной карте). В 131 рейсе НИС «Профессор Водяницкий» для ведения прокладки пути судна и его архивирования авторами использовалась доступная программа Open CPN 5.2.4 с открытым доступом. Вид рабочего окна программы с примером прокладки выполненных галсов представлен на рис. 2.

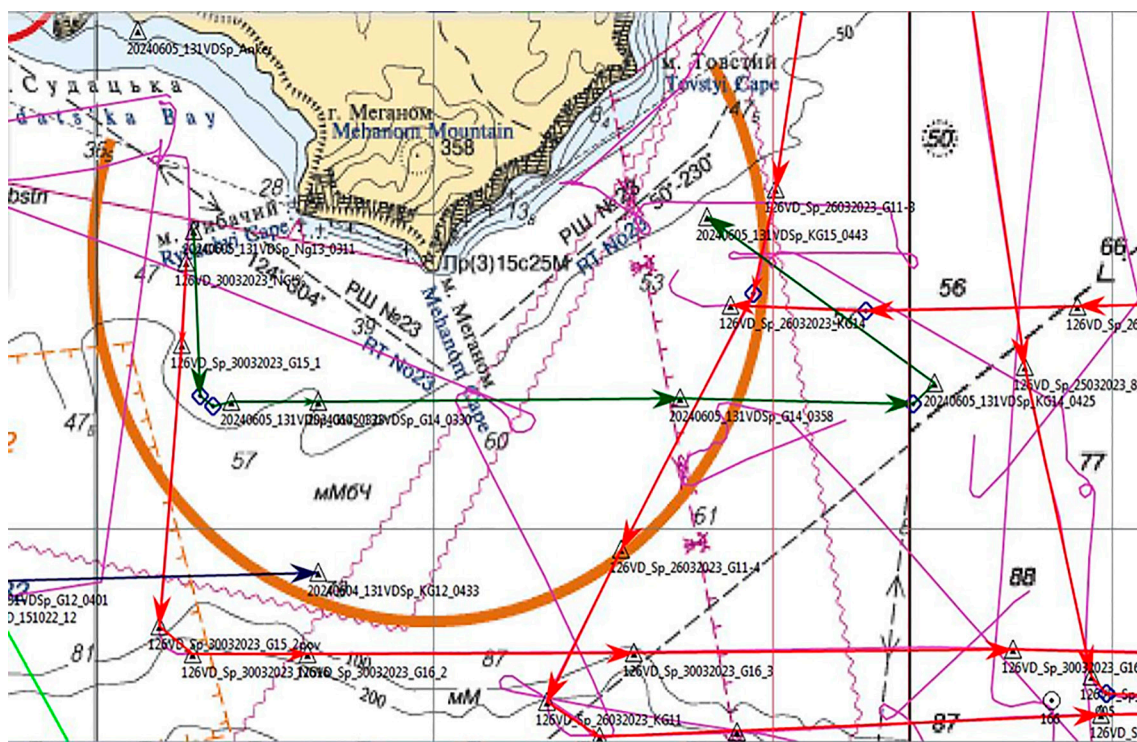


Рис. 2. Пример рабочей навигационной карты с построенной схемой расположения галсов 13–15, выполненных 05.06.2024 (темно-зеленый цвет) в районе м. Меганом. Красным цветом показаны профили, выполненные в предыдущих рейсах, фиолетовым – переходы судна с другими работами

Также возникла необходимость в коррекции вида профилей сейсмоакустического профилирования. В обычных условиях программа сбора и отображения данных выводит геофизический профиль вдоль верхней рамки которого указано время GMT и соответствующие ему координаты, полученные от приемника КНС. В случае если КНС не дает корректных данных, то на профиле будут отсутствовать координаты или они будут указаны неверно.

Для исправления этого недостатка был использован прием, известный в практике гидрографических работ прежних лет как «разноска координат». С помощью этого приема по эхограммам на бумаге определялись координаты характерных точек рельефа. Суть его заключается в интерполировании значений между известными точками определений. В нашем случае для каждого конкретного профиля вычислялись широта и долгота через определенные равные промежутки времени. Результаты этих вычислений наносились в виде соответствующих шкал на сейсмоакустические профили при постобработке данных в программе «Surfer».

На рис. 3 представлен один из полученных профилей с добавленными навигационными данными.

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе морских научных исследований на участке от м. Сарыч от м. Чауда, с использованием технологии НСП, подробно рассмотренной в работе [3], были получены материалы, характеризующие строение шельфа и континентального склона. С помощью комплекса САП «Геонт-Шельф» получен большой объем данных, уточняющий уже имеющиеся представления о рельефе дна и строении верхней плейстоцен-голоценовой части осадочной толщи [4, 9, 10]. На сейсмоакустических профилях, выполненных в виде замкнутых полигонов, нашли отражение следующие седиментационные и эрозионные формы:

- аккумулятивные береговые валы;
- прибрежные бары;
- отложения дельт;
- эрозионные врезы и каньоны;
- грязевулканические образования;
- оползневые тела;
- конуса выноса палеорек.

На профиле на широте п. Морское, в интервале 80–120 м, соответствующем верхнеплейстоценовым отложениям, отчетливо выделяются бугристые сейсмофазии высокоэнергетических русловых потоков.

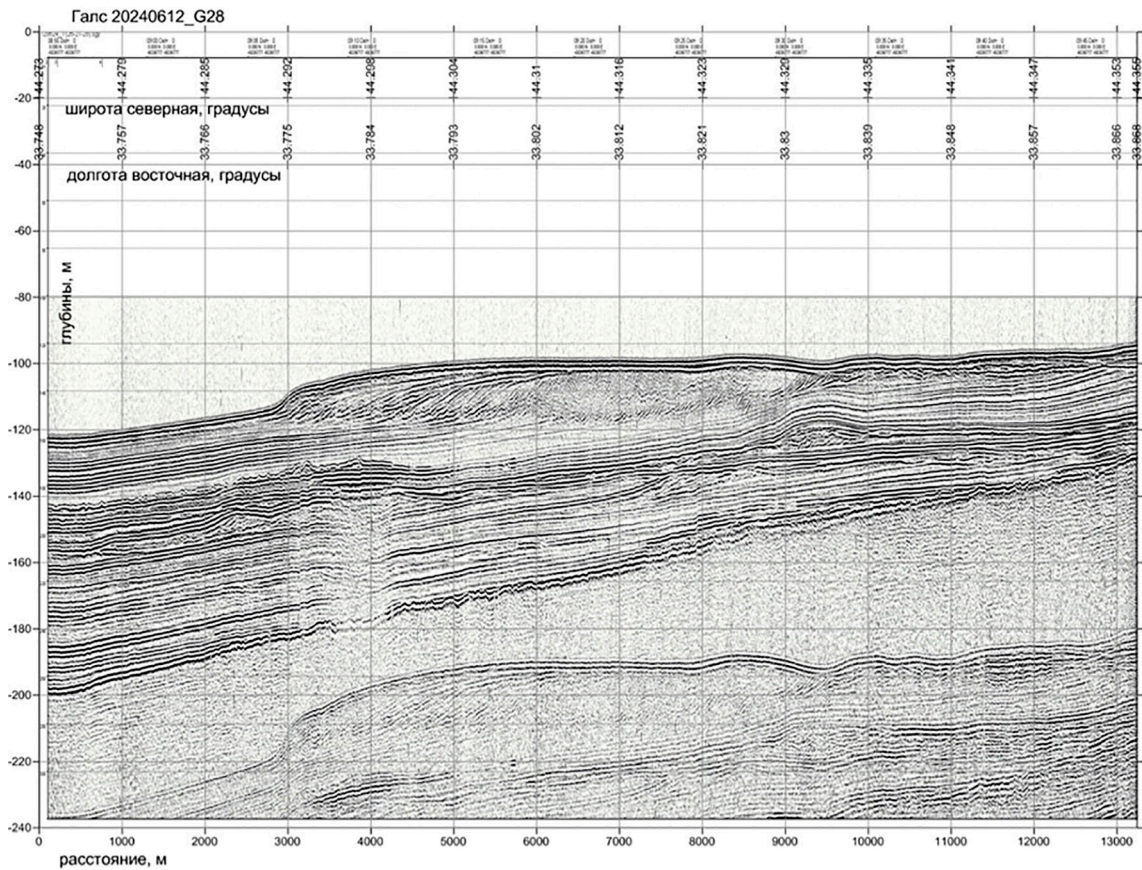


Рис. 3. Пример представления данных сейсмоакустического профилирования после технической постобработки

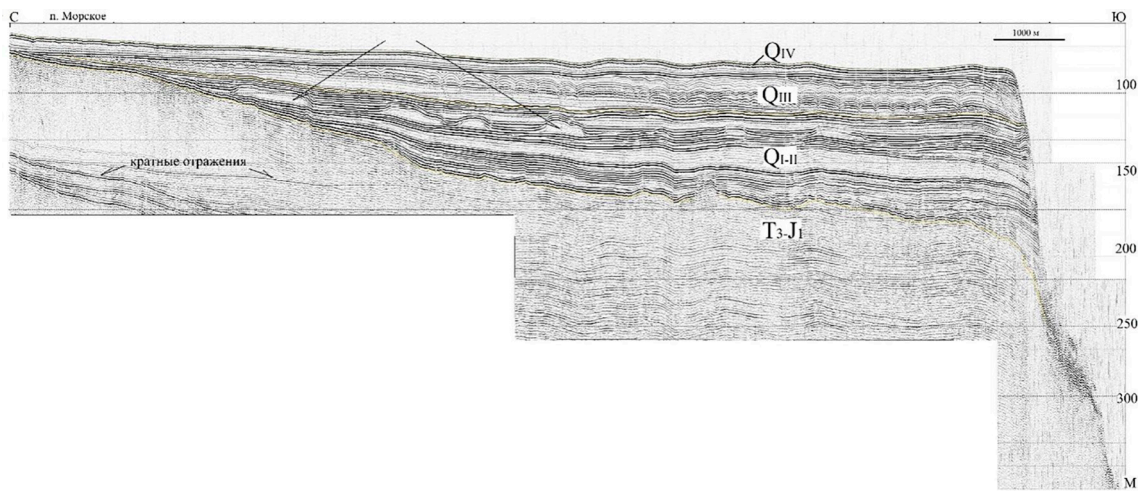


Рис. 4. Фрагмент сейсмоакустического разреза на трассе п. Морское

Ниже по разрезу, в интервале глубин 120–160 м, по характерной осветленной слабослоистой записи, выделяются песчаные скопления палеобаров, отлагавшихся в прибрежных районах среднеплейстоценового морского бассейна, что наглядно представлено на рисунке 4.

В интервале глубин 100–120 м выделяются погребенные формы берегового палеорельефа. В ходе развития голоценовой трансгрессии эти барьерные формы распались на ряд локальных аккумулятивных образований, которые представляют собой серию верхнеплейстоценовых береговых валов.

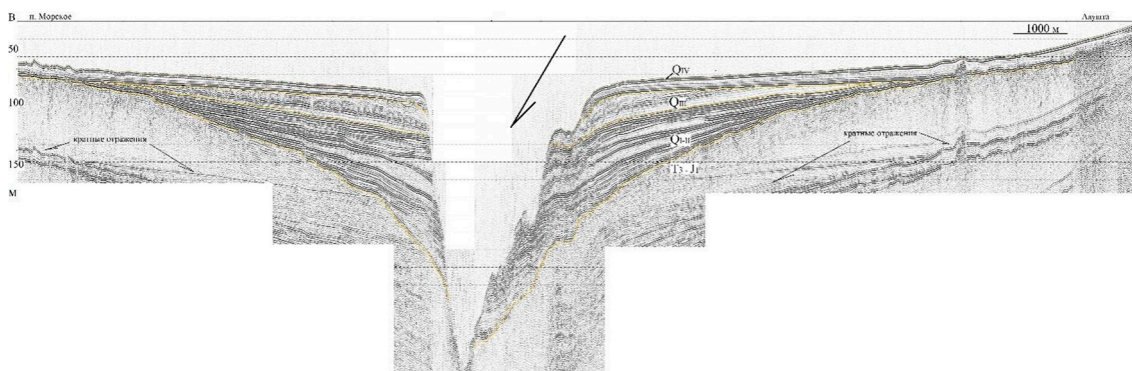


Рис. 5. Сейсмоакустический разрез по линии п. Морское – г. Алушта, пересекающий верховье каньона на трассе п. Малореченское

На широтных профилях зафиксированы сейсмокомплексы погребенных речных долин, переходящие в русла каньонов с разветвленными верховьями. Русла каньонов пересекают континентальный склон и далее переходят в русла глубоководных долин, направленных на юго-восток в абиссальную котловину (рис. 5).

Изучение особенностей погребенной гидрографической сети и устьевых участков рек Крымского побережья, впадающих в Черное море, позволяет предположить, что их эрозивно-аккумулятивная деятельность претерпела существенные изменения в условиях неоднократных климатических изменений уровня Черного моря за последние 17000–20000 лет. Эволюционную историю бассейна Черного моря от раннего плейстоцена до современности можно проследить по вертикальной смене сейсмических фаций [11]. Аккумулятивные клиноформенные образования соответствуют регрессивным эпохам. Непрерывные протяженные отражения характерны для трансгрессивных межледниковых эпох.

В районе исследования по данным эхолотного, акустического и сейсмоакустического профилирования выделяются участки с интенсивными газопроявлениями [6, 12, 13]. На профиле по линии Судакская бухта – мыс Меганом в прибрежной части выделяется обширный участок около 10 км со скоплением метана. Газовая залежь приурочена к придонным отложениям, предположительно верхнеплейстоценового возраста. Не исключено, что такие скопления образуются вследствие горизонтальной миграции вверх по восстанию слоев из песчаных палеодельтовых отложений. Такие же аномалии фиксируются и в других районах юго-восточного шельфа Крыма, общей численностью более 40 газопроявлений.

Заключение

В результате экспедиционных геофизических работ в юго-восточной части материковой окраины Крыма получен большой объем новых данных о геологическом строении этого района, а именно сейсмоакустические разрезы осадочной толщи и соответствующие им эхолотные профили рельефа дна шельфа и склона. Эти данные органическим образом дополняют данные, полученные авторами в предыдущих рейсах НИС «Профессор Водяницкий». Таким образом, получена новая детальная информация о морфологии рельефа дна и геологическом строении современного осадочного чехла материковой окраины полуострова Крым методами сейсмоакустического профилирования и эхолотирования. При этом продолжено совершенствование средств геофизических исследований на морском шельфе и методики их комплексного использования.

Выполненное сейсмоакустическое профилирование и эхолотирование позволило проследить некоторые ранее не известные особенности реликтовой гидрографической сети, уточнить существующие представления об изменении уровня Черного моря, генезисе и истории формирования заливов Крымского полуострова.

Авторы выражают благодарность морякам НИС «Профессор Водяницкий» и научному составу ИнБЮМ и МГИ за постоянную помощь в работе.

Список литературы

1. Мысливец В.И. Динамика геоморфологических процессов в западной части Южного берега Крыма и антропогенный фактор // Пространство и Время. 2014. № 2 (16). С. 244–253.
2. Мутовкин А.Д., Пронин А.А., Хортов А.В. Сейсмоакустические исследования плейстоцен-голоценовых отложений Крымско-Керченского шельфа // Геология морей

и океанов: Материалы XXIV международной научной конференции (школы) по морской геологии. 2022. С. 295–298. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(1).13.

3. Римский-Корсаков Н.А., Бурдиян Н.В., Пронин А.А., Мутовкин А.Д., Лесин А.В., Тихонова Н.Ф. Технология и результаты геолого-геофизических исследований в 116 рейсе НИС «Профессор Водяницкий» // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 11. С. 81–86. DOI: 10.17513/mjrfi.13317.

4. Хортов А.В., Римский-Корсаков Н.А., Пронин А.А., Мутовкин А.Д. Сейсмостратиграфические исследования крымского шельфа методом непрерывного сейсмоакустического профилирования // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 512, № 2. С. 295–301. DOI: 10.31857/S2686739723601023.

5. Есин Н.И., Ляпин А.А., Есин Н.В., Шлезингер А.Е. Метод расчета эвстатического хода уровня моря в голоцене по локальным кривым // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отделение геологии. 2014. Т. 89. Вып. 23. С. 52–60.

6. Гайнанов В.Г., Токарев М.Ю. Сейсмоакустические исследования при инженерных изысканиях на акваториях // Геофизика. № 3. 2018. С. 10–16.

7. Малахова Т.В., Малахова Л.В., Мурашова А.И., Будников А.А., Иванова И.Н., Краснова Е.А. Мониторинг мелководных сипов у мыса Фиолент (Черное море) // Океанология. 2023. Т. 63, № 1. С. 135–148. DOI: 10.31857/S0030157423010082.

8. Новиков И.С., Борисенко Д.А. Геоморфология и тектоника юго-западного Крыма // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 4. С. 498–513. DOI: 10.15372/GIG2019153.

9. Пасынков А.А., Вахрушев Б.А. Факторы и критерии морфоструктурного районирования и основные типы морфоструктур северо-запада Черного моря // Геоморфология. 2019. № 3. С. 68–82. DOI: 10.31857/S0435-42812019368-82.

10. Пасынкова Л.А. Каньоны континентального склона Черного моря. Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Серия «География». 2013. Т. 26 (65), № 3. С. 260–266.

11. Хлебникова О.А., Иванова А.А., Никишин А.М., Росляков А.Г., Старовойтов А.В. Анализ гравитационных отложений материкового склона и его подножия в северо-восточной части Черного моря // Вестник Московского университета. Серия «Геология». 2018. № 6. С. 29–36.

12. Шельтинг С.К., Шейков А.А., Прокопцева С.В. О механизмах формирования складчатости и грязевого вулканизма в прогибе Сорокина // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2023. Т. 8, № 3. С. 62–72. DOI: 10.51890/2587-7399-2023-8-3-62-72.

13. Подымов И.С., Подымова Т.М., Есин Н.В. Комплексные исследования геодинамической активности локальных территорий Азово-Черноморского побережья Краснодарского края и версии прогноза экстремальных ситуаций // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 31. С. 47–59. DOI: 10.22449/2413-5577-2020-1-47-59.

КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ

УДК 616.714.3-006.31-053.2

АНГИОМАТОЗ ОСНОВАНИЯ ЧЕРЕПА

¹Насыров М.В., ²Бакиева К.К.¹*Кыргызско-Российский Славянский университет, Бишкек, e-mail: nasurov_mv@mail.ru;*²*Кыргызская государственная медицинская академия имени И.К. Ахунбаева, Бишкек, e-mail: kalyska_92@mail.ru*

Данная работа посвящена достаточно редкой патологии – юношеской ангиофиброме основания черепа. Рассматривается нетривиальный клинический случай, когда имела место быть первично-множественная опухоль, а конкретно два не связанных между собой участка, патогистологически представляющие собой ангиофибром, по сему авторы сочли возможным и правильным озаглавить эту статью «Ангиоматоз основания черепа». Цель данного исследования – поделиться редким наблюдением наличия двух не связанных между собой опухолей, располагающихся в одной анатомической области на примере конкретного клинического случая. В данной работе коллектив авторов приводит редкий клинический случай из собственных наблюдений. В описываемом случае были использованы все принятые и доступные методы, обычно используемые для диагностики рассматриваемой патологии – эндоскопическое исследование полости носа и носоглотки, мультиспиральная компьютерная томография черепа и полное общеклиническое исследование, включающее консультацию гематолога и педиатра. Результаты получились нетривиальными, поскольку по ходу оперативного вмешательства были обнаружены два не связанных друг с другом новообразования, располагающиеся при этом в одной анатомической области и патогистологически представляющие собой ангиофибром. В итоге авторы рекомендуют не только проводить тщательное предоперационное обследование пациентов с ангиофибромой, но и проводить интраоперационную ревизию соседних анатомических областей, так как описываемый случай показывает, что при данном виде новообразований может иметь место первичная множественность.

Ключевые слова: ангиоматоз черепа, метастаз, доброкачественная опухоль, новообразования, томография

ANGIOMATOSIS OF THE BASE OF THE SKULL

¹Nasyrov M.V., ²Bakieva K.K.¹*Kyrgyz-Russian Slavic University, Department of Otorhinolaryngology, Bishkek, e-mail: nasurov_mv@mail.ru;*²*Kyrgyz State Medical Academy named after I.K. Akhunbaev, Bishkek, e-mail: kalyska_92@mail.ru*

This work is devoted to a rather rare pathology – juvenile angiofibroma of the base of the skull. The team of authors cites a non-trivial clinical case where there was a primary multiple tumor, specifically two unrelated areas that pathohistologically represent an angiofibroma, therefore the authors considered it possible and correct to title this article as angiomatosis of the base of the skull. The purpose of this publication was the desire of the authors, using the example of a specific clinical case, to share a rare observation of the presence of two unrelated tumors located in the same anatomical area. As for the research materials, in this paper, the team of authors cites a rare clinical case from their own observations. Of the research methods in the described case, all accepted and available methods were used that are commonly used to diagnose the pathology in question – endoscopic examination of the nasal cavity and nasopharynx, multispiral computed tomography of the skull and a complete general clinical examination, including consultation with a hematologist and pediatrician. The results, according to the authors, are not trivial, since during the surgical intervention two unrelated neoplasms were found, located in the same anatomical area and pathohistologically representing an angiofibroma. As a conclusion, the team of authors recommends not only conducting thorough preoperative examinations of patients with angiofibroma, but also conducting an intraoperative revision of neighboring anatomical areas, since the described case shows that primary multiplicity may occur with this type of neoplasm.

Keywords: angiomatosis of the skull, metastasis, benign tumor, neoplasms, tomography

Введение

Ювенильная ангиофиброма основания черепа (ЮАОЧ), тяжелейшая патология человека, остается актуальной проблемой и по сегодняшний день. Несмотря на множество работ по этой проблеме, а ею занимались и занимаются не только оториноларингологи, но и онкологи, нейрохирурги, генетики, иммунологи, педиатры, есть еще много вопросов к ее возникновению, поло-

вой принадлежности, возрастным особенностям, методам диагностики и лечения. Окончательно гистогенез ангиофибромы остается неясным [1, с. 38; 2, с. 77]. Ее происхождение связывается как с мезенхимальными, так и примордиальными остатками хорды черепа периода раннего эмбриогенеза. Источником роста, вероятнее всего, являются комбиальные элементы волокнистого хряща первого и второго шейных позвонков или глоточно-базальной фасции

[2, с. 76; 3]. Работы авторов статьи [3, с. 66; 4] по изучению типов юношеских ангиофибром основания черепа с применением гистогамм и гистохимических исследований показали, что встречаются два вида ангиофибром – клеточный и сосудисто-фиброзный тип. Первый тип – наиболее редкий, не более 6–8 %, второй – доминирующий.

Подростковый возраст, нарушение носового дыхания, рецидивирующие спонтанные носовые кровотечения и наличие объемного образования являются характерными для ЮАОЧ [4, с. 75].

Комплекс диагностических мероприятий, необходимых для подтверждения ЮАОЧ, следующий: эндоскопия, рентгеномография зон носоглотки, компьютерная томография (КТ), магнитно-резонансная томография (МРТ), ангиография, биопсия из ткани опухоли. По ряду причин взятие биопсии из ткани опухоли не представляется возможным из-за технических трудностей. Тогда дополнительные методы диагностики и характерные симптомы ЮАОЧ дают возможность для проведения адекватного лечения этого опухолевого процесса. Хотя следует отметить, что наиболее достоверной является гистологическая верификация, достигающая 85 % достоверности [5, с. 25; 6, с. 94].

Касательно тактики лечения ЮАОЧ можно рассмотреть исторические моменты, в частности склерозирующую терапию. Наиболее распространенным стало введение в опухоль 96 % спирта, что, вероятно, могло привести к склерозированию стенок сосудов, или же 1 % раствора формалина. Однако эти методы практически не приводили к эффекту во время проведения операции и не снижали кровопотерю при классических методах удаления ангиофибромы [7, с. 70]. Оценивая склеротическую терапию, следует отнести ее к неэффективным, и, более того, она удлиняет саму предоперационную подготовку. Безусловный же приоритет в лечении ЮАОЧ остается за хирургическим лечением, несмотря на ряд недостатков с нарушением целостности анатомической структуры лицевого скелета и основании черепа, а также возрастные анатомические особенности пациентов детского возраста.

О том, что опухоль характерна исключительно для лиц мужского пола, утверждается во многих трудах [7, с. 71; 8, с. 26]. Тем не менее столь категоричное утверждение не гарантирует полноты истины. Данные, полученные авторами за последние 6 лет, показали, что под наблюдением авторов имели место 3 случая ангиофибромы у лиц женского пола (44, 40, 11 лет). У данных лиц ангиофиброма выявлена и под-

тверждена как до операции, так и исследованием макропрепарата удаленной опухоли, подвергнутого гистологической и гистохимической верификации.

Современная технология в хирургии претерпела значительную тактико-функциональную особенность и эффективность, повышая как доказательность объемного процесса, его распространенность, структурную характеристику, так и малотравматичность самой операции, не нарушая принципов абластики, так как ЮАОЧ характеризуется близостью локализации к особо важным и опасным анатомическим структурам, таким как зрительный перекрест, глаза и головной мозг [9, с. 188]. В то же время классические подходы к основанию черепа при обширных опухолевых процессах в 3 и 4 стадиях ангиофибромы [9], на взгляд авторов, более предпочтительны, так как позволяют визуально контролировать ход операции при достаточных доступах к новообразованию, следовательно, избегать большой кровопотери и сокращать процесс удаления ангиофибромы.

Нижеприведенный редкий случай хотелось бы описать на примере клинического наблюдения из практики авторов данной статьи, когда авторы столкнулись с двумя не связанными между собой физически опухолями, располагающимися, однако, в одной анатомической области и гистологически полностью идентичны. А также обратить внимание на подобные случаи для более тщательного погружения в причины возникновения подобной патологии.

Цель исследования – на конкретном клиническом случае показать диагностическую значимость не связанных между собой опухолей, располагающихся в одной анатомической области и с одинаковой гистологической картиной.

Материалы и методы исследования

Клиническое наблюдение

Следует отметить, что родители пациента дали согласие на публикацию материалов, касающихся приводимого клинического случая.

Пациент К.А., 2011 года рождения, находился на стационарном лечении в ЛОР отделении Национального госпиталя при МЗ Кыргызской Республики, с 10.09.2024 по 02.10.24 с клиническим диагнозом «Юношеская ангиофиброма основания черепа и носоглотки. Носовое кровотечение. Постгеморрагическая анемия 2 степени».

Жалобы при поступлении: на носовые кровотечения, полное отсутствие носового дыхания, общую слабость, гнусавость, нарушение речи по типу заикания.

Из анамнеза: со слов родителей ребенок на протяжении 1 года страдает нарушением носового дыхания, а также гнойно-воспалительными заболеваниями, такими как гайморит, этмоидит, аденоидит, в связи с чем пациент проходил длительное терапевтическое лечение по поводу них. В последний раз неделю назад была попытка диагностической и лечебной пункции гайморовой пазухи слева, которая спровоцировала массивное носовое кровотечение, пациент в экстренном порядке был госпитализирован в районную больницу по месту жительства, произведена передняя тампонада полости носа, в связи с продолжением носового кровотечения на следующий день ребенок по линии санавиации доставлен в ЛОР отделение Национального госпиталя при МЗ Кыргызской Республики.

На момент поступления общее состояние пациента средней тяжести, кожные покровы и видимые слизистые бледной окраски. При внешнем осмотре лицо одутловатое, местами в зоне скуловой, подглазничной области слева имеются гематомы. При передней риноскопии: в левой половине носа геморрагические корки, после удаления слизистая оболочка розовая, носовые ходы сужены, справа аналогичная картина.

При эндоскопии полости носа носовая полость в заднем отделе полностью обтурирована неопластической тканью белесоватой окраски (рис. 1), плотной консистенции, занимающей всю хоану. При зондировании образование кровоточит, на широком основании, малоподвижная.

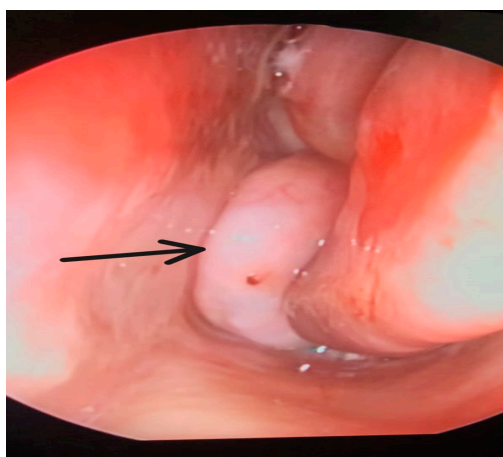


Рис. 1. Эндоскопическая картина левой половины полости носа

При орофарингоскопии: рот открывается свободно, язык по срединной линии, задняя стенка глотки зернистая, боковые валики слегка утолщены, мягкое и твердое небо

без признаков деформации, гортань без видимой патологии.

Показатели периферического анализа крови при поступлении (10.09.2024): гемоглобин – 93; эритроциты – 2,6; тромбоциты – 249; цветной показатель – 0,87; гематокрит – 30; лейкоциты – 6,0; эозинофилы – 4,4; нейтрофилы – 58,5, лимфоциты – 29,7, моноциты – 7,4, СОЭ – 39, ПТИ – 85,5 %; ПТВ – 16,2.

Пациенту назначен весь спектр необходимых обследований, а также консультации гематолога, педиатра, назначена гемокорректирующая трансфузионная терапия и подготовка к дальнейшему оперативному вмешательству, показатели дополнительных общеклинических обследований были в пределах возрастных физиологических норм. Проведена мультиспиральная компьютерная томография (МСКТ) придаточных пазух носа в день поступления, и на основании характерных клиничко-рентгенологических данных установлен клинический диагноз: ювенильная ангиофиброма носоглотки и основании черепа (рис. 2, 3).

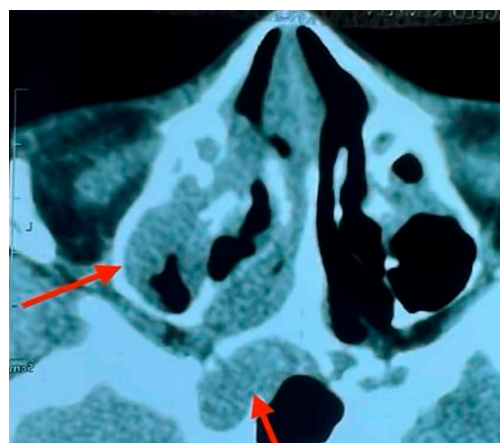


Рис. 2. МСКТ во фронтальной плоскости

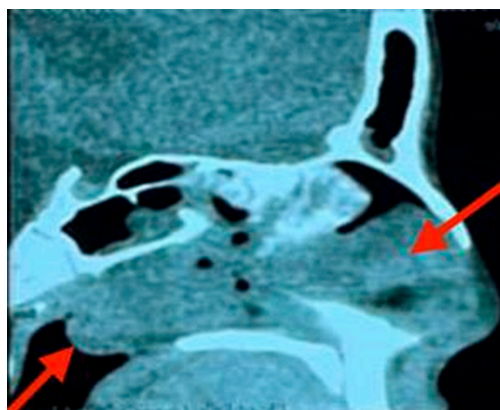


Рис. 3. МСКТ в сагиттальной плоскости

МСКТ-картина от 10.09.24. В носоглотке, больше слева, а также в полости носа и передне-левой части основной пазухи определяется остеодеструктивное, гетерогенное солидное объемное образование, КТ-плотностью до +48 ед. Н., без четких контуров и границ, размером около 50x35 мм в поперечнике. Костная часть носовой перегородки истончена по типу атрофии от давления, смещена вправо. Определяется деструкция передней стенки основной пазухи слева. Глоточно-базиллярная фасция не прослеживается.

Результаты исследования и их обсуждение

По данным различных источников, частота развития рецидивов ЮАОЧ после хирургического этапа лечения варьируется от 3 до 35 % [9].

Ангиофиброма занимала базальный отдел носоглотки и клеток решетчатого лабиринта слева с прорастанием в левую половину носа и смещением задних отделов носовой перегородки (рис. 1–3). Предварительно из толщи опухоли была произведена биопсия, сопровождающаяся обильным кровотечением, остановленным тугой тампонадой. Патогистологический результат – ангиофиброма. Пациент повторно получил консультацию педиатра и гематолога, выполнено комплексное обследование: коагулограмма, общий анализ крови, общий анализ мочи, биохимические анализы крови, УЗИ внутренних органов и щитовидной железы, рентген органов грудной клетки, электрокардиограмма, по данным которого выявлена значительная положительная динамика постгеморрагической анемии в течение 10 дней и показатели крови нормализовались после инфузионного восполнения железа следующим образом: (22.09.2024): гемоглобин – 118 г/л; эритроциты – $3,6 \cdot 10^{12}/л$; тромбоциты – $316 \cdot 10^9/л$; СОЭ – 19 мм/ч, ПТИ – 95,5 %; ПТВ – 18,2 с.

После получения результата патогистологического исследования под общим интубационным наркозом больному произведена перевязка НСА с обеих сторон. Затем с челюстно-лицевым подходом слева и резекцией, а также ампутацией медиальной стенки гайморовой пазухи создан доступ к новообразованию (рис. 4). Основная пазуха является очаговой точкой для подходов к области, расположенной между зрительным нервом и внутренней сонной артерией. Границы операционного поля простираются от лобной пазухи до уровня турецкого седла до яремного отверстия. С помощью системы распаторов опухоль полностью была удалена.



Рис. 4. Внешний вид больного на пятые сутки после операции

Для обеспечения оптимального зрительного контроля операционного поля во время хирургических вмешательств периодически проводятся орошение раневой полости физиологическим раствором натрия хлорида и аспирация содержимого раны. При эндоскопическом осмотре операционной полости признаков остатка неудаленной опухоли нет. Однако осмотр основной пазухи показал, что в зоне правой ее стенки, частично разрушенной, определяется шаровидной формы опухоль, совершенно не связанная с новообразованием, удаленным из базально-решетчатой области. Последняя была с осторожностью вылучена, так как она интимно соприкасалась с правой внутренней сонной артерией. Для создания механического давления с кровоостанавливающей целью операционная полость была обложена гемостатической губкой и затампонирована. Общая кровопотеря всей операции составила 490 мл, что было возмещено интраоперационным введением эритроцитарной массы и свежезамороженной плазмы. Операция прошла без осложнений, состояние пациента после операции стабильное. В послеоперационном периоде назначен строгий постельный режим, проводилась антибактериальная и гемостатическая терапия. Однако на третьи сутки после хирургического вмешательства из серьезных нежелательных явлений наблюдался острый дакриоцистит, который проявлялся припухлостью внутреннего угла глаз и век слева, слезотечением, пациенту назначено необходимое лечение офтальмологом, и все разрешилось без последствий в течение

недели. Тампон из операционной полости удален на пятые сутки с предварительным орошением, полость носа орошают 0,9 % физиологическим раствором натрия хлорида. С седьмого дня лечения после операции пациент стал отмечать улучшение самочувствия: незначительное облегчение носового дыхания, появление густого слизистого отделяемого из носа и субъективное улучшение. В дальнейшем пациент мужского пола после снятия швов на коже в хорошем состоянии выписан домой. Рассасывание гемостатических материалов в раневой полости составляет примерно от 1 до 5 месяцев, и в течение данного времени под контролем эндоскопа послеоперационная рана периодически подлежит очищению полости носа от раневого отделяемого и геморрагических корочек. Патогистологический препарат удаленных опухолей показал результат – ангиофиброма.

Авторы впервые за много лет встретились с подобным случаем, а за этот период произведено 87 операций по удалению ангиофибромы основания черепа. Из них 9 операций эндоскопическим способом подхода к ЮАОЧ через естественные пути (стадия распространения опухоли была 2 ст. по В.С. Погосову). Остальные операции осуществлялись с помощью наружных доступов. В процессе исследования оценивали не только непосредственные результаты проведенного хирургического вмешательства, но и отдаленные последствия [9].

Заключение

Приведенный клинический случай показывает, что в области носоглотки и зоны основания черепа могут иметь место несколько не связанных друг с другом опухолей одинакового генеза. И только тщательный эндоскопический и визуальный контроль позволит радикально осуществить удаление патологического процесса без инвали-

дизирующих осложнений в случае ранней или своевременной диагностики, несмотря на труднодоступность детального визуального обозрения топографической зоны.

Список литературы

1. Насыров В.А., Миненков Г.О., Нуркеев Н.Б., Турапова Ж.М. Компьютерно-томографические особенности остеодеструкции при злокачественных опухолях и мукоцеле верхнечелюстных пазух // Детская оториноларингология. 2021. № 4. С. 37–40.
2. Насыров В.А., Исаев В.А. Хирургическое лечение сфеноидитов // Вестник Кыргызской государственной медицинской академии имени И.К. Ахунбаева. 2010. № 2. С. 75–79.
3. Белов И.Ю., Примак Н.А., Самочерных Н.К., Чижова К.А., Курносоев И.А., Чеботарев С.Я., Гуляев Д.А. Устранение дефектов средней зоны лица после хирургического лечения распространенных опухолей основания черепа // Опухоли головы и шеи. 2023. Т. 13, № 4. С. 65–72.
4. Халмурзаев М.М., Ешиев А.М., Насыров В.А. Исследование и оптимизация лечения детей с врожденными расщелинами губы и неба: анализ сопутствующих заболеваний и комплексный подход в челюстно-лицевой хирургии // Вестник Биомедицина и социология. 2023. Т. 8, № 4. С. 73–78.
5. Насыров М.В., Насыров В.А., Каримова Б.К., Бакиева К.К. Челюстно-лицевые доступы при новообразованиях носоглотки и основания черепа в 21 веке. Необходимость или анахронизм? На примере юношеской ангиофибромы основания черепа у 15-летнего пациента // Детская оториноларингология. 2021. № 4. С. 24–27.
6. Грачев Н.С., Ворожцов И.Н., Зябкин И.В. Использование метода транспозиции верхней челюсти в хирургическом лечении местнораспространенной ювенильной ангиофибромы основания черепа // Вестник оториноларингологии. 2022. Т. 87, № 1. С. 91–93.
7. Исмаилова А.З., Мустапаева Ж.Ш., Абдылдаев К.Б. Эффективность применения различных доз элементарного железа при лечении железодефицитной анемии у детей до 5 лет // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2021. № 3. С. 69–72.
8. Насыров В.А., Исламов И.М., Миненков Г.О. Некоторые КТ-особенности доброкачественных новообразований челюстно-лицевой области и их роль в выборе метода хирургического лечения // Вестник Кыргызской государственной медицинской академии имени И.К. Ахунбаева. 2019. № 2. С. 26–32.
9. Капитанов Д.Н., Лопатин А.С. Юношеская ангиофиброма основания черепа. М., 2023. 212 с.

КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ

УДК 616.5

КЛИНИЧЕСКИЙ СЛУЧАЙ ИНФИЛЬТРАТИВНО-НАГНОИТЕЛЬНОЙ ТРИХОФИТИИ ОБЛАСТИ БОРОДЫ

Хисматуллина З.Р., Гиниятова И.В., Корешкова К.М.

ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет»

Министерства здравоохранения Российской Федерации, Уфа,

e-mail: hzr07@mail.ru, detki78@mail.ru, saitik16@yandex.ru

Цель – изучить особенности течения и лечения поздно диагностированной инфильтративно-нагноительной трихофитии, вызванной сочетанной флорой – *Trichophyton verrucosum* и *Staphylococcus aureus*. Был обследован пациент 45 лет, работник сельской ветеринарной службы, в течение 14 дней находящийся под наблюдением в отделении круглосуточного стационара государственного бюджетного учреждения здравоохранения «Республиканский кожно-венерологический диспансер» (г. Уфа). Были проведены сбор жалоб и анамнеза, физикальное обследование, микроскопическое и культуральное исследования с определением чувствительности выделенного вида гриба к антимикотикам, системное и наружное лечение. При обследовании в пораженном участке кожи были обнаружены выраженная инфильтрация, множественные фолликулы с гнойным содержимым, увеличение регионарных лимфатических узлов, явления общей интоксикации, при микроскопии – мицелий гриба и кокковая флора в большом количестве, по результатам культурального посева – *Trichophyton verrucosum*, чувствительный к гризеофульвину. Проведенное лечение привело к улучшению общего состояния и регрессу клинических проявлений в виде стойкой алопеции. Отмечено, что вовремя проведенная диагностика трихофитии является важной составляющей снижения заболеваемости и распространения данной дерматофитии среди людей и животных, сокращения случаев возникновения запущенных форм, уменьшения возникновения косметических дефектов после лечения и сохранения качества жизни.

Ключевые слова: инфильтративно-нагноительная трихофития, зооантропофильные грибы, *Trichophyton*, дерматофития, гризеофульвин

A CLINICAL CASE OF INFILTRATIVE-SUPPURATIVE TRICHOPHYTOSIS OF THE BEARD AREA

Khismatullina Z.R., Giniyatova I.V., Koreshkova K.M.

Bashkir State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Ufa,

e-mail: hzr07@mail.ru, detki78@mail.ru, saitik16@yandex.ru

Aim to study the features of the course and treatment of late diagnosed infiltrative-suppurative trichophytosis caused by combined flora *Trichophyton verrucosum* and *Staphylococcus aureus*. A 45-year-old patient, an employee of the village veterinary service, was examined. He had been under observation for 14 days in the inpatient department of the state budgetary health care institution “Republican dermatovenereological dispensary” in Ufa. Complaints and anamnesis were collected, physical examination, microscopic and cultural studies were performed to determine the sensitivity of the isolated fungus to antimycotics, and systemic and external treatment was carried out. Examination of the affected skin area revealed pronounced infiltration, multiple folliculitis with pus, enlarged lymph nodes, and general intoxication, microscopy revealed a mycelium and coccal flora, and culture study – a *Trichophyton verrucosum* sensitive to griseofulvin. The treatment resulted in an improvement in the general condition and regression of symptoms in the form of alopecia. Timely diagnosis of trichophytosis is an important component of reducing the incidence of this dermatophytosis among humans and animals, reducing the incidence of complications, reducing the occurrence of cosmetic defects after treatment and maintaining the quality of life.

Keywords: infiltrative-suppurative trichophytosis, zooanthrophilic fungi, *Trichophyton*, dermatophytosis, griseofulvin

Введение

Трихофития относится к группе дерматофитий (грибковых заболеваний кожи и ее придатков, вызванных грибами родов *Trichophyton*, *Microsporum* или *Epidermophyton*). Непосредственной причиной трихофитии служат многочисленные грибы рода *Trichophyton* – *Trich. violaceum*, *Trich. tonsurans*, *Trich. mentagrophytes var. gypseum* и *Trich. verrucosum* и др., где первые два паразитируют на коже и ее придатках у человека, а последние три – на коже и ее придатках человека и животных, обуславливая

перекрестную передачу возбудителя [1]. Трихофития клинически подразделяется на поверхностную форму, характеризующуюся появлением одного или нескольких шелушащихся пятен, хроническую форму, характеризующуюся появлением нескольких нечетких шелушащихся пятен с обламыванием волос, и инфильтративно-нагноительную форму, для которой характерны выраженная инфильтрация пораженной кожи, присоединение вторичной инфекции, появление пустул с отделением гноя и наложением гнойных корок, развитие вторичных высыпаний (аллергидов), явления общей

интоксикации [2]. Иногда инфильтраты становятся массивными, захватывают большие участки кожи (например, во время бритья или растирания мочалкой) [2]. Инфильтративно-нагноительная трихофития является глубокой дерматофитией, поэтому при ее излечении наблюдается стойкое выпадение волос в очаге и/или развитие рубцовой атрофии, что является необратимым осложнением заболевания и тянет за собой формирование соответствующих психоэмоциональных переживаний [3].

Эпидемиологическое значение грибов *Trichophyton* в развитии дерматофитий. В Российской Федерации наиболее высокую распространенность в структуре дерматофитий в последние годы занимает микоз стоп и кистей (до 67 %), в то время как микроспория и трихофития встречаются реже (26,3 % и 0,74 % соответственно) [4]. Однако именно трихофития склонна к развитию инфильтративно-нагноительной формы, в связи с чем изучению ее возбудителей (в основном *Trich. gypseum*, *Trich. verrucosum*, иногда – *Trich. equinum*, *Trich. redellii* и *Trich. simii*, паразитирующие у лошадей, ежей и домашней птицы) на сегодняшний день уделяется особое внимание [5]. Это связано с неуклонным ростом новых случаев заболевания и следующими факторами: постепенное развитие клиники, напоминающей ряд других дерматозов (розовый лишай Жибера, псориаз, пиодермию, фолликулит Гоффмана и др.), из-за чего многие пациенты могут длительно лечиться самостоятельно и не обращаться за помощью; поздняя обращаемость и верификация диагноза, зачастую на этапе присоединения гноеродной кокковой флоры; нерациональная терапия – использование антибактериальных мазей вместо противогрибковых, самостоятельный прием антибиотиков, использование только местных антисептиков, что, в свою очередь, приводит не только к осложнениям и последующему снижению качества жизни больных, но и к снижению производительности сельского хозяйства [6, 7]. Особое значение в эпидемиологии трихофитий является то, что пациенты зачастую обращаются за медицинской помощью лишь в запущенных случаях, спустя несколько недель или даже месяцев от начала заболевания, самостоятельно выступая переносчиками патогенных грибов среди контактных лиц – не только других людей, но и животных [8]. В статье описывается клинический случай, где позднее обращение за медицинской помощью, диагностические ошибки на ранних этапах ведения пациента и поздняя верификация диагноза привели к развитию инфильтративно-

нагноительной трихофитии у мужчины 45 лет, работающего врачом-ветеринаром в сельской местности и контактирующего с большим количеством сельскохозяйственных, животных.

Цель исследования – изучить особенности течения и лечения поздно диагностированной инфильтративно-нагноительной трихофитии, вызванной сочетанной флорой – *Trichophyton verrucosum* и *Staphylococcus aureus*.

Материалы и методы исследования

Наблюдение проводилось проспективно в течение 14 дней на базе государственного бюджетного учреждения здравоохранения «Республиканский кожно-венерологический диспансер» г. Уфа (ГБУЗ РКВД). Для диагностики заболевания были использованы стандартные методы, рекомендованные Федеральными клиническими рекомендациями – микроскопическое исследование на грибы, культуральный посев, общие клинические анализы крови и мочи, общий биохимический скрининг [2].

Результаты исследования и их обсуждение

Больной К., 45 лет, проживает в сельской местности (в Баймакском районе республики Башкортостан), по профессии – ветеринар, обратился в ГБУЗ РКВД г. Уфы по направлению участкового дерматовенеролога в районной поликлинике 25 марта 2024 г. с жалобами на наличие болезненного отечного очага поражения в области роста щетинистых волос на шее справа, на болезненность при разговоре, жевании, движениях головой, а также слабость, недомогание, снижение аппетита и увеличение температуры тела до 38,5 °С.

Из анамнеза известно, что считает себя больным в течение последних двух месяцев (с начала февраля 2024 г.), когда в области шеи справа появились зуд, шелушение и умеренное покраснение. Неделю назад до появления высыпаний помогал принимать роды у лошади на территории чужого хозяйства, где отметил у нее сходные повреждения гладкой кожи в области гривы, но не связал их наличие с возможным контактированием с животным, опасным для человека. Сам пациент отмечает, что также содержит личное хозяйство, куда входят крупный рогатый скот, а также собаки и кошки. После работы контактировал с животными из своего хозяйства и с другими животными и людьми своего населенного пункта.

Через неделю после контакта начал отмечать наличие округлых эритематозных пятен и белесоватых чешуек на поверхно-

сти шеи справа без выраженных субъективных проявлений (слегка беспокоил эпизодический зуд, лихорадки и изменения общего состояния не наблюдал). Решив, что поражение кожи имеет аллергический характер, начал принимать внутрь антигистаминные препараты (цетиризин 10 мг 1 раз в сутки не каждый день) в течение недели. Во время самостоятельного лечения посещал баню, доил корову.

После безуспешного самостоятельного лечения больной обратился к фельдшеру по месту жительства, где ему был выставлен предварительный диагноз «фолликулит» и назначена комбинированная антибактериальная мазь (в 1 г хлорамфеникол 10 мг, сульфадиметоксин 40 мг, метилурацил 40 мг, тримекаина гидрохлорид 30 мг) дважды в сутки на очаг, которой пациент пользовался в течение двух недель (непостоянно). Отметил, что эффективность мази заметил в первые сутки от начала применения, но впоследствии мазь, с его слов, «перестала действовать», очаг медленно увеличивался в размере, отмечался зуд, вследствие чего пациент расчесывал кожу. К концу третьей недели самолечения заметил появление эритематозной сыпи на коже у домашней коровы, которую обрабатывал той же мазью и местным антисептиком (раствором фурацилина).

На четвертой неделе заболевания отправился к дерматовенерологу в поликлинику по месту жительства, где был поставлен предварительный диагноз: простой раздражительный контактный дерматит, осложненный пиодермией. Было назначено системное лечение: метронидазол в таблетках по 500 мг 2 раза в сутки в течение недели, а также наружное: комбинированный крем (гентамицина сульфат 1,0 мг,

декспантенол 50,0 мг, мометазона фураат 0,5 мг, эконазола нитрат 10,0 мг) 2 раза в сутки в течение 3 недель (до предполагаемого заживления очага). О противоэпидемических мероприятиях в очаге пациент предупрежден не был, продолжал посещать баню, контактировать с животными, также самостоятельно начал использовать ультрафиолетовую лампу вечером 1 раз в сутки примерно по 15 мин.

Через неделю от начала последней назначенной терапии пациент К., не заметив эффекта от лечения (на коже со слов появилась «заметная плотность», болезненность при движении головой), вновь обратился на прием, где было принято решение об альтернативном лечении: цефтриаксон 1,0 мл внутримышечно 1 раз в сутки в течение 10 дней, наружно – комплексная мазь (бетаметазона дипропионат 0,643 мг, гентамицина сульфат 1,69 мг, клотримазол 10 мг) 2 раза в сутки в течение 2 недель. Была взята кровь для проведения общеклинического анализа крови (11.03.2024 г.) (табл. 1).

На фоне проводимого лечения состояние больного ухудшалось: отмечалось усиление гиперемии и увеличение инфильтрации в очаге, нарастание болезненности в области шеи справа с ограничением объема движений головы, появилась слабость. По общему анализу крови отмечались ускорение СОЭ, умеренный лейкоцитоз. Пациент К. снова обратился на прием к дерматовенерологу по месту жительства 21 марта 2024 г., откуда его направили в ГБУЗ РКВД г. Уфа (поступил 25 марта 2024 г.). В день поступления пациент К. был госпитализирован в микологическое отделение ГБУЗ РКВД с предварительным диагнозом «Инфильтративно-нагноительная трихофития бороды».

Таблица 1

Результаты первого лабораторного исследования пациента К.

Общий анализ крови		Общий анализ крови	
Показатель	Результаты	Показатель	Результаты
Эритроциты, $\times 10^{12}/л$	4,2	Базофилы, %	0
Гемоглобин, г/л	135	Эозинофилы, %	0
Гематокрит	0,64	Моноциты, %	7
Цветной показатель	1,0	Лимфоциты, %	28
Тромбоциты, $\times 10^9/л$	243	Нейтрофилы, %	63
Лейкоциты, $\times 10^9/л$	9,4	Палочкоядерные, %	2
СОЭ, мм/ч	15		

Примечание: СОЭ – скорость оседания эритроцитов, л – литр, мм/ч – миллиметров в час, рН – водородный показатель кислотности водных растворов, п.з. – поле зрения.

Status localis. На момент осмотра при поступлении в области сонного треугольника шеи отмечалось наличие множественных фолликулитов на гиперемизированном фоне, соединяющихся в один массивный неравномерно бугристый инфильтрат неправильной формы размерами 10x7 см, синюшно-красного цвета с четкими границами, обильным мокнутием и гнойными корками. При удалении корок из расширенных пор сально-волосяных фолликулов отделялся гной, который после высыхания склеивал отросшие щетинистые волосы области бороды (рис. 1). Волосы с легкостью извлекались пинцетом. При пальпации наблюдалось увеличение и болезненность лимфатических узлов с правой стороны (околоушных, поднижнечелюстных, шейных), они были подвижны и не спаяны с подлежащими тканями. Общее состояние больного было тяжелым: наблюдалось повышение температуры тела до 38,5 °С, слабость, недомогание, потеря аппетита.



Рис. 1. Пациент К. до лечения
Примечание. В области бороды видны множественные пустулы на гиперемизированном инфильтрированном основании с кровянисто-гнойным содержимым, обилие гнойных корок

Лабораторное обследование

Повторно были взяты кровь и моча для общих клинических анализов крови и мочи и биохимического скрининга (табл. 2).

Таблица 2

Результаты лабораторного исследования пациента К. при поступлении

Общий анализ крови		Общий анализ мочи	
Показатель	Результаты	Показатель	Результаты
Эритроциты, $\times 10^{12}/л$	4,1	Прозрачность	прозрачная
Гемоглобин, г/л	132	Цвет	желтый
Гематокрит	0,63	Плотность	1,020
Цветной показатель	0,9	рН	5,4
Тромбоциты, $\times 10^9/л$	247	Белок	отрицательно
Лейкоциты, $\times 10^9/л$	11,2	Глюкоза	отрицательно
Базофилы, %	0	Кетоны	отрицательно
Эозинофилы, %	1	Слизь	+
Моноциты, %	4	Эритроциты	0–1 в п.з.
Лимфоциты, %	23	Лейкоциты	0–1–2 в п.з.
Нейтрофилы, %	69	Биохимический анализ крови	
Палочкоядерные, %	3	Общий белок, г/л	68
СОЭ, мм/ч	17	Общий билирубин, мкмоль/л	8,8
КСР		АЛТ, Ед/л	20
A ₁	Отр.	АСТ, Ед/л	21
A ₂	Отр.	Мочевина, ммоль/л	4,3
МР	Отр.	Креатинин, мкмоль/л	61
		Глюкоза, ммоль/л	4,5
		Холестерин, ммоль/л	4,4

Примечание. СОЭ – скорость оседания эритроцитов, л – литр, мм/ч – миллиметров в час, ммоль/л – миллимоль на литр, мкмоль/л – микромоль на литр, рН – водородный показатель, п.з. – поле зрения, КСР – комплекс серологических реакций

Таблица 3

Результаты микроскопического исследования волос пациента К.

Показатель	Результат
Кокки	<i>Staph. aureus</i>
Дрожжеподобные грибы	Отр.
Грибы	<i>Ectothrix megasporae</i>
<i>Demodex</i>	–
<i>Malassezia</i> spp.	–

Примечание: *Staphylococcus aureus* – золотистый стафилококк, *Demodex* – клещи рода Демодекс, *Malassezia* spp. – дрожжеподобные грибы рода Малассезия.

С очага поражения были взяты волосы на микроскопическое исследование, а также был проведен соскоб из очага для бактериологического исследования (табл. 3). При микроскопии были обнаружены скопления грибов *Ectothrix megasporae* (снаружи волоса), а также кокковая флора в большом количестве.

На основании собранного анамнеза, осмотра и лабораторных данных был установлен основной клинический диагноз: инфильтративно-нагноительная трихофития области бороды. Осложнение: фолликулит. При исследовании на чувствительность к антимикотикам через 2 недели после посева была обнаружена высокая чувствительность гриба *Trichophyton verrucosum* (что позволило верифицировать диагноз) к системному антимикотику гризеофульвину, а также к тербинафину (табл. 4). Бактериологическое исследование проводилось на питательной среде (стандартная агаризованная среда Сабуро с добавлением антибиотиков).

Лечение было комплексным, с учетом того, что пациент ранее безуспешно применял комбинированные топические пре-

параты, содержащие антимикотик либо антибиотик, а также без эффекта получал системную антибактериальную терапию антибиотиком из группы цефалоспоринов. В качестве противогрибкового препарата с учетом чувствительности, а также показателей аминотрансфераз в сыворотке крови был выбран гризеофульвин в дозе 12,5 мг/кг/сут внутрь в три приема с ложкой растительного масла в течение 28 дней до исчезновения клинических проявлений и до третьего отрицательного результата микроскопии с очага. Одновременно для подавления кокковой флоры пациент принимал азитромицин 500 мг 1 раз в сутки 6 дней и в качестве десенсибилизирующего препарата – хлоропирамин 25 мг 1 раз в сутки вечером 7 дней. В составе наружной терапии были использованы серно-дегтярная мазь (10 % и 5 % соответственно) вечером, 3 % спиртовая настойка йода утром на область поражения, а также сбривание волос один раз в неделю. В конце лечения у пациента сформировался участок рубцовой атрофии со стойким облысением (рис. 2).

Далее пациент находился на диспансерном наблюдении по месту жительства в течение трех месяцев с проведением соответствующих противоэпидемических мероприятий в очаге (дезинфекция, лечение животных).

В развитии инфильтративно-нагноительной формы трихофитии лежит множество патогенетических факторов, среди которых выделяют длительное течение заболевания, отсутствие адекватной санации очага, присоединение кокковой флоры и др. [9]. Данные факторы усугубления тяжести процесса наблюдались и у данного пациента, что способствовало не только более длительному лечению, но и было опасным в эпидемиологическом отношении, так как трихофития относится к высококонтагиозным заболеваниям [9].

Таблица 4

Спектр чувствительности к антимикотикам грибковой культуры *Trichophyton verrucosum* у пациента К.

Показатель	Результат	Чувствительность	Микроорганизм
<i>Trichophyton rubrum</i>	Не обнаружен	Показатель	<i>Trich. verrucosum</i>
<i>Trichophyton interdigitale</i>	Не обнаружен	Кетоконазол	R/S
<i>Trichophyton verrucosum</i>	Обнаружен	Флуконазол	R
<i>Trichophyton violaceum</i>	Не обнаружен	Итраконазол	R/S
<i>Trichophyton tonsurans</i>	Не обнаружен	Тербинафин	S
<i>Microsporum gypseum</i>	Не обнаружен	Клотримазол	R/S
<i>Microsporum ferrugineum</i>	Не обнаружен	Гризеофульвин	S
<i>Microsporum canis</i>	Не обнаружен	Амфотерицин В	R

Примечание: R – резистентность, S – чувствительность, R/S – умеренная резистентность.



*Рис. 2. Пациент К.
к концу третьей недели лечения
Примечание. Значительное уменьшение
инфильтрации, прекращение отделения гноя,
отсутствие новых пустул, остаточные корки*

Известно, что воспалению глубоких слоев дермы и подкожной клетчатки, развитию фолликулярных пустул могут способствовать также и кокковая, и дрожжевая флора, что создает значительные трудности в дифференциальной диагностике, так как клиническая картина, обусловленная пиококковой флорой и различными родами грибов, может быть очень сходной, особенно при длительном течении заболевания [10]. В таких случаях уточнение этиологического фактора напрямую связано с рационально подобранным лечением с учетом чувствительности к препаратам, с адекватными противоэпидемическими мероприятиями и назначением дополнительной терапии – антибиотиков, десенсибилизирующих средств [10].

Заключение

Благодаря данному наблюдению расширяется понимание клинического многообразия инфильтративно-нагноительной трихофитии, вызванной сочетанной флорой – зооантропофильными грибами и золотистым стафилококком, подчеркивается значение своевременного подтверждения диагноза – не только для начала терапии, но и для профилактики возникновения новых случаев трихофитии, снижения количества косметических дефектов на коже, предупреждения распространения инфекции в очаге. При отсутствии эффекта от лечения

системными антибактериальными препаратами и комбинированными топическими средствами, как в данном наблюдении, следует задуматься о наличии у больного грибковой или смешанной грибково-бактериальной инфекции.

Конфликт интересов. Авторы не сообщают о конфликте интересов.

Список литературы

1. Медведева Т.В., Леина Л.М., Петунова Я.Г., Чилина Г.А., Пчелин И.М. Антропонозная трихофития: представление об этиологии, эпидемиологии, дифференциальном диагнозе. Клинические случаи и обзор литературы // Успехи медицинской микологии. 2021. Т. 23. С. 29–37. DOI: 10.24412/1999-6780-2021-3-29-37.
2. Российское общество дерматовенерологов и косметологов. Микозы кистей, стоп и туловища. Федеральные клинические рекомендации, Москва, 2013 г. (электронный документ). URL: <https://diseases.medelement.com/disease/микозы-кистей-стоп-и-туловища-рекомендации-рф/15238> (дата обращения: 27.10.2024).
3. Уфимцева М.А., Антонова С.Б., Струин С.Б., Бочкарев Ю.М., Шубина А.С. Инфильтративно-нагноительная микроспория у детей 7 и 9 лет. Клинические случаи // Современные проблемы науки и образования. 2016. № 3. С. 125. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=24704> (дата обращения: 27.10.2024).
4. Огрызко Е.В., Шевченко А.Г., Иванова М.А. Динамика заболеваемости дерматофитиями в Российской Федерации за 2005–2020 гг. // Социальные аспекты здоровья населения. 2023. № 69 (3). С. 3. DOI: 10.21045/2071-5021-2023-69-3-3.
5. Хисматуллина З.Р., Альхашаш Субхи М.С. Клинический случай распространенной нагноительной формы зооантропонозной трихофитии // Проблемы медицинской микологии. 2019. Т. 21, № 4. С. 34–35. DOI: 10.24412/1999-6780-2019-4-34-35.
6. Хисматуллина З.Р., Альхашаш Субхи М.С. К вопросу о клиническом многообразии зооантропофильной трихофитии волосистой части головы // Современные проблемы науки и образования. 2020. № 3. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=29853> (дата обращения: 27.11.2024). DOI: 10.17513/spno.29853.
7. Хисматуллина З.Р., Альхашаш Субхи М.С., Айдыбаева М.Г., Дагхамин Исмаил Х.М. Клинические проявления зооантропонозной трихофитии // Современные проблемы науки и образования. 2020. № 5. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=30186> (дата обращения: 27.11.2024). DOI: 10.17513/spno.30186.
8. Nenoff P., Kruger C., Ginter-Hanselmayer G., Tiets H.-J. Mycology – an update. Part 1: Dermatofungi: Causative agents, epidemiology and pathogenesis // Journal der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft. 2014 Mar 17. № 12 (3). P. 188–209. DOI: 10.1111/ddg.12245.
9. Новиков Ю.А., Зубарева Е.Ю., Лекавичус И.Ю., Митрофанов А.С., Андреева Е.К. Клинический случай зоонозной трихофитии у взрослой женщины: ошибка диагностики // Фарматека. 2021. № 8. DOI: 10.18565/pharmateca.2021.8.162-165.
10. Антонова С.Б., Уфимцева М.А., Голубкова А.А., Косова А.А. Риск-ориентированный подход к профилактике дерматомикозов в современных условиях (по материалам обследования пациентов г. Екатеринбурга // Проблемы медицинской микологии. 2020. Т. 22, № 2. С. 32–36. DOI: 10.24412/1999-6780-2020-2-32-36.

СТАТЬИ

УДК 532.5:537.311.1:546.2

**ЛАГРАНЖЕВА ФУНКЦИЯ И ДИНАМИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ
В ДВОЙНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ СЛОЕ: ВЛИЯНИЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ВОДЫ С ПРИМЕСЯМИ****¹Ибраимов Т.К., ²Сатыбалдиев А.Б., ¹Ташполотов Ы.***¹Ошский государственный университет, Ош,
e-mail: t.kailbekovich@mail.ru, itashpolotov@mail.ru;**²Ошский технологический университет, Ош,
e-mail: A.Baatyrbekovich@gmail.commailto:t.kailbekovich@mail.ru*

В настоящей работе рассматривается влияние электрического поля на динамику кристаллизации в двойном электрическом слое водных растворов с примесями. Основное внимание уделяется применению функции Лагранжа для описания взаимодействий между молекулами воды и ионами в присутствии электрического поля. Цель исследования заключается в анализе механизмов, управляющих процессами кристаллизации, агрегации и поляризации молекул в условиях двойного электрического слоя, а также в выявлении факторов, способствующих образованию микрокристаллов нерастворимых соединений на поверхности анода. Введение в тему подчеркивает значимость электрических полей для изменения скорости и механизма кристаллизации, а также роль примесей в этом процессе. На основе анализа существующих научных статей выявлены ключевые аспекты, такие как локализованное образование кристаллов, сильное влияние электрического поля и агрегационные процессы, которые отличают рассматриваемую динамику от традиционных кристаллизационных процессов. Работа включает математическое описание системы с использованием уравнений Пуассона и Нернста – Планка, что позволяет глубже понять динамику ионных процессов в двойном электрическом слое. Результаты показывают, что кристаллизация в двойном электрическом слое происходит при высоких концентрациях ионов и сильном электрическом поле, что создает уникальные условия для формирования микрокристаллов. Таким образом, исследование динамики кристаллизации в двойном электрическом слое важно для различных областей науки и техники, позволяя управлять свойствами материалов на основе контроля процесса кристаллизации.

Ключевые слова: двойной электрический слой, электрическое поле, динамика кристаллизации, функция Лагранжа, водные растворы, примеси, агрегация, поляризация молекул, микрокристаллы, уравнения Пуассона, уравнения Нернста – Планка, электрохимия

**LAGRANGIAN FUNCTION AND DYNAMICS OF CRYSTALLIZATION
IN A DOUBLE ELECTRIC LAYER: THE EFFECT
OF AN ELECTRIC FIELD ON IMPURITY WATERS****¹Ibraimov T.K., ²Satybaldiev A.B., ¹Tashpolotov Y.***¹Osh State University, Osh, e-mail: t.kailbekovich@mail.ru, itashpolotov@mail.ru;**²Osh Technological University, Osh, e-mail: A.Baatyrbekovich@gmail.com*

This work examines the influence of electric fields on the dynamics of crystallization in the double electric layer of aqueous solutions with impurities. The main focus is on the application of the Lagrange function to describe the interactions between water molecules and ions in the presence of an electric field. The aim of the study is to analyze the mechanisms governing the processes of crystallization, aggregation, and polarization of molecules under double electric layer conditions, as well as to identify the factors that contribute to the formation of microcrystals of insoluble compounds on the anode surface. The introduction to the topic emphasizes the significance of electric fields in altering the rate and mechanism of crystallization, as well as the role of impurities in this process. Based on the analysis of existing scientific articles, key aspects have been identified, such as localized crystal formation, the strong influence of electric fields, and aggregation processes, which distinguish the dynamics under consideration from traditional crystallization processes. The work includes a mathematical description of the system using the Poisson and Nernst-Planck equations, allowing for a deeper understanding of ionic dynamics in the double electric layer. The results show that crystallization in the double electric layer occurs at high ion concentrations and strong electric fields, creating unique conditions for the formation of microcrystals. Thus, the study of the dynamics of crystallization in the double electric layer is important for various fields of science and technology, allowing for the management of material properties based on the control of the crystallization process.

Keywords: double electric layer, electric field, crystallization dynamics, Lagrange function, aqueous solutions, impurities, aggregation, polarization of molecules, microcrystals, Poisson equations, Nernst – Planck equations, electrochemistry

Введение

В [1] исследуется, как электрические поля влияют на скорость и механизм кристаллизации в водных растворах. Авторы

используют экспериментальные данные и численные модели для демонстрации значительного ускорения кристаллизации при определенных условиях электрическо-

го поля. В работе [2] рассматривается влияние примесей на процессы электрокристаллизации. Авторы показывают, что наличие различных ионов может значительно изменять морфологию кристаллов и их свойства, что имеет важные последствия для материаловедения. В [3] изучены влияния электрического поля на рост кристаллов в загрязненной воде. Они проводят эксперименты с различными концентрациями примесей и фиксируют изменения в структуре и размерах кристаллов, что может быть полезно для очистки воды. Работа [4] исследует двойной электрический слой и его роль в кристаллизации. Авторы обсуждают теоретические аспекты взаимодействия между частицами и электрическими полями, что помогает понять механизмы кристаллизации в ионных растворах. В статье [5] рассматривается зависимость скорости кристаллизации от силы электрического поля. Авторы используют кинетические модели для описания процессов и делают выводы об оптимальных условиях для ускорения кристаллизации. Статья [6] предлагает молекулярный взгляд на динамику кристаллизации под воздействием электрических полей. Авторы используют молекулярно-динамическое моделирование для анализа взаимодействий на уровне атомов, что позволяет глубже понять механизмы, лежащие в основе кристаллизации. На основе анализа научных статей можно сделать следующие общие выводы:

– Все статьи подчеркивают значительное влияние электрических полей на процессы кристаллизации, что может быть использовано для управления свойствами материалов.

– Примеси играют ключевую роль в изменении динамики кристаллизации, что важно для разработки технологий очистки и синтеза новых материалов.

– Комбинация экспериментальных и теоретических подходов позволяет получить более полное представление о процессах кристаллизации.

Исходя из анализа научных статей последних лет, целью данной научной работы является исследование влияния электрического поля на динамику кристаллизации в двойном электрическом слое (ДЭС) водных растворов с примесями, комбинируя теоретические и экспериментальные подходы к настоящему исследованию.

Как известно [7, с. 68–70; 8, с. 57–60], функция Лагранжа описывает взаимодействие электрического поля с молекулами воды с примесями. Для вывода уравнения движения молекул воды с примесями в электрическом поле, рассмотрим систему

с учетом функции Лагранжа. Предположим, что молекулы воды ориентируются вдоль электрического поля из-за их дипольного момента.

Постановка задачи

1. *Двойной электрический слой:* ДЭС состоит из слоя адсорбированных ионов на поверхности анода и противоположно заряженных ионов в растворе. В данном случае ДЭС можно рассматривать как два слоя заряда: один у поверхности анода и другой в растворе.

2. *Энергия взаимодействия между ионами и молекулами примесей:* Ионы и примеси взаимодействуют друг с другом и с электрическим полем, создавая условия для агрегации.

3. *Кинетическая энергия:* Ионы и молекулы примесей обладают кинетической энергией из-за теплового движения.

В такой постановке задачи функция Лагранжа должна учитывать кинетическую энергию, электростатическую энергию, а также потенциальную энергию взаимодействия ионов и молекул примесей:

Кинетическая энергия T:

$$T = \sum (1/2)m_i v_i^2, \quad (1)$$

где m_i – масса i -го иона или молекулы, а v_i – его скорость.

Потенциальная энергия электрического поля U: Электрическое поле E между анодом и катодом создает потенциальную энергию для ионов и молекул примесей:

$$U = \sum q_i \phi(x_i), \quad (2)$$

где q_i – заряд i -го иона или молекулы, а $\phi(x_i)$ – электрический потенциал в точке x_i . В ДЭС электрический потенциал $\phi(x)$ изменяется вблизи анода, создавая зону накопления зарядов и агрегации.

Энергия агрегации W: Агрегация ионов и молекул примесей в ДЭС может быть описана потенциальной энергией взаимодействия, зависящей от расстояния между частицами. Предположим, что взаимодействие можно представить в виде суммы кулоновского взаимодействия и короткодействующего потенциала агрегации, $V_{agg}(r_{ij})$ между частицами i и j :

$$W = \sum \left(\frac{K_e q_i q_j}{r_{ij}} + V_{agg}(r_{ij}) \right), \quad (3)$$

где k_e – электростатическая постоянная, r_{ij} – расстояние между частицами i и j , а $V_{agg}(r_{ij})$ описывает энергию притяжения между частицами на коротких расстояниях, что способствует агрегации в ДЭС.

Таким образом, функция Лагранжа для рассматриваемой системы может быть записана в виде

$$L = T - U - W. \quad (4)$$

Подставляя формулы (1)–(3) в (4), получим выражение для функции Лагранжа:

$$L = \sum \frac{1}{2} m_i v_i^2 - \sum q_i \phi(x_i) - \sum_{i < j} \left(\frac{k_e q_i q_j}{r_{ij}} + V_{agg}(r_{ij}) \right). \quad (5)$$

Функция Лагранжа (5) описывает динамику ионов и примесей в электродинамической системе, где электрическое поле между электродами, а также агрегационные силы в ДЭС влияют на движение ионов и их взаимодействие. В результате можно использовать уравнения Лагранжа для получения уравнений движения, которые покажут, как заряженные частицы перемещаются, поляризуются и агломерируются под воздействием электрического поля и сил агрегации. Данная модель поможет проанализировать механизмы накопления ионов в ДЭС и их влияние на общую структуру и динамику системы.

Рассмотрим уравнение Пуассона для описания распределения электрического потенциала в межэлектродной среде с распределением заряда. В данном случае уравнение Пуассона можно использовать для моделирования потенциала вблизи анода, где находится двойной электрический слой (ДЭС).

Уравнение Пуассона записывается в виде

$$\frac{d^2 \phi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon}, \quad (6)$$

где $\phi(x)$ – электрический потенциал; $\rho(x)$ – объемная плотность заряда; ε – диэлектрическая проницаемость воды с примесями.

Для этой задачи введем граничные условия, соответствующие ситуации с ДЭС.

Граничные условия на электродах:

– пусть $x = 0$ – это анод (находится в точке $\phi = \phi_0$);

– пусть $x = l$ – это катод (находится в точке $\phi = 0$).

Тогда граничные условия для потенциала:

$$\phi(0) = \phi_0 \text{ и } \phi(l) = 0.$$

Плотность заряда $\rho(x)$ в двойном электрическом слое моделируем как быстро убывающую функцию от x , например экспоненциальную функцию, которая описывает распределение ионов:

$$\rho(x) = \rho_0 e^{-x/\lambda}, \quad (7)$$

где ρ_0 – максимальная плотность заряда у поверхности анода, а λ – характеристическая длина слоя (например, дебаевская длина).

Подставляя функцию (7) для $\rho(x)$ в уравнение Пуассона (6), получим

$$\frac{d^2 \phi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho_0 e^{-\frac{x}{\lambda}}}{\varepsilon}. \quad (8)$$

Решение уравнения Пуассона

Решим уравнение (8) методом интегрирования:

Интегрируем по x и определим $d\phi / dx$:

$$\frac{d\phi}{dx} = -\frac{\rho_0 \lambda}{\varepsilon} e^{-\frac{x}{\lambda}} + C_1, \quad (9)$$

где C_1 – константа интегрирования.

Интегрируем второй раз по x , чтобы найти $\phi(x)$:

$$\phi(x) = \frac{\rho_0 \lambda^2}{\varepsilon} e^{-\frac{x}{\lambda}} + C_1 x + C_2, \quad (10)$$

где C_2 – еще одна константа интегрирования.

Теперь для нахождения C_1 и C_2 используем граничные условия, а именно:

при $x = 0$, $\phi(0) = \phi_0$, тогда имеем

$$\phi_0 = \frac{\rho_0 \lambda^2}{\varepsilon} + C_2.$$

Из полученного равенства найдем C_2 :

$$C_2 = \phi_0 - \frac{\rho_0 \lambda^2}{\varepsilon}. \quad (11)$$

При $x = l$ $\phi(l) = 0$ из уравнения (10) получим

$$0 = \frac{\rho_0 \lambda^2}{\varepsilon} e^{-\frac{l}{\lambda}} + C_1 l + \left(\phi_0 - \frac{\rho_0 \lambda^2}{\varepsilon} \right).$$

Решив это уравнение относительно C_1 , имеем

$$C_1 = -\frac{\rho_0 \lambda^2}{\varepsilon} \left(1 - e^{-\frac{l}{\lambda}} \right) + \phi_0 l. \quad (12)$$

Подставив (11) и (12) в (10), окончательно получим

$$\phi(x) = \frac{\rho_0 \lambda^2}{\varepsilon} e^{\left(\frac{x}{\lambda}\right)} - \frac{\rho_0 \lambda^2}{\varepsilon} \left\{ \left(1 - e^{\left(\frac{l}{\lambda}\right)} + \phi_0\right) x + \phi_0 - \frac{\rho_0 \lambda^2}{\varepsilon} \right\}. \quad (13)$$

Решение (13) описывает распределение электрического потенциала $\phi(x)$ в пространстве между анодом и катодом с учетом образования двойного электрического слоя в окрестности анода. Функция экспоненциального затухания $e^{(-x/\lambda)}$ описывает влияние плотности заряда вблизи анода, а линейная зависимость от x обусловлена градиентом потенциала между электродами.

Динамика процессов внутри двойного электрического слоя (ДЭС) в окрестности анода является сложным процессом взаимодействия между электрическим полем, ионной концентрацией и переносом вещества.

Рассмотрим основные стадии и механизмы, которые влияют на формирование и поведение ДЭС:

1. Формирование двойного электрического слоя

Двойной электрический слой состоит из двух зон:

- *Слой адсорбированных ионов* на поверхности анода, которые обладают противоположным зарядом относительно электрода (прямая контактная область).

- *Диффузионный слой* – область распределения противоположно заряженных ионов в электролите, которая простирается на некоторое расстояние от электрода. Этот слой часто описывается как Гельмгольцевский двойной слой и диффузионный слой Гуи – Чепмена.

При подаче напряжения на анод ионы противоположного заряда притягиваются к его поверхности, формируя компактный слой (в первую очередь из-за электростатического притяжения). Противоположные по заряду ионы в электролите образуют диффузный слой вокруг анода, который компенсирует заряд анода, создавая зону электрического равновесия.

2. Электростатическое взаимодействие и ионная концентрация

Внутри ДЭС создается градиент электрического потенциала. Потенциал резко убывает в контактном слое, а затем медленно уменьшается в диффузионном слое.

Из-за электростатического притяжения концентрация ионов противоположного заряда значительно возрастает вблизи анода. При этом концентрация ионов с тем же знаком, что и анод, уменьшается из-за отталкивания. Это создает локальный дисбаланс ионной концентрации внутри ДЭС.

Под действием электрического поля положительно заряженные ионы движут-

ся к катоду, а отрицательные – к аноду, но вблизи анода их скорость движения замедляется из-за увеличенной концентрации ионов противоположного заряда.

Концентрационный градиент в ДЭС также вызывает диффузию ионов, стремящихся выровнять свою концентрацию. Диффузионный поток направлен от области высокой концентрации (у поверхности анода) к области с меньшей концентрацией (вглубь раствора).

Хотя в идеальном случае конвекция мала в пределах ДЭС, реальные эффекты, такие как тепловая конвекция из-за нагрева, могут оказывать влияние. Конвекция может усилить перенос массы и заряда в пределах слоя.

3. Агрегация ионов и молекул в ДЭС

Ионы противоположного знака, находящиеся вблизи поверхности анода, могут притягиваться друг к другу и образовывать агрегаты, особенно при высокой концентрации ионов. Агрегация ионов усиливается из-за ограниченного объема в ДЭС и сильного электрического поля.

В зависимости от состава раствора и присутствия хлоридов или других примесей ионы анода могут взаимодействовать с другими ионами, образуя нерастворимые соединения. Например, ионы меди и серебра (эксперименты проводили с электродами из меди и серебра) могут образовывать осадки с хлоридами. Эти осадки часто остаются в пределах ДЭС, поскольку они осаждаются на поверхности анода.

В условиях постоянного напряжения ДЭС достигает стационарного состояния, в котором происходит баланс между притоком новых ионов, миграцией, диффузией и осаждением агрегатов.

В стационарном состоянии поток положительных ионов из раствора к аноду компенсируется осаждением ионов или их реакцией на поверхности анода. Это приводит к поддержанию постоянной концентрации заряда в слое, несмотря на постоянный обмен частиц с раствором.

Материалы и методы исследования

Экспериментальная часть

В качестве среды использовалась питьевая вода, содержащая ионы: HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} . Концентрация SO_4^{2-} составляла 50 мг/л. Для создания электрического поля использовались медные электроды (10 см × 2 см).

Массовое количество осажденного $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ от E и d

№	Напряжение, U, В	Напряженность электрического поля E, В/см	Расстояние, d (см)	Масса $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (г)
1.	23,5	11,76	2,0	0,88
2.	24,5	6,13	4,0	0,66
3.	25,5	4,25	6,0	0,48
3.	26,5	3,31	8,0	0,39
4.	27,5	3,06	9,0	0,32
5.	29,0	2,90	10,0	0,29

Результаты исследования и их обсуждение

На электроды подавалось напряжение от 1 до 27 В. Расстояние между электродами изменялось в пределах 1–5 см. Измерения напряжения проводились на основе стандартного потенциометрического метода. Масса образовавшегося $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ определялась гравиметрическим методом, а состав полученного вещества – рентгенофазовым анализом (РФА). Количество осажденного медного купороса, полученное в экспериментах, наглядно представлено в таблице.

Из таблицы видно, что масса осажденного вещества ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) меняется в зависимости от напряжения, силы электрического поля и расстояния между электродами. Самое большое количество осажденного $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (0,88 г) получается при максимальной величине электрического поля (11,76 В/см). Это подтверждает, что увеличение силы поля помогает лучше осаждать вещество. Также есть прямая связь: чем выше сила электрического поля, тем больше масса осажденного вещества. Когда расстояние между электродами с 2,0 до 10,0 см, увеличивается снижение массы осажденного вещества. Это может быть связано с тем, что при большем расстоянии сила, действующая на ионы, уменьшается, что затрудняет их осаждение. Таким образом наблюдается прямая зависимость между напряженностью электрического поля и массой осажденного $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$: чем выше напряженность, тем больше масса осажденного вещества, а увеличение расстояния между электродами приводит к уменьшению массы осажденного вещества, что указывает на обратную зависимость, то есть при увеличении напряженности электрического поля масса осажденного вещества будет расти, в то время как увеличение расстояния между электродами может снижать эту массу [4].

Выводы

1. Рассматриваемый процесс отличается от известных кристаллизационных и электрохимических процессов тем, что кристаллизация происходит исключительно в узкой зоне ДЭС, где высокая концентрация ионов и мощное электрическое поле создают уникальные условия для немедленного осаждения микрокристаллов. Процесс кристаллизации вблизи анода зависит от электрического поля и происходит с высокой скоростью при стабильных условиях концентрации, удерживая микрокристаллы в пределах ДЭС, что нехарактерно для обычных условий.

2. Уникальной чертой этого процесса является его локализованность, значительное влияние электрического поля и тесная связь с динамикой ДЭС, что делает его отличным от традиционных электрохимических и кристаллизационных процессов.

Список литературы

- Smith J., Wang L. Influence of Electric Field on Crystallization Dynamics in Aqueous Solutions // *Journal of Physical Chemistry B*. 2020. Vol. 124, Is. 45. P. 12345–12356. DOI: 10.1021/acs.jpcc.0c04567.
- Johnson R., Lee H. Electrocrystallization Processes in Aqueous Solutions: Effects of Impurities // *CrystEngComm*. 2019. Vol. 21, Is. 30. P. 4567–4578. DOI: 10.1039/C9CE00789A.
- Kim S., Patel A. Role of Electric Fields in Modulating Crystal Growth in Impure Water // *Langmuir*. 2021. Vol. 37, Is. 12. P. 3456–3465. DOI: 10.1021/acs.langmuir.1c00789.
- Garcia M., Chen Y. Double Electric Layer and Its Impact on Crystallization in Ionic Solutions // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2022. Vol. 895. P. 115–123. DOI: 10.1016/j.jelechem.2022.115678.
- Brown T., Kumar R. The Effect of Electric Field Strength on the Kinetics of Crystallization in Aqueous Solutions // *Materials Science and Engineering*. 2023. Vol. 123. P. 234–245. DOI: 10.1016/j.mse.2023.123456.
- Zhao X., Thompson D. Understanding the Dynamics of Crystallization under Electric Fields: A Molecular Perspective // *Physical Review Letters*. 2021. Vol. 127, Is. 12. P. 123456. DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.123456.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. 8-е изд., стереотип. М.: Физматлит, 2012. 536 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. 4-е изд., стереотип. М.: Физматлит, 2005. 656 с.

УДК 004.8

ЭВОЛЮЦИЯ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ: ОТ ALPHAZERO К ALPHAPROOF И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В РЕШЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Курновский Р.М.

Джу Пи Морган Банк, Самара, e-mail: r.kurnovskii@gmail.com

В данной статье подробно рассматриваются алгоритмы машинного обучения, заложенные в основу системы AlphaZero, а также их применение для решения сложных математических задач в системе AlphaProof. Целью работы являлось определение математических правил работы алгоритмов, благодаря которым они столь эффективны. В статье также рассматриваются перспективы и вызовы, связанные с применением нейронных сетей в научных исследованиях, особенно в области математических доказательств. Для этого был проведен всесторонний обзор научных источников и систематизация данных исследований. Было выявлено, что эффективность моделей была связана с оптимизациями алгоритмов поиска по дереву Монте-Карло и разработки новых методов. AlphaProof использует методы обучения с подкреплением, разработанные на базе AlphaZero, которая изначально применялась для игр, таких как шахматы и го. Эти методы позволяют системе справляться с математическими задачами высокой сложности. Путем преобразования более миллиона задач из различных областей, включая алгебру, теорию чисел и геометрию, в формальные языки, такие как Lean, AlphaProof эффективно генерирует и проверяет решения, что делает ее мощным инструментом для математических исследований.

Ключевые слова: машинное обучение, нейронные сети, математические задачи, AlphaZero, AlphaProof

EVOLUTION OF MACHINE LEARNING METHODS: FROM ALPHAZERO TO ALPHAPROOF AND THEIR APPLICATION IN SOLVING MATHEMATICAL PROBLEMS

Kurnovskiy R.M.

J.P. Morgan, Samara, e-mail: r.kurnovskii@gmail.com

This paper provides a detailed account of the machine learning algorithms that underpin the AlphaZero system, together with an analysis of their application to the resolution of complex mathematical problems in the AlphaProof system. The objective of this paper is to identify the mathematical principles underlying the algorithms that make them so effective. Furthermore, the paper investigates the potential and obstacles to utilizing neural networks in scientific enquiry, particularly within the domain of mathematical proofs. To this end, a comprehensive review of the scientific literature and systematic organization of the research data were carried out. It was determined that the efficacy of the models was contingent upon optimizations of Monte Carlo tree search algorithms and the development of novel methodologies. AlphaProof employs reinforcement learning techniques derived from AlphaZero, which was initially deployed in games such as chess and Go. These techniques enable the system to address mathematical problems of considerable complexity. By transforming over a million problems from diverse domains, including algebra, number theory, and geometry, into formal languages like Lean, AlphaProof can efficiently generate and verify solutions, making it a valuable tool for mathematical research.

Keywords: machine learning, neural networks, mathematical problems, Alphazero, Alphaproof

Введение

25 июля 2024 г. команда Research компании Google DeepMind, занимающаяся разработкой и применением методов машинного обучения для решения математических задач, объявила о том, что их последние модели AlphaProof и AlphaGeometry 2 смогли решить задания сложнейшей международной математической олимпиады (65th International Mathematical Olympiad, IMO 2024) на уровне серебряного медалиста, отстав от порога для золотой медали на 1 балл [1]. Стоит учесть, что, в отличие от реальных участников олимпиады, решающих задачи 4,5 часа, нейросети справились лишь за 3 дня, но, несмотря на это, в скором времени ожидается многократное ускоре-

ние работы AlphaProof. Бурный рост нейронных сетей в самых разных прикладных и фундаментальных областях за последние несколько лет привлекает внимание многих специалистов. Одним из важных вопросов является вопрос эволюции и развития методов обучения.

Цель работы заключается в определении ключевых технических и математических особенностей работы алгоритмов AlphaZero, AlphaProof и похожих моделей, благодаря которым они столь успешно решают математические задачи.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования была осуществлена систематическая оценка и ана-

лиз научных публикаций, посвященных эволюции методов машинного обучения с акцентом на разработку и применение моделей, таких как AlphaZero и AlphaProof, в решении математических задач. Основным методом исследования стал литературный обзор, включающий поиск, отбор, классификацию и критический анализ научных статей, опубликованных в период с 2012 по 2024 г. Материалы для анализа были получены из международных научных журналов, включая Nature, IEEE, Science, а также публикаций Google DeepMind. Ключевыми словами поиска стали: AlphaZero, AlphaProof, «машинное обу-

чение», «решение математических задач» «глубокое обучение». Были рассмотрены статьи, охватывающие как технические аспекты алгоритмов, так и их применимость в математике и смежных областях. Критериями отбора статей служили: актуальность исследований в контексте применения методов машинного обучения к математическим задачам, детальное описание архитектур моделей AlphaZero и AlphaProof. Для структурирования данных применялась методология PRISMA, которая позволила систематизировать процесс поиска, исключения дублирующихся данных и анализа релевантных источников.

Результаты исследования и их обсуждение

Все используемые обозначения и символы даны в таблице.

Используемые обозначения

p	вектор, каждая компонента p_a которого – это вероятность принять данное положение при данном действии
v	скаляр оценки результата
Θ	гиперпараметры нейросети
f_{Θ}	функция нейросети при данных гиперпараметрах
s	данное положение на доске (на примере игры в го)
a	произведенный переход по дереву (действие)
$Pr(a s)$	вероятность занять данное положение на доске при данном действии
z	скаляр, характеризующий результат игры
π_a	вектор вероятности произвести данный переход по дереву из данного начального положения
v_t	скаляр оценки результата игры на данном шаге
l	функция потерь в методе градиентного спуска
T	скаляр, характеризующий конечную позицию на дереве
c	регулирующий параметр
c_{puct}	скаляр, определяющий уровень исследованности данной ветви дерева
χ	параметр ошибки функции потерь, отличающий алгоритм PBT от алгоритма AlphaZero

Все решения семейства Alpha компании DeepMind, включающие системы AlphaFold 2, AlphaZero, AlphaGo, AlphaStar, AlphaTensor, AlphaCode и др., направлены на решение вычислительных прикладных и научных задач. Рассматриваемая система AlphaProof представляет собой предварительно обученную на большой выборке математических задач и их решений модель с подкреплением AlphaZero, схему работы которой можно проиллюстрировать рис. 1. Более миллиона

математических рукописных задач из всех областей геометрии, алгебры, теории вероятностей и теории чисел, математического анализа и других были переведены на формальный язык Lean с помощью Gemini [1]. Это решило большинство проблем с обработкой естественного языка, нейросетевых галлюцинаций и ошибок. Для решения геометрических заданий была значительно улучшена модель AlphaGeometry за счет большего количества задач для обучения.

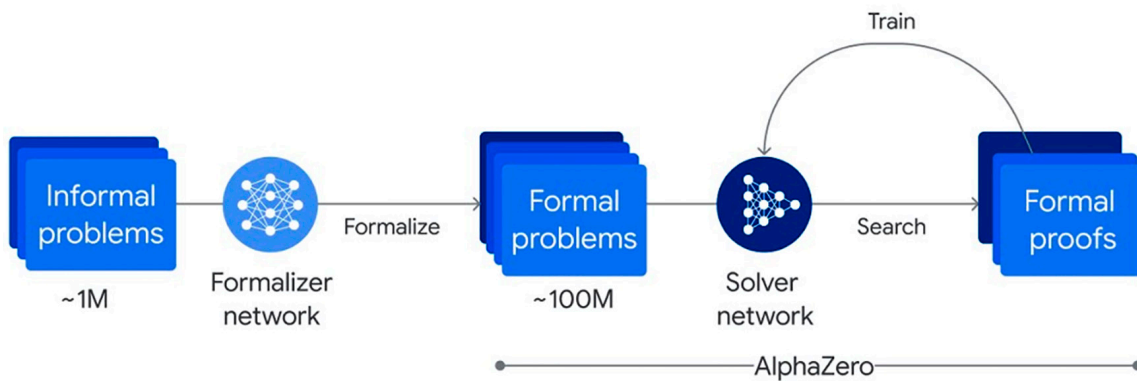


Рис. 1. Схематичное изображение процесса формализации математических задач, обучения и их решения с помощью AlphaZero в системе AlphaProof

AlphaZero – это нейронная сеть, которая обучается за счет соревнования сама с собой в течение многих миллионов попыток с подкреплением. Сначала процесс обучения случаен, но довольно быстро нейросеть учится корректировать свои параметры, причем намного более успешно, чем модели, обученные на заранее подготовленных данных. AlphaZero использует эвристический алгоритм поиска по дереву Монте-Карло (Monte Carlo Tree Search, MCTS) с оценкой НОД функциями на основе deep learning. Именно нейросетевой оценкой НОД этот алгоритм отличается от классического MCTS. Эта нейросеть тренируется предсказывать по прошлым данным дальнейшие данные (SL-policy network), потом тренируется играть сама с собой (RL-policy network), а далее тренируется предсказывать шансы на выигрыш [2]. В основе этого метода все еще лежат математические

методы теории принятия решений (марковские процессы принятия решений и их расширения при частичных наблюдениях), теории игр и комбинаторика, метод Монте-Карло и искусственный интеллект в настоящих играх.

Алгоритм MCTS итеративно строит дерево поиска решения до достижения какого-то ограничения по памяти, времени, точности и т.п. Как и у множества других таких алгоритмов, итерации алгоритма производятся в четыре шага: выбор дочерних НОД, расширение количества НОД, моделирование и обновление статистики ошибок [3]. Иллюстрация алгоритма представлена на рис. 2.

Рассмотрим математические основы работы алгоритмов работы AlphaZero. Отметим, что выделенные полужирным начертанием символы – это векторные величины, если не указано иное.

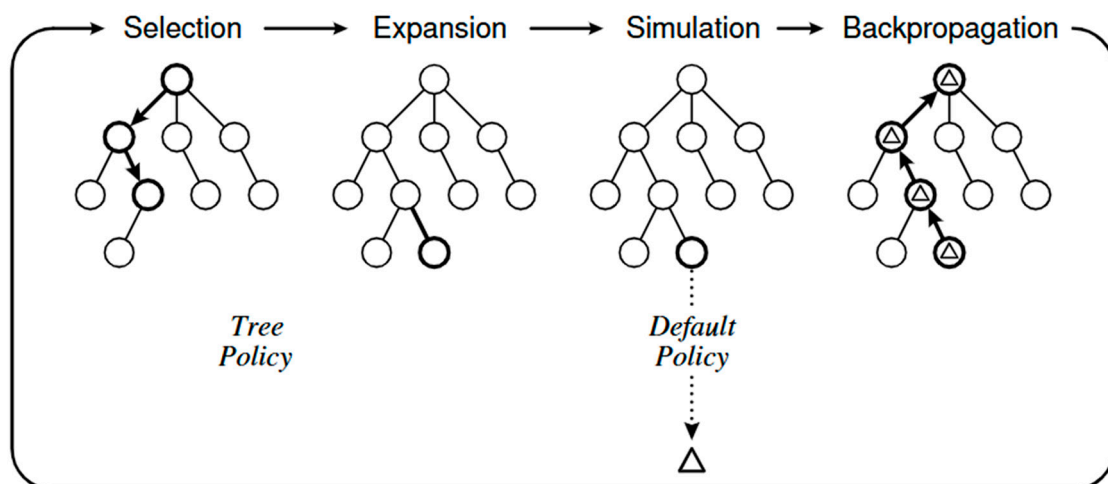


Рис. 2. Схематичное изображение основных шагов алгоритма Monte Carlo Tree Search

Авторы AlphaZero в работе [4] описывают используемую нейросеть с глубоким обучением как функцию $(p, v) = f_{\Theta}(s)$ с параметрами Θ . На примере с обучением игры в го, нейросеть $f_{\Theta}(s)$ принимает данное положение на доске s , а на выходе предоставляет вектор вероятности p с компонентами $p_a = Pr(a|s)$ для каждого действия a и скаляр оценки v ожидаемого результата игры z из отношения $v \approx \mathbb{E}[z|s]$. Параметры Θ подбираются при обучении с играми со случайным подобранными Θ благодаря подкреплению. В каждой игре с начальным положением в ходе поиска по ветви возвращается вектор $\pi_a = Pr(a|s_0)$. Параметры нейронной сети постоянно обновляются, чтобы минимизировать разницу между величиной предсказанного результата игры v_i с реальным результатом z . Для этого параметры Θ корректируются путем градиентного спуска по функции потерь l :

$$l = (z - v)^2 - \pi^T \log(p) + c \|\theta\|^2, \quad (1)$$

где T – это конечная позиция на дереве, c – параметр, который контролирует регуляризацию этой функции.

В AlphaZero, так же как и в AlphaGo Zero, используется байесовская оптимизация гиперпараметров, но они, как и настройки сети и всего алгоритма, не изменяются от игры в го [5]. Каждое ребро (s, a) в дереве поиска хранит набор статистических данных:

$$\{N(s, a), W(s, a), Q(s, a), P(s, a)\}, \quad (2)$$

где априорная вероятность $P(s, a)$, количество посещений $N(s, a)$, значение действия $Q(s, a)$, $W(s, a)$ – суммарное значение действия на ветви дерева. Каждое моделирование начинается с начального состояния s_0 и итеративно выбирает ходы, которые максимизируют верхнюю доверительную границу вида

$$a_i = \operatorname{argmax}(Q(s_i, a) + U(s_i, a)), \quad (3)$$

где $U(s, a) \propto (s, a) / (1 + N(s, a))$. В частности, в алгоритме PUCT предлагается такой вид функции $U(s, a)$:

$$U(s, a) = c_{\text{puct}} P(s, a) \frac{\sqrt{\sum_b N(s, b)}}{1 + N(s, a)}, \quad (4)$$

где c_{puct} – это константа, определяющая уровень исследованности данной ветви.

При прохождении по ребру (s, a) обновляется значение счетчика $N(s, a)$, а $Q(s, a)$ обновляется по правилу

$$Q(s, a) = \frac{1}{N(s, a) \sum_{s'|s, a \rightarrow s'} V(s')}. \quad (5)$$

Здесь $s, a \rightarrow s'$ показывает, что симуляция достигла данного s' при выполнении хода a из состояния s .

Помимо приведенного выше облегченного математического объяснения работы алгоритма работы AlphaZero, полная математическая модель содержит большое количество вероятностных поправок и небольших, но многочисленных шагов корректировок.

После публикации статей AlphaZero несколько исследовательских команд, как в самой компании DeepMind, так и другие, проводили изучение способов и методов оптимизации алгоритмов AlphaZero. Так, исследователи из работы [6] в 2020 г. предложили собственный разработанный «популяционный метод» (PBT). Они использовали подходы, применяемые в машинном обучении для обработки генетических данных, а именно несколько нейросетей со случайными начальными параметрами Θ . Все сети объединяют информацию для улучшения гиперпараметров, а в случае, если они недостаточно точные, то происходит их прямая замена на лучшие гиперпараметры другой нейросети. Также следует отметить, что алгоритм предусматривает возможность ручного изменения гиперпараметров в научно-исследовательских целях.

В данном исследовании использовалось 16 нейросетей для оценок, причем функция потерь теперь также зависит и от параметра ошибки x между z и v :

$$l = x(z - v)^2 - \pi^T \log(p) + c \|\theta\|^2. \quad (6)$$

В результате экспериментов авторы обнаружили, что, используя метод PBT к игре в го на поле 19×19 , процент побед над другой нейросетью Facebook's ELF OpenGo v2, которая наиболее близка по мощности со свободными реализациями AlphaZero, составил 74 %. Это говорит о том, что оригинальное применение различных подходов в нейросетевых методах обучения имеет перспективу значительно увеличить способности таких соревновательных систем.

AlphaProof использует заранее обработанные Gemini данные, которые представляют собой формализованные с помощью Lean математические задачи. Это одна из слабых точек технологии и недостаток обучения моделей на естественном языке, из-за чего на настоящий момент невозможно избежать многочисленных искажений. Для решения конкретной математической задачи, AlphaProof необходимо формализовать ее, в соответствии с алгоритмом AlphaZero, описанным выше, генерируются сотни варианты решения этой задачи, а после про-

исходит проверка этого решения с помощью Lean, если оно идентифицируется как неверное, то начинается проверка следующего решения и т.д., до достижения правильного решения. Это возможно благодаря тому, что Lean – это функциональный язык программирования с зависимыми типами на основе CoC (Calculus of Constructions) и CiC (Calculus of Inductive Constructions) [7]. Версия Lean 4 поддерживает высокопроизводительные технологии управления памятью, что может значительно упростить процесс обучения таких сложных систем, как AlphaProof.

На данный момент еще нет публикаций с тестами результатов работы алгоритмов системы AlphaProof, неясно, есть ли отличия точности и скорости ее работы в зависимости от области математики задач, компания Google DeepMind не представила подробные данные о том, какими были промежуточные этапы обучения, о скорости обучения на различных задачах, требовались ли корректировки метода обучения. Эти данные ожидаются в ближайшем будущем с выходом второй версии системы, но уже сейчас становится понятным, что такое использование нейросетей будет большой и важной частью будущего развития математики, так как позволит с высокой точностью и скоростью строго проверять сложнейшие и объемные теоремы, также как и теоремы из областей математики, в которых большое количество абстрактных конструкций и идей – сейчас такие задачи непосильны существующим моделям искусственного интеллекта. Помимо доказательства теорем, это также будет большим прорывом не только для решения сложнейших задач, но и для их составления. О том, как такие нейросети внесут большой вклад в будущее математики на The Oxford Mathematics Public Lectures, рассказал ведущий мировой математик Теренс Тао, который видит в них незаменимый инструмент и роль коллеги при математических исследованиях.

Заключение

Все вышеизложенное позволяет заключить, что значительный прогресс в методах машинного обучения, улучшения и распространения применения AlphaZero в прикладных и фундаментальных исследованиях будет только увеличиваться. AlphaProof, в свою очередь, показывает перспективы в качестве сильного инструмента для ученого, что показывает прогресс в работах по оптимизации и улучшению алгоритмов таких систем.

Список литературы

1. AI achieves silver-medal standard solving International Mathematical Olympiad problems // Google DeepMind. [Электронный ресурс]. URL: <https://deepmind.google/discover/blog/ai-solves-imo-problems-at-silver-medal-level/> (дата обращения: 04.09.2024).
2. David Silver, Aja Huang, Chris J. Maddison, Arthur Guez, Laurent Sifre, George van den Driessche, Julian Schrittwieser, Ioannis Antonoglou, Veda Panneershelvam, Marc Lanctot, Sander Dieleman, Dominik Grewe, John Nham, Nal Kalchbrenner, Ilya Sutskever, Timothy Lillicrap, Madeleine Leach, Koray Kavukcuoglu, Thore Graepel, Demis Hassabis. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search // Nature. 2016. Vol. 529, Is. 7587. P. 484–489.
3. Cameron B. Browne, Edward Powley, Daniel Whitehouse, Simon M. Lucas, Peter I. Cowling, Philipp Rohlfshagen. A Survey of Monte Carlo Tree Search Methods // IEEE Trans. Comput. Intell. AI Games. 2012. Vol. 4, Is. 1. P. 1–43.
4. David Silver, Thomas Hubert, Julian Schrittwieser, Ioannis Antonoglou, Matthew Lai, Arthur Guez, Marc Lanctot, Laurent Sifre, Dharshan Kumaran, Thore Graepel, Timothy Lillicrap, Karen Simonyan, Demis Hassabis. A general reinforcement learning algorithm that masters chess, shogi, and Go through self-play // Science. 2018. Vol. 362, Is. 6419. P. 1140–1144.
5. David Silver, Julian Schrittwieser, Karen Simonyan, Ioannis Antonoglou, Aja Huang, Arthur Guez, Thomas Hubert, Lucas Baker, Matthew Lai, Adrian Bolton, Yutian Chen, Timothy Lillicrap, Fan Hui, Laurent Sifre, George van den Driessche, Thore Graepel & Demis Hassabis. Mastering the game of Go without human knowledge // Nature. 2017. Vol. 550, Is. 7676. P. 354–359.
6. Ti-Rong Wu, Ting-Han Wei, I-Chen Wu Accelerating and Improving AlphaZero Using Population Based Training. The Thirty-Fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-20). 2020. P. 1046–1053.
7. About Lean // Lean. [Электронный ресурс]. URL: <https://lean-lang.org/about/> (дата обращения: 04.09.2024).

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНГИЦИДНОЙ АКТИВНОСТИ ТИТАНОСОДЕРЖАЩИХ ДОМЕННЫХ ШЛАКОВ

Половнева Д.О., Старостина И.В., Кирюшина Н.Ю.,
Макридина Ю.Л., Поленяка Ю.Т.

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова,
Белгород, e-mail: starostinairinav@yandex.ru

Целью настоящего исследования является определение устойчивости титаносодержащих доменных шлаков Нижнетагильского металлургического комбината, используемых в составе сырьевых компонентов при производстве строительных материалов, к воздействию плесневых грибов, то есть их фунгицидной активности. В работе использовали доменный шлак фракции 0–10 мм и его водные вытяжки. В качестве тест-объекта рассматривали чистые культуры микроскопических грибов двух видов рода *Aspergillus*. Исследования проводили в лабораторных условиях с использованием двух методов тестирования на твердых питательных средах: диско-диффузионный на основе водной вытяжки шлака и метод определения стойкости твердых образцов шлака к воздействию плесневых грибов, где моделировали условия роста грибов. Результаты показали, что во всех вариантах определения фунгицидной активности с использованием диско-диффузионного метода наблюдается интенсивный рост культуры гриба двух видов на поверхности дисков с исследуемой вытяжкой шлака. При исследовании шлака в твердом виде отчетливо видно развитие гриба, покрывающего более 25 % испытываемой поверхности материала. Под микроскопом при суммарном увеличении 80х виден развитый мицелий со спорангиями на поверхности частиц шлака. Результаты исследования позволяют заключить, что титаносодержащий доменный шлак и его водная вытяжка не содержат компоненты, которые бы препятствовали развитию плесневых грибов, то есть не обладают фунгицидной активностью и являются негрибостойкими.

Ключевые слова: доменный шлак, фунгицидная активность, диско-диффузионный метод, микроскопические грибы, оценка грибостойкости

Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.

STUDY OF THE FUNGICIDAL ACTIVITY OF TITANIUM-CONTAINING BLAST FURNACE SLAGS

Polovneva D.O., Starostina I.V., Kiryushina N.Yu.,
Makridina Yu.L., Polenayaka Yu.T.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
Belgorod, e-mail: starostinairinav@yandex.ru

The aim of this study is to determine the resistance of titanium-containing blast furnace slags of the Nizhny Tagil Iron and Steel Works, used as raw materials in the production of building materials, to the effects of mold fungi, i.e. their fungicidal activity. Blast furnace slag of the 0-10 mm fraction and its aqueous extracts were used in the work. Pure cultures of microscopic fungi of two species of the genus *Aspergillus* were considered as a test object. The studies were carried out in laboratory conditions using two testing methods on solid nutrient media: disk diffusion based on an aqueous extract of slag and a method for determining the resistance of solid slag samples to the effects of mold fungi, where the growth conditions of fungi were simulated. The results showed that in all variants of determining fungicidal activity using the disk diffusion method, intensive growth of the fungal culture of two species is observed on the surface of disks with the slag extract under study. When examining the slag in solid form, the development of a fungus covering more than 25 % of the tested surface of the material is clearly visible. Under a microscope with a total magnification of 80x, developed mycelium with sporangia is visible on the surface of the slag particles. The results of the study allow us to conclude that titanium-containing blast furnace slag and its aqueous extract do not contain components that would prevent the development of mold fungi, i.e. they do not have fungicidal activity and are not resistant to fungi.

Keywords: blast furnace slag, fungicidal activity, disco diffusion method, microscopic fungi, assessment of mushroom resistance

The work was carried out within the framework of the implementation of the federal program for supporting universities "Priority 2030" using equipment based on the High Technology Center of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

Введение

Доменные шлаки представляют собой твердые побочные продукты – сложные силикатные и алюмосиликатные расплавы, образующиеся при выплавке чугуна в до-

менных печах. Из 1,7–2 т железной руды и плавней образуется 1 т чугуна и 0,6–0,7 т доменного шлака. В процессе плавки железной руды шлак отделяется от чугуна и накапливается в печи как отход, который после

охлаждения превращается в твердый материал. Объем образования шлака на различных металлургических предприятиях сильно зависит от свойств используемого сырья и уровня технологического производства. Основными компонентами химического состава доменных шлаков являются оксиды – CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, FeO, Fe₂O₃, MnO и S, концентрация которых варьируется в зависимости от состава используемых железных руд, плавней, вида используемого топлива, марки получаемого чугуна и условий охлаждения шлакового расплава [1, 2].

Широкое применение доменных шлаков в промышленности обусловлено их физическими и химическими свойствами. Содержание отдельных оксидов в шлаке и их влияние на другие его свойства определяется модулем основности (M_o), то есть отношением содержания основных оксидов (CaO и MgO) к сумме кислотных оксидов (SiO₂ и Al₂O₃). По величине этого параметра шлаки подразделяются на основные ($M_o > 1$), нейтральные ($M_o = 1$) и кислые ($M_o < 1$) [3].

Известно использование основных доменных шлаков, характеризующихся повышенным содержанием оксидов кальция и магния, для снижения кислотности почв взамен известковых удобрений, а также в качестве мелиоранта при рекультивации техногенных почвенных массивов. Их применение совместно с гуминовыми препаратами положительно влияет на всхожесть многолетних трав, увеличивая фитомассу в 4 раза [4–6].

Доменные шлаки имеют схожие физико-химические свойства с горными породами, что определило их широкое применение в строительной отрасли. Причем они используются не только в качестве добавки, но и полностью заменяют традиционное минеральное сырье [7].

Шлаковые расплавы доменного производства подвергаются гранулированию путем быстрого охлаждения, что позволяет зафиксировать преимущественно аморфную (стекловидную) структуру граншлаков. Доменные гранулированные шлаки в тонкоизмельченном состоянии проявляют гидравлические свойства, то есть способность к твердению, что позволило использовать их в производстве добавочных и шлаковых цементов взамен части клинкера. Это позволяет не только снизить потребность в клинкере, уменьшить расходы на содержание оборудования и топливно-энергетические затраты на производство вяжущих, но и увеличить объем выпускаемой продукции, а также одновременно решить экологические задачи охраны окружающей среды.

Использование шлаков в качестве мелкого или крупного заполнителя бетон-

ной смеси повышает устойчивость к химической коррозии, морозостойкость и долговечность бетонных конструкций. Это делает шлакосодержащий бетон идеальным для строительства мостов, дорог, гидротехнических сооружений [8].

Однако эксплуатация строительных объектов происходит при активном воздействии влажности и температуры, что может приводить к биоповреждениям микроорганизмами данных сооружений. Потому изучение устойчивости к воздействию микроскопических грибов (фунгицидной активности) доменных шлаков, использующихся в производстве строительных конструкций, представляет особый интерес.

Микроскопические грибы (или микромицеты) – это одноклеточные и многоклеточные организмы, относящиеся к особому царству грибов. Такие живые системы имеют способность колонизировать различные материалы за счет выделения ферментов, которые расщепляют органические и неорганические вещества. Наиболее активными в процессе разрушения материалов из всех родов микроскопических грибов являются грибы родов *Aspergillus niger*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Alternaria* [9, 10].

Изучение устойчивости доменных шлаков к воздействию микроскопических грибов (фунгицидной активности) проводится с использованием различных методов. Наиболее широко применяются специальные лабораторные исследования, которые позволяют моделировать условия роста грибов на материале и оценивать его степень разрушения. Основная цель таких экспериментов – определить, насколько шлаки обладают фунгицидной активностью в условиях повышенной влажности, температуры и наличия микрофлоры [11].

Параллельно с визуальными и микроскопическими наблюдениями за развитием грибов в лабораторных условиях используются физико-химические методы для определения изменений в структуре и составе материалов под воздействием микроскопических грибов, к которым относятся спектральный анализ, микроскопическое исследование, измерение изменения массы [12]. Микроскопические методы исследования устойчивости материалов к грибам включают как световую микроскопию, так и электронную микроскопию. Эти методы дают возможность изучить процесс разрушения материалов на молекулярном и клеточном уровнях [13]. Для понимания устойчивости доменных шлаков к воздействию микроскопических грибов проводятся специальные лабораторные исследования, которые имитируют реальные условия эксплуатации материалов.

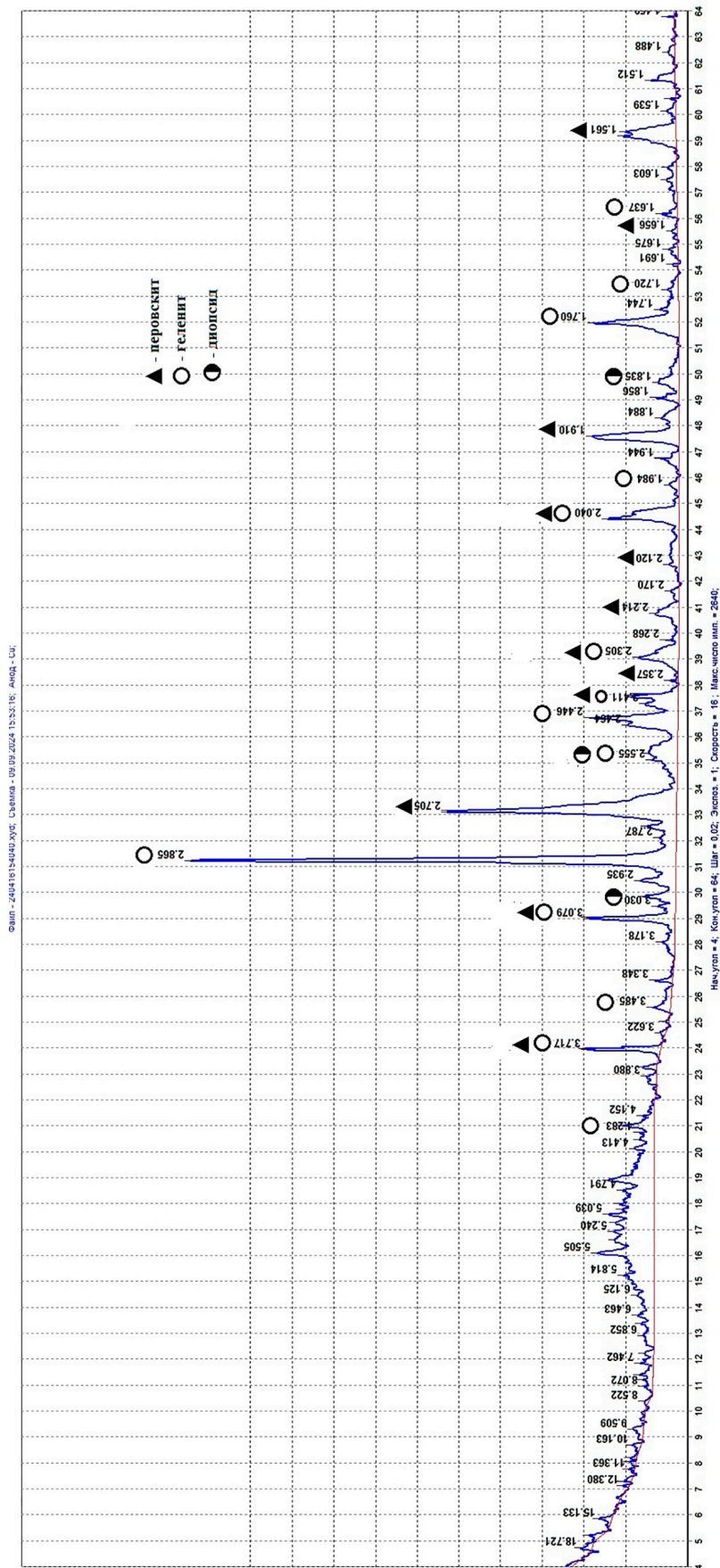


Рис. 1. Дифрактограмма титаносодержащего доменного шлака ООО «НЛМК»

Цель работы заключалась в изучении фунгицидной активности титаносодержащего доменного шлака и его водной вытяжки с использованием методов тестирования на твердых питательных средах: диско-диффузионного метода (ДДМ), который предполагает применение бумажных дисков, смоченных вытяжкой шлака, и метода определения грибостойкости шлака, заключающегося в заражении спорами плесневого гриба рода *Aspergillus* поверхности твердого материала.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования использовался образец титаносодержащего шлака Нижнетагильского металлургического комбината АО «ЕВРАЗ НТМК» доменного передела железнорудного концентрата уральских титаномагнетитовых руд Качканарского месторождения и его водная вытяжка. Основными компонентами шлака

являются оксиды кальция (CaO), диоксид кремния (SiO₂), оксид алюминия (Al₂O₃), оксиды железа (FeO и Fe₂O₃) и оксид титана (TiO₂) (таблица). Химический состав шлака определяли рентгенофлуоресцентным методом. Исследуемый материал по модулю основности относится к кислым шлакам – Mo ≤ 1, при этом величина рН вытяжки составила 7,89.

Титаносодержащий доменный шлак является медленно охлажденным материалом, поэтому для него характерна смешанная структура – аморфно-кристаллическая с преобладанием кристаллической фазы. Согласно результатам рентгенофазового анализа (рис. 1), основным минералом является геленит (2CaO·Al₂O₃·SiO₂) d(A) = 3,717; 3,079; 2,865; 2,555; 2,446; 2,305; 2,040; 1,91; 1,760, содержание которого составляет около 65 %. Титаносодержащей фазой является перовскит (CaO·TiO₂) d(A) = 3,717; 2,705; 2,305; 2,214; 2,040; 1,91; 1,856; 1,561.

Химический состав шлака, мас. %

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MnO	V ₂ O ₅	Модуль основности, M _o
30,55	25,72	17,25	15,17	8,09	0,63	0,59	0,54	0,31	0,73

Содержание его составляет около 26 %. Фиксируются диопсид (CaO·MgO·2SiO₂) и мервинит (3CaO·MgO·2SiO₂), содержание которых не превышает 5 %. Полученные данные минералогического состава хорошо согласуются с результатами исследований, представленными в работе [14]. Присутствует аморфная фаза, на что указывает значительное по интенсивности гало в диапазоне углов 2θ12-22°.

Для определения фунгицидной активности шлака использовали следующие методы тестирования на твердых питательных средах: диско-диффузионный метод (ДДМ) и метод определения стойкости твердого шлака к воздействию плесневых грибов рода *Aspergillus*.

Диско-диффузионный метод определения чувствительности конкретных микроорганизмов основан на способности исследуемых жидкостей диффундировать из пропитанных ими бумажных дисков в питательную среду, угнетая рост высеванных в нее микроорганизмов [15].

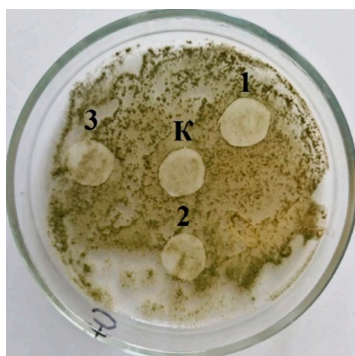
Фунгицидность с использованием ДДМ оценивали по характеру роста грибов в присутствии водной вытяжки шлака. Для этого бумажные диски смачивали вытяжкой шлака и контрольной пробой. В качестве тест-объекта использовали чистые культуры

микроскопических грибов двух видов рода *Aspergillus* (аспергиллы). Контролем служили диски, смоченные отстоянной водопроводной водой (К). Плесневые грибы культивировали в течение 7 суток на твердой питательной среде Чапека в присутствии локально расположенных участков, содержащих вытяжку шлака. Опыты с исследуемой пробой проводили в трех повторностях.

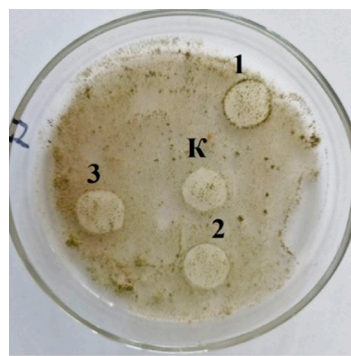
Второй метод заключался в определении грибостойкости твердого шлака. С этой целью исследуемый измельченный шлак (размер частиц составил менее 0,063 мм) помещали в чашки Петри с твердой питательной средой Чапека и заражали водной суспензией спор (объем 0,1 мл) микроскопических грибов двух видов рода *Aspergillus* в двух повторностях и выдерживали в течение 3 суток, до зарастания поверхности шлака аспергиллом в чашках Петри с последующей оценкой грибостойкости по степени развития плесневых грибов в соответствии с ГОСТ 9.049-91 [16, 17].

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты определения фунгицидной активности с использованием диско-диффузионного метода представлены на фотографиях (рис. 2).



Культура гриба первого вида



Культура гриба второго вида

Рис. 2. Рост культуры грибов двух видов рода *Aspergillus* на твердой питательной среде в присутствии исследуемой и контрольной проб: К – контрольная проба; 1, 2, 3 – водная вытяжка шлака в трех повторностях

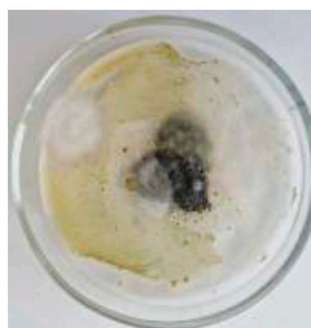


Рис. 3. Рост культуры гриба рода *Aspergillus* на поверхности шлака в двух повторностях

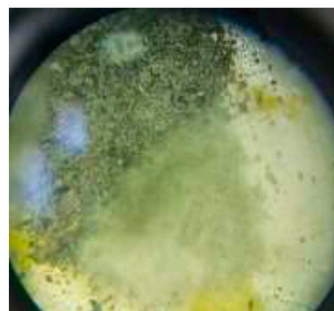


Рис. 4. Рост культуры гриба рода *Aspergillus* на поверхности шлака под микроскопом (суммарное увеличение $\times 7,5$)

На дисках наблюдается интенсивный рост культуры гриба двух видов как на поверхности диска с контрольной пробой (К), так и на поверхности дисков с исследуемой вытяжкой шлака (1–3). Это свидетельствует о том, что вытяжка шлака не обладает фунгицидной активностью. Результаты оценки грибостойкости твердого шлака представлены на рис. 3.

Согласно ГОСТ 9.048-89, по внешнему виду (рис. 4, 5) отчетливо видно развитие гриба, покрывающего более 25 % испыты-

ваемой поверхности шлака. Следовательно, грибостойкость исследуемого материала соответствует 5 баллам [16].

Под микроскопом при суммарном увеличении 80х (рис. 5) виден развитый мицелий со спорангиями на поверхности частиц шлака.

По результатам оценки фунгицидной активности (грибостойкости) исследуемого шлака можно сделать вывод, что шлак в твердом виде не обладает стойкостью к воздействию плесневых грибов (негрибостоек) согласно ГОСТ 9.049-91 [17].

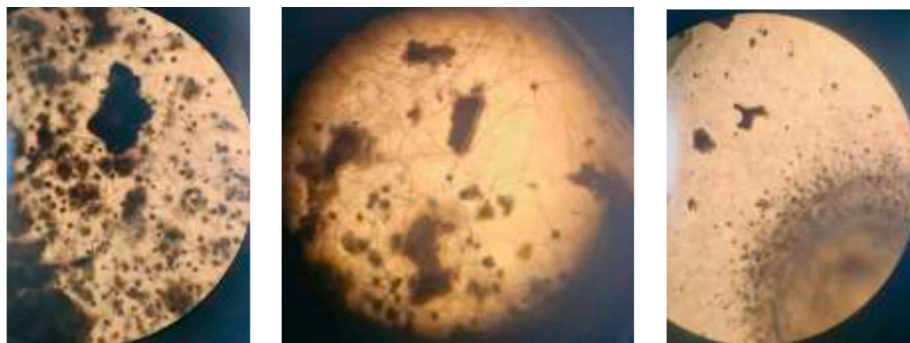


Рис. 5. Мицелий плесневого гриба рода *Aspergillus* на поверхности шлака под микроскопом (суммарное увеличение $\times 80$)

Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют заключить, что титаносодержащий шлак Нижнетагильского металлургического комбината АО «ЕВРАЗ НТМК» доменного передела железнорудного концентрата уральских титаномагнетитовых руд Качканарского месторождения и его водная вытяжка не обладают фунгицидной активностью (грибостойкостью). Следовательно, анализируемый материал не может рассматриваться в качестве фунгицидной составляющей строительных конструкций, препятствующей развитию микроскопических плесневых грибов, а шлакосодеждающие строительные материалы и конструкции, эксплуатируемые при активном воздействии влажности и температуры, могут быть подвержены биоповреждениям микромицетами.

Список литературы

1. Журавлев А.А. Оценка влияния различных оксидов в шлаке на свойства металлургических шлаков // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. С. 13–15.
2. Романов П.С., Романова И.П. Рециклинг отходов металлургической промышленности как способ сбережения природных ресурсов и снижения экологической напряженности // Синергия. 2016. № 2. С. 94–99.
3. Бодяков А.Н., Бугряшов Д.В. Актуальные проблемы металлургических шлаков // Образование. Наука. Производство: сборник материалов XIII Международного молодежного форума. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. С. 1016–1020.
4. Осипов А.И. История и практические аспекты известкования кислых почв в России // Агрехимический вестник. 2019. № 3. С. 28–36. DOI: 10.24411/0235-2516-2019-10038.
5. Беланов И.П., Наумова Н.Б., Семина И.С., Савенков О.А. Шлаки металлургического производства – перспективный материал для рекультивации техногенных отходов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2019. Т. 61, № 12. С. 987–992. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-987-992.

6. Белецкая В.А., Румянцева Е.Л. Перспективы использования электросталеплавильных шлаков ОЭМК // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 3. С. 140–145.

7. Пашкевич М.А., Куликова Ю.А. Современные тенденции управления отходами доменного производства // Вестник Евразийской науки. 2022. Т. 14, № 6. [Электронный ресурс]. URL: <https://esj.today/PDF/30NZVN622.pdf> (дата обращения: 28.09.2024).

8. Титова Л.А., Бейлина М.И., Шабалин В.А., Митюкова Е.В. Эффективность применения гранулированных доменных шлаков при производстве бетонных смесей и бетонов // Бетон и Железобетон. 2021. № 2 (604). С. 16–20.

9. Сахно О.Н., Селиванов О.Г., Чухланов В.Ю. Биостойкость полимерных материалов и методы ее оценки: учеб. пособие. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2018. 84 с.

10. Samson R.A., Hong S., Peterson S.W., Frisvad J.C., Varga J. Polyphasic taxonomy of *Aspergillus* section *Fumigati* and its teleomorph *Neosartorya* // Studies in Mycology. 2007. No. 59. P. 147–203. DOI: 10.3114/sim.2007.59.14.

11. Горбань М.В. Грибостойкость полимерных материалов в отношении коллекционных и аборигенных штаммов микроскопических грибов // Вестник Сургутского государственного университета. 2014. № 2 (4). С. 48–51.

12. Потехина Р.М., Тарасова Е.Ю., Семенов Э.И., Калимуллин Ф.Х., Мингалеев Д.Н., Галиуллин А.К., Нургалiev Ф.М., Семенова С.А., Красовская Ю.В. Микроскопические грибы рода *Fusarium*: учебное пособие. Казань: КГАВМ им. Баумана, 2024. 40 с.

13. Журавская Н.Е., Шевченко К.В., Журавский Д.А. Биоповреждения бетонных конструкций, мероприятия по восстановлению // Проблемы современного строительства: материалы Международной научно-технической конференции. Минск: БНТУ, 2020. С. 229–237.

14. Смирнов Л.А., Кошкарлов Д.А., Заякин О.В., Мионов К.В., Крашенинин А.Г., Форшев А.А., Калимулина Е.Г. Состав и свойства титаносодержащих доменных шлаков // Металлург. 2023. № 5. С. 84–88. DOI: 10.52351/00260827-2023-05-84.

15. Дмитриева М.Б. Разработка технологии биозащиты волокнистых материалов музейного назначения и методов ее оценки: дис ... канд. техн. наук. М., 2016. 179 с.

16. ГОСТ 9.048-89. Единая система защиты от коррозии и старения. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов. М.: Изд-во стандартов, 1989. 23 с.

17. ГОСТ 9.049-91. Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные и их компоненты. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов. М.: Изд-во стандартов, 1992. 15 с.

СТАТЬЯ

УДК 532.6:546.2

КВАНТОВЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ АТОМНО-ГЛАДКИХ МЕТАЛЛОВ**¹Юров В.М., ²Гончаренко В.И., ²Олешко В.С., ¹Жангозин К.Н.**¹ТОО «ТСК Восток», Караганда, Астана, e-mail: exciton@list.ru;²ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, e-mail: OleshkoVS@mai.ru

Впервые количественно определена толщина поверхностного слоя атомно-гладких металлов, без учета шероховатости их поверхности. Размер этого слоя определяется одним фундаментальным параметром – молярным объемом элемента и равен для чистых металлов 1–3 нм, то есть представляет собой наноструктуру. Нанослой атомно-гладких металлов существенно отличается от мезослоя и объемной фазы наличием размерных эффектов коллективного типа и экспериментально определяется в сверхвысоком вакууме методом рентгеновской дифракции под скользящими углами. Нанослой атомно-гладких металлов содержит 3–5 монослоев и квантуется в закрытой системе как одномерная потенциальная яма с бесконечно высокими стенками. Дискретность уровней энергии в нанослое отвечает отличию энергии Ферми каждого нанослоя. Это экспериментально проявляется на кристаллах графита, содержащих три монослоя. Первый монослой – графен, второй – двухслойный графен, третий – трехслойный графен существенно отличаются друг от друга и от объемной фазы – графита. Подобное отличие нанослоя атомно-гладких металлов от объемной фазы приводит к эффектам Иоффе и Ребиндера, аномальному скин-эффекту, нарушению закона Видемана – Франца, возникновению специфичных солитонов, краудионов, дискретных бризеров и пр. Таким образом, нанослой атомно-гладких металлов, как, впрочем, и любых твердых тел, и даже жидкостей, представляет собой квантовую наноструктуру, исследование которой начато и, надеемся, будет продолжаться.

Ключевые слова: модель, металл, структура, нанослой, мезослой, фаза, поверхность, дефект*Данная научная статья опубликована в рамках выполнения грантового финансирования на 2024–2026 гг. ИРН № AP32488258 (исследование финансируется МОН РК).***QUANTUM PROPERTIES OF THE SURFACE LAYER OF ATOMIC-SMOOTH METALS****¹Yurov V.M., ²Goncharenko V.I., ²Oleshko V.S., ¹Zhangozin K.N.**¹TSC Vostok LLP, Karaganda, Astana, e-mail: exciton@list.ru;²Moscow Aviation Institute (national research university), Moscow, e-mail: OleshkoVS@mai.ru

For the first time, the thickness of the surface layer of atomically smooth metals has been quantitatively determined without taking into account the roughness of their surface. The size of this layer is determined by one fundamental parameter – the molar volume of the element and is equal to 1–3 nm for pure metals, i.e. it is a nanostructure. The nanolayer of atomically smooth metals differs significantly from the mesolayer and the bulk phase by the presence of size effects of the collective type and is experimentally determined in ultrahigh vacuum by the method of X-ray diffraction at grazing angles. The nanolayer of atomically smooth metals contains 3–5 monolayers and is quantized in a closed system as a one-dimensional potential well with infinitely high walls. The discreteness of the energy levels in the nanolayer corresponds to the difference in the Fermi energy of each nanolayer. This is experimentally manifested in graphite crystals containing 3 monolayers. The first monolayer is graphene, the second is bilayer graphene, the third is trilayer graphene – they differ significantly from each other and from the bulk phase – graphite. Such a difference between the nanolayer of atomically smooth metals and the bulk phase leads to the Ioffe and Rebinde effects, the anomalous skin effect, the violation of the Wiedemann-Franz law, the emergence of specific solitons, crowdions, discrete breathers, etc. Thus, the nanolayer of atomically smooth metals, as well as any solids and even liquids, is a quantum nanostructure, the study of which has begun and, we hope, will continue.

Keywords: model, metal, structure, nanolayer, mesolayer, phase, surface, defect*This scientific article was published within the framework of grant funding for 2024–2026. IRN No. AP32488258 (the research is funded by the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan).***Введение**

Согласно современным представлениям [1] под поверхностной фазой понимают сверхтонкую пленку (поверхностный слой – ПС), находящуюся в равновесном состоянии с кристаллической основой (подложкой), свойства и структура которой от-

личны от объемных свойств. Однако теоретически толщина этого ПС была определена недавно в работе [2]. Уравнение для толщины ПС выглядит эмпирически следующим образом [2]:

$$R(I) = \alpha \cdot \frac{V}{S} \quad [M] \quad (1)$$

Толщина ПС некоторых АГМ [2]

АГМ	R(I), нм	АГМ	R(I), нм	АГМ	R(I), нм	АГМ	R(I), нм
Be	0.8 (3)	Cu	1.2 (3)	Mo	1.8 (5)	Re	1.5 (5)
Al	1.6 (4)	Ag	1.7 (4)	W	1.6 (5)	Fe	1.2 (3)
Si	2.1 (4)	Au	1.7 (4)	Mn	1.1 (2)	Co	1.1 (3)
Ge	2.4 (4)	Cr	1.2 (4)	Tc	1.4 (5)	Ni	1.1 (3)

В уравнение (1) входит только одна величина – молярный объем элемента, который равен $v = M / \rho$ (M – молярная масса, ρ – ее плотность), $S = 1\text{ м}^2$. $\alpha = 1,17 \cdot 10^{-9}$ – постоянная.

Для некоторых атомно-гладких металлов (АГМ) толщина ПС показана в таблице.

Цель исследования. В работе предлагается модель квантовой структуры поверхностного слоя атомно-гладких металлов и ее свойства.

Результаты исследования и их обсуждение

По формуле (1) и литературным данным о молярной массе M и плотности ρ вычислена толщина поверхностного слоя АГМ.

В таблице представлены кристаллы АГМ, отвечающие критерию Джексона [3, с. 40] – $\alpha = \Delta H / kT$, где ΔH – энтальпия, k – постоянная Больцмана, T – температура. Считается, что $\alpha > 4$ свидетельствует об АГМ, $\alpha < 2$ – о шероховатых металлах

(ШМ), значения же $2 < \alpha < 4$ соответствуют промежуточному типу поверхности. Из 54 металлов к ШМ относятся 11 металлов; к АГМ – 30 металлов; к промежуточному типу – 13 металлов.

Из таблицы следует, что толщина ПС АГМ составляет 1–2 нм, а число монослоев (в скобках таблицы, $n = R(I) / a$, a – постоянная кристаллической решетки) составляет 3–5. ПС $R(I)$ представляет собой наноструктуру. Движение электрона металла в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими «стенками» изложено во всех учебниках по квантовой физике. Уровни энергии E_n в такой яме равны

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2m_e L^2}. \quad (2)$$

Здесь m_e – масса электрона, L – глубина потенциальной ямы.

Учтем $L = R(I)$ и получена формула [2]:

$$\begin{aligned} A(z) / A(\infty) &= 1 - R(I) / R(I) + z, \quad 0 \leq z \leq R(I) - \text{нанослой,} \\ A(z) / A(\infty) &= 1 - R(I) / z, \quad R(I) \leq z \leq R(II) - \text{мезослой,} \\ A(z) &= \text{const} - \text{объемная фаза} \end{aligned} \quad (3)$$

где $A(z)$ – физическое свойство нано- и мезослоя; $A(\infty)$ – физическое свойство объема.

Если принять $A(z) = E_n(z)$ – уровню энергии, то при $1 - R(I) / R(I) + z \approx \exp[-(R(I) / R(I) + z)]$ $1 -$ будет в нанослое $E_n(z) = E_n / \exp[-(R(I) / R(I) + z)]$. После этого уровень E_n , то есть при $z = 0$ и при $z = R(I)$, будет равен: $E_n(z = 0) = E_n / e$; $E_n[z = R(I)] = E_n / e^{0.5}$. Здесь $E_n = E_n(\infty) = E_F$ – уровень Ферми. Все сказанное выше показано на рис. 1.

На рис. 1 представлена схема металла. Слой толщиной $R(I)$ назван нанослоем, где происходят размерные эффекты коллективного типа. В среднем он содержит 3 монослоя, которые отличны друг от друга. Особенно это проявляется для природного графита, где число монослоев также равно 3. Экспериментально толщину слоя $R(I)$ можно оценить методом рентгеновской дифракции под скользящими углами (РДСУ) [1]. Принципиальная схема метода РДСУ показана на рис. 1, б. Пучок X-лучей 2 из источника 1 попадает на образец 3 под углом α , равного от долей до одного градуса, Дифрагированный пучок под углом 2θ попадает на детектор 4. Несмотря на простоту схемы

метода РДСУ, провести измерение толщины поверхностного слоя чистых металлов $R(I)$ довольно сложно и вот почему. Чтобы измерить $R(I)$, нужно: во-первых, сверхвысокий вакуум – $10^{-9} - 10^{-10}$ Па [4; 5]; во-вторых, нужна атомно-гладкая поверхность [6; 7, с. 10]; в-третьих, довольно мощный источник X-лучей, в качестве которого в методе РДСУ используют синхротронное излучение [8; 9, с. 13]. Для кристаллов кремния метод РДСУ дает 3,1 нм [1, с. 88] и 2,0 нм [10, с. 181], а для золота – 1,2 нм [1, с. 88] и 1,9 нм [10, с. 181]. Средние величины для кремния $R(I) = 2,5$ нм и для золота $R(I) = 1,5$ нм, что почти совпадает с таблицей и подтверждает модель (1).

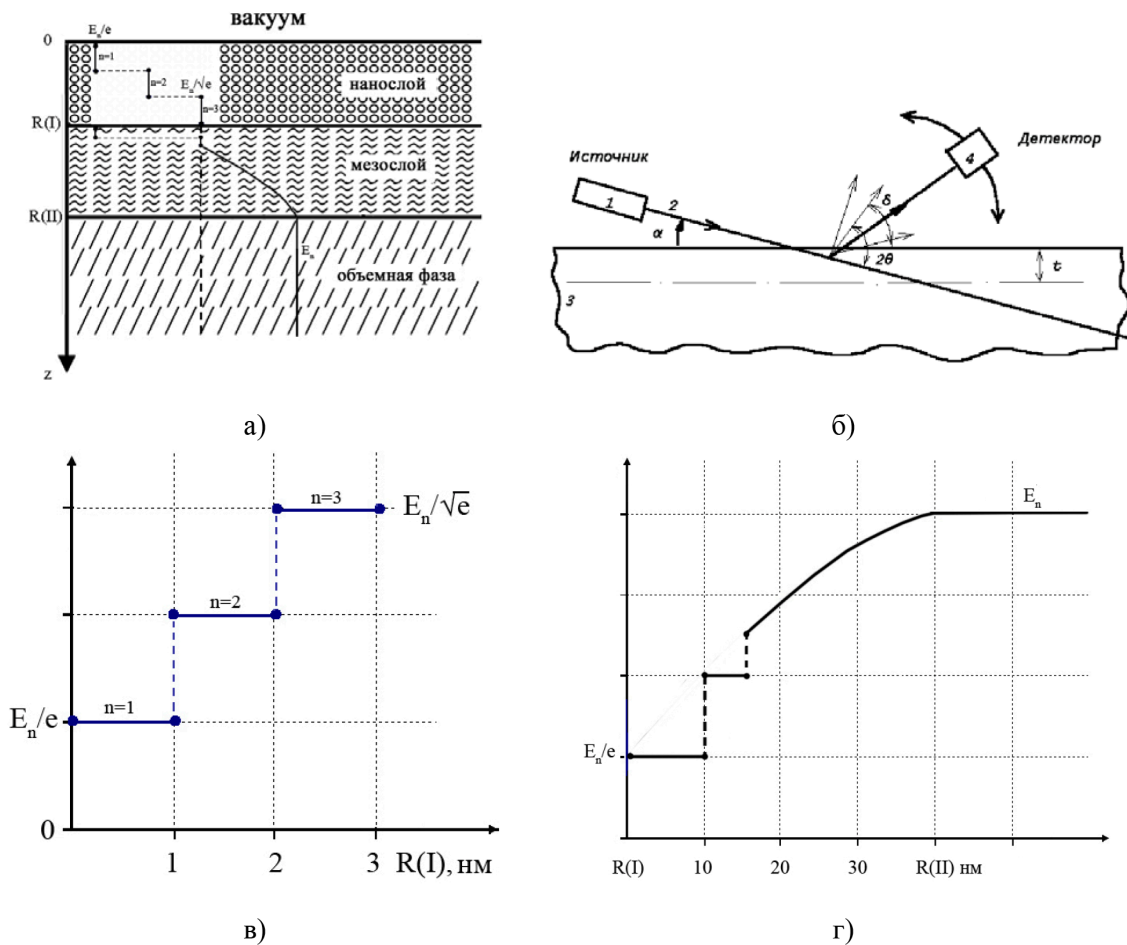


Рис. 1. Схема металла: нанослой \rightarrow мезослой \rightarrow объемная фаза (а); схема метода РДСУ (б); схема зависимости уровня энергии E_n в нанослое (в) и в мезослое (г)

Интерес к таким субмонослойным структурам (в нашем случае к нанослоям $R(I)$) возрос в последнее время в связи с созданием уникальных, невозможных в объемном состоянии, поверхностных биметаллических соединений. Обсуждается гигантский магниторезистивный эффект (GMR) [11]. Физической причиной гигантского магнитосопротивления металлических наноструктур является спин-зависимое рассеяние электронов проводимости. Эффект GMR реализуется в наноструктурах, у которых соседние ферромагнитные слои связаны обменным взаимодействием. Поэтому толщина слоев должна составлять десятые доли или единицы нанометров. Для получения максимального GMR выбирают толщину спейсера на первом максимуме эффекта около 0,9–1,2 нм. В качестве ферромагнитных используют железо, никель кобальт и их сплавы, металлы V, Cu, Ag, Au, Cr, Mo применяют как материал спейсера. Если сравнить с таблицей, то видно, эти толщины металлических наноструктур содержат 1–3 монослоя.

Из таблицы видно, что для АСМ триады железа (Fe, Co, Ni), включая Cu, $n=3$ монослоя, для АСМ Al, Si, Ge, Au, Ag, Cr $n=4$ монослоя, для АСМ Mo, W, Tc, Re $n=5$ монослоев.

Рис. 2, в, показывает, что уровень энергии $E_n(z)$ изменяется ступенчатым способом, а уровень энергии $E_n(x,y)$ изменяется непрерывно. Дискретность уровня $E_n(z)$ вызвана пространственным ограничением волновых функций системы.

В работе [12] приведен обзор результатов исследований квантово-размерных эффектов в тонких пленках металлов (Au, Ag) на поверхности тугоплавких металлов (W(110), Mo(110)) и d-металлов Ni(111), начиная с субмонослойных покрытий и до толщин порядка десяти монослоев, полученных методом фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением. В этой же работе показано, что поверхностный слой до 6–8 монослоев можно считать квантовой системой при любой температуре. Это подтверждают уравнение (1), таблица и рис. 2, в.

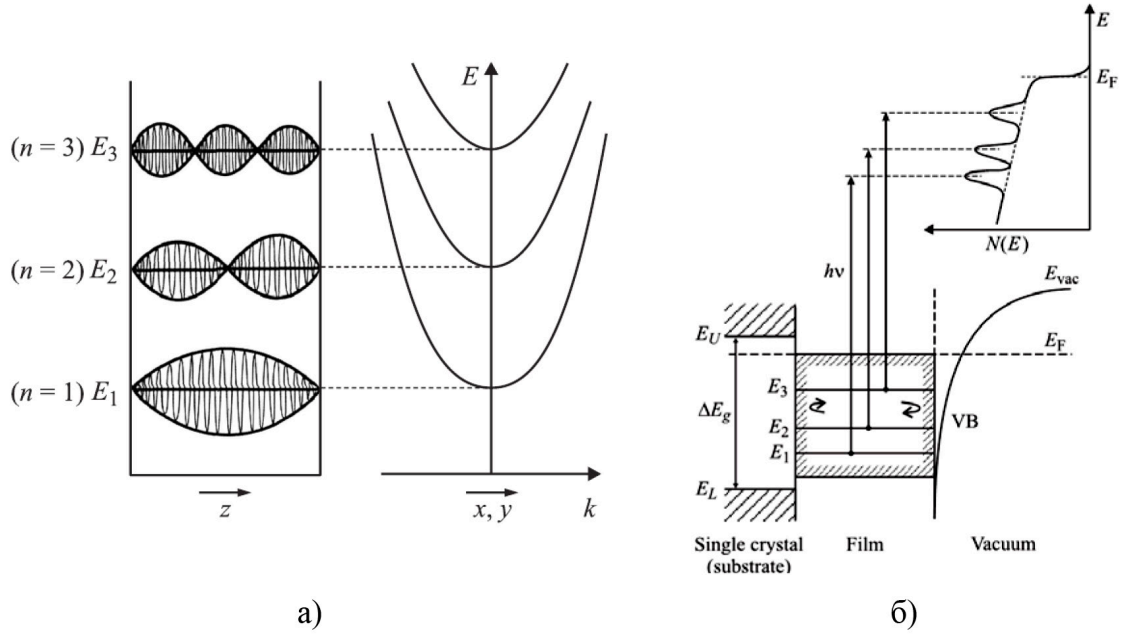


Рис. 2. Квантование вдоль оси z в виде электронных стоящих волн и дисперсионные зависимости в направлении (x,y) , имеющие непрерывный характер (а); ограничение волновых функций в пленке $d = L = R(I)$. Данное размерное ограничение приводит к квантованию электронной структуры валентной зоны (энергии E_1, E_2, E_3) (б) [12]

Поскольку уравнение (2) описывает качественно квантовые состояния слоя $R(I)$, то используют и другие модели. Суть классической фазовой модели [12] заключается в следующем: условия формирования стоячих электронных волн в пленке (рис. 2, а) определяются на основе учета фазовых изменений при отражении электронной волны от обеих границ пленки и при прохождении электронной волны внутри пленки (рис. 2, б), которые связаны следующим фазовым уравнением:

$$\Phi_C + \Phi_B + 2k(E)d = 2\pi n, \quad (4)$$

где Φ_C – изменение фазы при отражении от подложки (кристалла), Φ_B – изменение фазы при отражении от поверхностного потенциального барьера, $2kd$ – набег фазы при прохождении электронной волной толщины пленки ($d = L = R(I)$). При этом зависимость $k(E)$ определяется дисперсионными электронными соотношениями.

Если пленку металла заменить линейной атомной цепочкой, то уравнение (4) примет вид

$$(2kd) = 2 \arccos \left[2E / (E_U^* - E_L^*)^{-1} \right] N, \quad (5)$$

где E_U^* и E_L^* – верхняя и нижняя границы зоны, формирующей квантовые состояния.

Уравнение (5) представляет расширенную фазовую модель, его можно решить графически [12], но оно отвечает только одной квантовой цепочке. Из таблицы сле-

дует, что нужно учитывать 3–5 квантовых цепочек в слое $R(I)$.

Рассмотрим слой $R(I)$ с другой точки зрения. Соответствие поверхностного слоя (ПС) твердого тела его наночастице было предложено академиком А.И. Русановым [13]. Считается, что в наноструктурах роль температуры играет размер. Отсюда следует вывод, что поверхностный слой $R(I)$ представляет собой квантовую структуру при низкой температуре, поскольку $T \rightarrow R(I)$. В нашем случае поверхностный слой $R(I)$ представляет собой квантовую структуру при любой температуре.

В начале XX в. академик А.Ф. Иоффе исследовал кристалл поваренной соли $NaCl$ на прочностные свойства. В своем эксперименте он получил разрыв $NaCl$ на уровне $0,4 \text{ кг/мм}^2$, а Макс Борн по квантовой теории получил разрыв $NaCl$ на уровне 200 кг/мм^2 . А.Ф. Иоффе связал такое различие с существованием в ПС микротрещин. После этого он опуская кристалл $NaCl$ в воду и измерял микротвердость поверхности кристалла. Микротвердость поверхности увеличивалась при растворении ПС, стремясь к теоретическому значению 200 кг/мм^2 . Этот эксперимент был назван «эффектом Иоффе». Эффекту посвящено множество работ (например, [14]). Для кристалла $NaCl$ по (1) имеем $R(I) = 4,35 \text{ нм}$, и он содержит 8 монослоев. Нужно смыть 8 монослоев $NaCl$, чтобы получить эффект Иоффе [15].

Академик П.А. Ребиндер в 1956 г. совершил открытие, посвященное понижению прочности металлов под действием расплавов металла, а в дальнейшем адгезионному понижению прочности твердых тел за счет окружающей среды. Все это открыло новое направление в науке – физико-химическая механика. Обзор по эффекту Ребиндера по металлам и горным породам представлен в работе [16]. По современным представлениям основой эффекта Ребиндера является разрыв межатомных связей твердых тел при участии активных компонент внешней среды или под действием механической нагрузки. Макроскопическим индикатором этого процесса является снижение поверхностной энергии. Если обратиться к уравнению (3), то следует, что в ПС при $z = R(I)$ поверхностная энергия $\gamma[R(I)] \approx 0,3\gamma(\infty)$, то есть в три раза меньше объемной фазы [17], что подтверждает эффект Ребиндера наряду с прочими моментами [18].

Закон Видемана – Франца (ВФ) был установлен эмпирически в 1853 г. и связывает три параметра металла – коэффициенты электропроводности σ и температуропроводности λ с температурой T выглядит следующим образом:

$$\frac{\lambda}{\sigma \cdot T} = L_0, \quad (6)$$

где $L_0 = 2,21 \cdot 10^{-8}$ Вт Ом/К² – число Лоренца.

Нарушение закона ВФ рассматривалось в многочисленных работах, и это продолжается до сих пор. Отметим только некоторые из них. В работе [19] нарушение закона ВФ связывают с топологической природой волновой функции, отвечающей за транспорт электронов в металле. В качестве примера рассмотрен антиферромагнетик Mn_3Ge . Показано, что в широком диапазоне температур ($0,5 \text{ K} < T < 100 \text{ K}$) число Лоренца $L_0 = \text{const}$, а нарушение закона ВФ начинается при $T > 100 \text{ K}$. Считается, что при высоких температурах наблюдается конкуренция между температурой и распределением кривизны Берри. Кривизна электронов по Берри приводит к аномальному эффекту Холла, аномальному эффекту Нернста и аномальному эффекту Риги – Ледука. В работе [20] нарушение закона ВФ связывают с процессом зеркально-диффузного отражения электронов от поверхностей слоя. В основе лежит кинетическое уравнение Больцмана, что является обычным приемом.

Если за физическое свойство $A(z)$ из уравнения (3) принять параметр металла: σ , λ , T входящие в (6), то для числа Лоренца получим картину, аналогичную рис. 1, в, г, что и приводит к нарушению закона ВФ [21].

Аномальный скин-эффект траекторного типа связан с движением отдельных групп эффективных электронов. Эффективными являются такие электроны, которые в скин-слое движутся параллельно поверхности (слою $R(I)$). Эти электроны создают узкие всплески (листки) тока и поля, медленно затухающие вглубь металла. В недавней работе [22] сформулированы интегральные уравнения Фредгольма второго рода, описывающие поля волн ТЕ- и ТМ-поляризации в металлических пленках с учетом аномального скин-эффекта. Было подчеркнуто, что более корректное описание взаимодействия света с металлом, учитывающее пространственную нелокальность связи векторов \vec{j} и \vec{E} , возможно в рамках теории аномального скин-эффекта, основанной на совместном рассмотрении уравнений Максвелла и кинетического уравнения Больцмана и сводящей дело к решению интегро-дифференциальных уравнений для напряженности электрического поля в области металла.

Если за физическое свойство $A(z)$ из уравнения (3) принять удельное сопротивление Ω_0 массивного металла, то получим картину, аналогичную рис. 1, в, г. [23].

Постоянная кристаллической решетки a изменяется в слое $R(I)$ из-за реконструкции или релаксации поверхности металла. Это значит, что монослой металла можно представлять как квантовые нити (или квантовые плоскости) с энергией E_n . Квантовые нити в нанослое $R(I)$ можно трактовать как солитоны. В работе [18] показано, что нанослой $R(I)$ металла подвержен значительным внутренним напряжениям, которые вызывают большое число дефектов и нанотрещин. Эти дефекты могут в металле превращаться (помимо солитона) в краудион, даже при комнатной температуре. Краудионы, которые относятся к топологическим солитонам, в металлах являются очень подвижными, иногда сверхзвуковыми (обеспечивая массоперенос) по сравнению с другими точечными дефектами. Дискретную нелинейную цепочку на рис. 1, в, можно сопоставить дискретным бризерам, которые представляют из себя локализованные моды колебаний.

Заключение

Количественная квантовая модель поверхностного слоя атомно-гладких металлов, описанная уравнениями (1)–(3), может применяться к любым твердым телам. Если элемент поверхностного слоя твердого тела представить как нелинейный конденсатор – вариконд, из-за наличия размерных эффектов, то стали, сплавы черных и цветных металлов, композиционные и керамические

материалы можно представлять не как твердые растворы, а как совокупность варикондов, описанных уравнениями (1)–(3). Применяя методы компьютерного моделирования или искусственного интеллекта, можно прогнозировать различные материалы за счет внешнего воздействия: прокатка, термический и лазерный отжиг, ионная имплантация, нанесение покрытий и прочее, для их использования в нано- и микроэлектронике, в авиа- и самолетостроении, машиностроении и т.д.

Список литературы

1. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. М.: Наука, 2006. 490 с.
2. Юров В.М. Толщина поверхностного слоя атомарно-гладких кристаллов // Физ.-хим. аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2019. Вып. 11. С. 389–397. DOI: 10.26456/rcascnn/2019.11.389.
3. Григорьева В.Д. Рост сцинтилляционных кристаллов Li_2MoO_4 и $\text{Na}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ из расплава в условиях низких градиентов температур, их формообразование, оптические и болометрические свойства: дис. ... канд. хим. наук. Новосибирск, 2022. 122 с.
4. Анашин В.В., Краснов А.А., Семенов А.М., Шарафеева С.Р. Вакуумно-плотные соединения для получения сверхвысокого вакуума в вакуумных системах ускорителей с широкоапертурными камерами // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 3. С. 134–138. DOI: 10.1134/S0032816219030017.
5. Краснов А.А., Семенов А.М. Сосредоточенные сверхвысоковакуумные насосы на базе нераспыляемых геттеров // Известия РАН. Серия физическая. 2023. Т. 87, № 5. С. 646–651. DOI: 10.31857/S0367676522701186.
6. Drost R., Ojanen T., Harju A., Liljeroth P. Topological states in engineered atomic lattices. // Nat. Phys. Lett. 2017. Vol. 13. P. 668–672. DOI: 10.1038/nphys4080.
7. Щербакова Е.Н. Физика поверхности. Минск: Изд-во БНТУ, 2023. 151 с.
8. Shin S. New era of synchrotron radiation: fourth-generation storage ring // AAPS Bulletin. 2021. Vol. 31. № 1. P. 21. DOI: 10.1007/s43673-021-00021-4.
9. Эмурлаев К.И. Применение дифракции синхротронного рентгеновского излучения для анализа эволюции структуры углеродистых и легированных сталей в условиях сухого трения скольжения: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2022. 206 с.
10. Bracco G., Holst B. Surface Science Techniques. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. 663 p.
11. Ринкевич А.Б., Пахомов Я.А., Кузнецов Е.А., Клепикова А.С., Миляев М.А., Наумова Л.И., Устинов В.В. Микроволновой гигантский магниторезистивный эффект в сверхрешетках $[\text{CoFe/Cu}]_n$ с рекордным магнитосопротивлением // Журнал технической физики. 2019. Т. 45(5). С. 42–44. DOI: 10.21883/JTF.2019.05.47397.17614.
12. Шикин А.М., Адамчук В.К. Квантово-размерные эффекты в тонких слоях металлов на поверхности монокристаллов и их анализ // Физика твердого тела. 2008. Т. 50, № 6. С. 1121–1137.
13. Русанов А.И. Удивительный мир наноструктур // Журнал общей химии. 2002. Т. 72. Вып. 4. С. 532–349.
14. Баранов Ю.В. Эффект Иоффе на металлах. М.: МГИУ, 2005. 140 с.
15. Юров В.М., Гончаренко В.И., Олешко В.С., Жангозин К.Н. Об эффекте Иоффе в поверхностном слое // Endless light in science. Алматы, 2024. № 2/2. С. 22–25. DOI: 10.24412/2709-1201-2024-8-22-25.
16. Малкин А.И., Попов Д.А. Эффект Ребиндера в разрушении металлов и горных пород // Физика металлов и металловедение. 2022. Т. 123, № 12. С. 1313–1324. DOI: 10.31857/S0015323022600678.
17. Юров В.М., Гончаренко В.И., Олешко В.С. Исследование первичных нанотрещин атомарно-гладких металлов // Письма в ЖТФ. 2023. Т. 49, Вып. 8. С. 35–38. DOI: 10.21883/JTF.2023.08.55136.19504.
18. Юров В.М., Гончаренко В.И., Олешко В.С., Жангозин К.Н. Об эффекте Ребиндера в поверхностном слое // Endless light in science. Алматы, 2024. № 2/2. С. 26–30. DOI: 10.24412/2709-1201-2024-8-26-30.
19. Xu L., Li X., Lu X., Collignon C., Fu H., Koo J., Fauquer B., Yan B., Zhu Z. and Behnia K. Finite-temperature violation of the anomalous transverse Wiedemann-Franz law // Sci Adv. April 2020. Science Advances 6 (17): eaaz3522. DOI: 10.1126/sciadv.aaz3522.
20. Завитаев Э.В., Русаков О.В., Чухлеб Е.П. Электрическая проводимость тонкого металлического слоя с учетом отклонения от закона Видемана – Франца // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2022. № 8. С. 36–42. DOI: 10.31857/S1028096022080180.
21. Yurov V.M., Goncharenko V.I., Oleshko V.S. Deviations from the Wiedman-Franz law // International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”, Beijing, PRC. April 16, 2024. P. 203–209. DOI: 10.34660/INF.2024.27.51.198.
22. Сотский А.Б., Чудаков Е.А., Сотская Л.И. Эллипсометрия металлических пленок в условиях аномального скин-эффекта // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129, Вып. 7. С. 889–898. DOI: 10.21883/OS.2021.07.51080.1847-21.
23. Yurov V.M., Goncharenko V.I., Oleshko V.S. Surface layer thickness and an anomalous skin effect in metals // Proceedings of the International University Scientific Forum “Practice Oriented Science: UAE – RUSSIA – INDIA”. (July 3, 2024. UAE). P. 197–203. DOI: 10.34660/INF.2024.16.86.180.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ ГРАНУЛИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОЧЕТАЮЩИХ БИОАКТИВНЫЕ И АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

¹Солоненко А.П., ¹Шевченко А.Е., ¹Матюшенко А.А., ²Полонянкин Д.А.

¹Омский государственный медицинский университет, Омск, e-mail: annsolonenko@gmail.com;

²Омский государственный технический университет, Омск

Одним из важных свойств материалов, предназначенных для восстановления объема и целостности твердых тканей человека, является способность подавлять жизнедеятельность болезнетворных микроорганизмов. Как правило, данный эффект обеспечивается введением в имплантат антибиотиков. Также в качестве антибактериальных агентов может использоваться ряд металлов, в частности цинк, оказывающий влияние на процессы остеосинтеза и проявляющий антибактериальную активность. С учетом этого, путем сочетания синтетических биосовместимых солей кальция с оксидом цинка по эмульсионной технологии получены гранулированные пористые материалы. Цель данной работы – исследование динамики деградации в Трис-буфере сферических пористых гранул, включающих фосфат кальция, силикат кальция, желатин и варьируемое количество оксида цинка. В ходе химического анализа растворов и физико-химических исследований опытных образцов материалов установлено, что гранулы набухают в водном растворе. При этом все компоненты, входящие в их состав, постепенно растворяются. В результате фиксируется повышение pH, появление в системе ионов кальция и цинка, а также снижение содержания желатина в гранулах. Зафиксированное длительное монотонное выделение ионов цинка может обеспечить устойчивый антибактериальный эффект при имплантации гранул в место инфицированного костного дефекта.

Ключевые слова: сферические гранулы, резорбция, оксид цинка, гидроксипатит, волластонит

STUDY OF DEGRADATION OF GRANULATED MATERIALS COMBINING BIOACTIVE AND ANTIBACTERIAL COMPONENTS

¹Solonenko A.P., ¹Shevchenko A.E., ¹Matyushenko A.A., ²Polonyankin D.A.

¹Omsk State Medical University, Omsk, e-mail: annsolonenko@gmail.com;

²Omsk State Technical University, Omsk

One of the important properties of materials for restoration of human hard tissues volume and integrity is the ability to suppress the vital activity of pathogenic microorganisms. As a rule, this effect is achieved by introducing antibiotics into the implant. Also, a number of metals can be used as antibacterial agents, in particular zinc, which influences the processes of osteosynthesis and exhibits antibacterial activity. Taking this into account, granular porous materials were obtained by combining synthetic biocompatible calcium salts with zinc oxide using emulsion technology. The purpose of this work is to study the dynamics of degradation in Tris-buffer of spherical porous granules, including calcium phosphate, calcium silicate, gelatin and a varying amount of zinc oxide. According to the data of chemical analysis of solutions and physicochemical studies of materials, granules swell in an aqueous media. All granules' components dissolve gradually. As a result, pH of the surrounding solution increase, calcium and zinc ions appear in the system, gelatin content in the materials decrease. The recorded long-term monotonous release of zinc ions can provide a stable antibacterial effect when implanting granules into the site of an infected bone defect.

Keywords: spherical granules, resorption, zinc oxide, hydroxyapatite, wollastonite

Введение

При разработке материалов, предназначенных для восстановления дефектов твердых тканей человека, большое внимание уделяется их составу с точки зрения регулирования сохранности имплантата в организме, возможности и скорости его резорбции, придания необходимых механических свойств, создания пористой структуры. Формирование столь разноплановых характеристик возможно за счет сочетания в одном материале компонентов, различных по своей природе и свойствам. Так, например, смешение фосфатов и силикатов кальция, различающихся между собой величиной произведения растворимости,

позволяет получать композиты с варьируемой скоростью растворения [1]. Введение в материал компонентов, выгорающих при прокаливании, обеспечивает появление системы взаимосвязанных открытых пор в структуре продукта [2], что необходимо для успешной остеоинтеграции имплантата в твердую ткань, его долгосрочной физической стабильности. Для модифицирования механических свойств используются добавки полимерных или неорганических волокон, частиц или упрочняющих фаз [3, 4].

Также возможно придание материалам антибактериальных свойств. Данное направление исследований перспективно ввиду стремления к снижению лекар-

ственной нагрузки на организм человека при замещении дефектов, осложненных бактериальной инфекцией. Разрабатываются покрытия на металлических имплантах, керамики, гранулы, включающие антибиотики [5,6,7]. Однако в связи с развивающейся устойчивостью патогенных штаммов бактерий по отношению к известным антимикробным препаратам актуально создание материалов с альтернативными компонентами, проявляющими бактерицидные свойства. К числу последних можно отнести ряд металлов: серебро, цинк, медь, железо и др. [8]. Широко исследуется введение Ag в состав биоматериалов различной природы [9,10]. Перспективно также использование соединений цинка, ввиду его жизненной необходимости для человека. В работе [11] цинк характеризуют как кальций XXI столетия, поскольку данный элемент входит в состав 70 ферментов, включая щелочную фосфатазу, участвует в усвоении силикатов, играет ключевую роль в регуляции гомеостаза костной ткани, ингибирует резорбцию кости остеокластами, стимулирует дифференцировку и пролиферацию клеток, минерализацию кости остеобластами, проявляет антибактериальные свойства.

На основании вышесказанного выполнена серия экспериментов по получению композитных остеопластических материалов в виде полидисперсных образцов гранул, сочетающих фосфат и силикат кальция (биоактивные компоненты) с оксидом цинка, потенциально способным ингибировать рост бактерий. Последнее возможно при условии выделения ионов цинка в среду, окружающую имплант. В этой связи актуально изучение особенностей из деградации в прототипах биологических жидкостей.

Цель данной работы – исследование динамики деградации сферических пористых гранул, включающих фосфат кальция (гидроксиапатит, ГА, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), силикат кальция (волластонит, ВТ, $\beta\text{-CaSiO}_3$), желатин и варьируемое количество оксида цинка (ZnO).

Материалы и методы исследования

Экспериментальные образцы гранул получены по суспензионной технологии с использованием композитного порошка, включающего 60 мас. % $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ и 40 мас. % $\beta\text{-CaSiO}_3$, синтезированного согласно патенту РФ № 2657817, и порошка оксида цинка, осажденного щелочью из водного раствора ZnCl_2 и просушенного на воздухе при 300°C . Минеральная составляющая гранул включала 5, 10, 15, 20 или 25 мас.% ZnO. Согласно данным физико-химических исследований образцы имеют пористую структуру, открытую пористость до 60 %, истинную плотность в районе 2.5 г/см^3 .

В ходе эксперимента оценивали набухание гранул (изменение их размеров и массы) при выдерживании в Трис-буфере с $\text{pH} = 7.40$, как описано в работе [12].

Динамику растворения гранул изучали по изменению pH раствора и концентрации в нем ионов кальция и цинка. Соотношение массы частиц к объему Трис-буфера составляло 1:2. Каждые сутки из системы отбирали порцию раствора для анализа. pH измеряли на pH-метре «pH-150МИ», укомплектованном электродом «ЭСК-10314/7» (Измерительная техника). Концентрации ионов Ca^{2+} и Zn^{2+} в растворах определяли спектрофотометрическим методом по интенсивности окраски раствора Арсеназо III и сульфарсазена, соответственно. Все эксперименты проведены в статичных условиях при температуре $22 \pm 2^\circ\text{C}$ в трехкратной повторности.

Гранулы исследовали на микроскопе «Микромед 3 (вар. 3-20М)» (Наблюдательные приборы), оснащенном видеокамерой и программой «TourView» для обработки изображений. Также выполнен анализ материалов с применением ИК-Фурье-спектроскопии на ИК-спектрометре «ФТ-801» с ПО «ZaIR 3.5» (Симекс) и сканирующей электронной микроскопии на электронном микроскопе «JCM-5700» (JEOL).

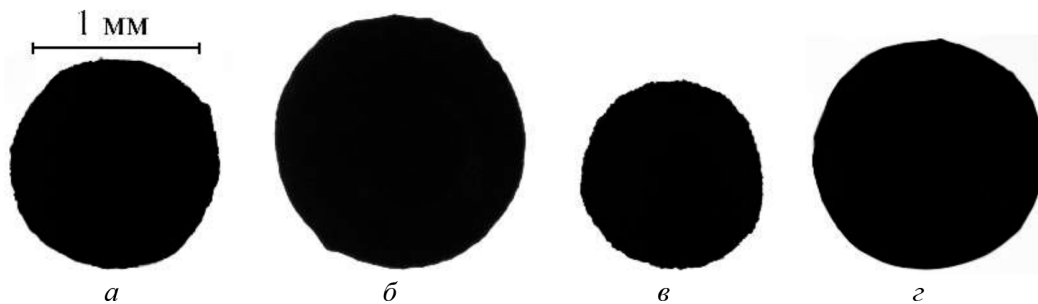


Рис. 1. Фотографии гранул, содержащих 15 мас.% ZnO (а, б) и 25 мас.% ZnO (в, з) до (а, в) и после (б, з) выдерживания в Трис-буфере в течение 1 суток

Результаты исследования и их обсуждение

Установлено, что при выдерживании гранул в Трис-буфере происходит их набухание. Частицы увеличиваются в диаметре до 20% за счет набухания связующего (рис. 1). Также во времени растет масса материалов (рис. 2а). Наибольший прирост происходит в первый час контакта частей системы. Очевидно, это связано с заполнением жидкой фазой пор во внутренней структуре частиц и гидратацией желатина. Степень набухания (S) для всех образцов через 7 ч слабо изменяется. Вероятно, в данный период завершается формирование на поверхности гранул гидратированного слоя и начинается активный ионный обмен между твердой фазой и раствором. Об этом свидетельствует резкое повышение pH системы на начальном этапе эксперимента и появление в растворах ионов кальция и цинка (рис. 2б-г).

Установлено отсутствие достоверного различия зафиксированных значений pH и концентрации ионов кальция и цинка в растворах, контактировавших с образцами с варьруемым содержанием ZnO (рис. 2б-г). При этом величина pH и концентрация ионов Ca^{2+} изменяются схожим образом: на зависимостях $pH = f(t)$ и $C(Ca^{2+}) = f(t)$ виден резкий скачок измеряемых параметров через 1 сутки контакта гранул всех изучаемых соста-

вов с Трис-буфером, далее до 10 суток водородный показатель и количество кальция в среде быстро падают, после 10-ти суток оба показателя медленно снижаются. Вероятно, это связано с быстрой гидратацией поверхности и компонентов гранул, протекающей со связыванием протонов из среды и их обменом на кальций из состава $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ и $\beta-CaSiO_3$. Наблюдаемое в дальнейшем снижение pH и количества ионов кальция в системах может быть связано с протеканием процессов вторичной кристаллизации аморфного фосфата кальция в щелочной среде.

По рис. 2г видно, что концентрация ионов цинка в растворах монотонно увеличивается на всем протяжении эксперимента. Хотя достоверного различия между значениями концентрации Zn^{2+} в растворах, контактировавших с образцами с варьруемым содержанием ZnO, не выявлено, можно отметить, что количество ионов цинка в системах с гранулами, содержащими 25 мас.% ZnO, превышает таковое для гранул с 5 мас.% ZnO на 5 – 20 мкмоль/л. По окончании эксперимента, через 60 дней контакта материалов с 25 мас.% ZnO с Трис-буфером в растворах содержится до 83 мкмоль/л Zn^{2+} , что соответствует растворению примерно 10% цинка от его исходного содержания в гранулах.

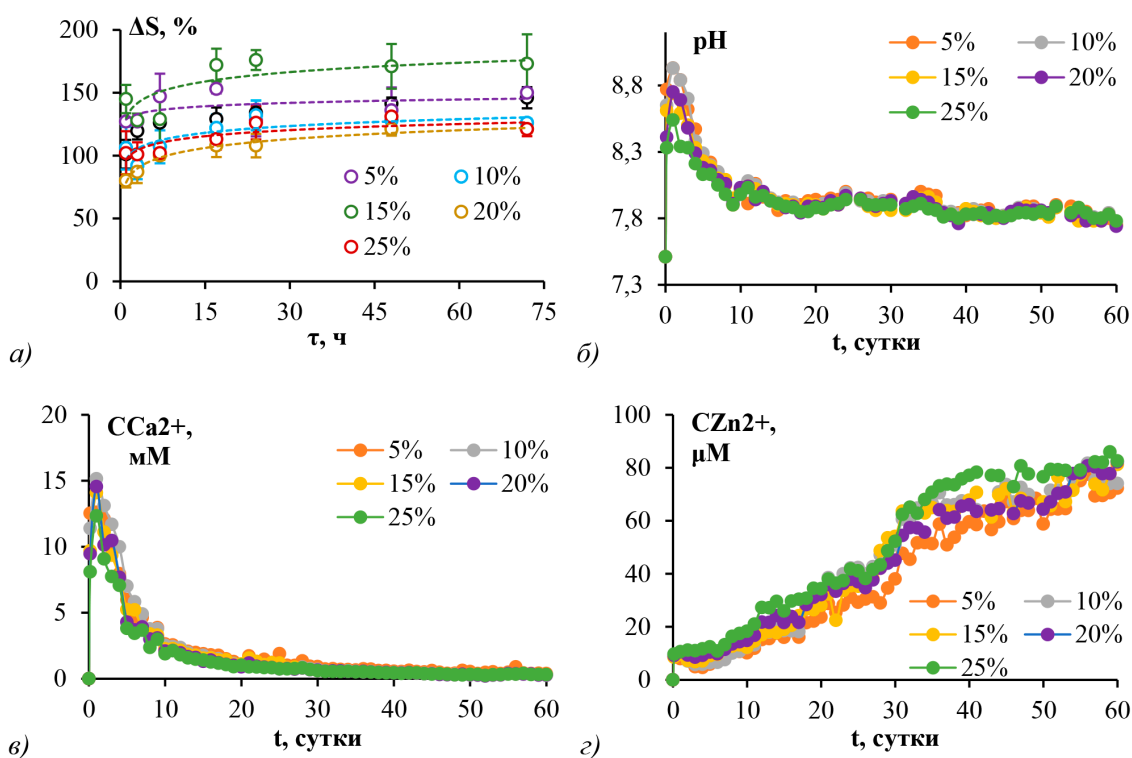


Рис. 2. Зависимости степени набухания гранул (а), pH (б), концентрации ионов кальция (в) и цинка (з) в растворах от содержания ZnO в материалах

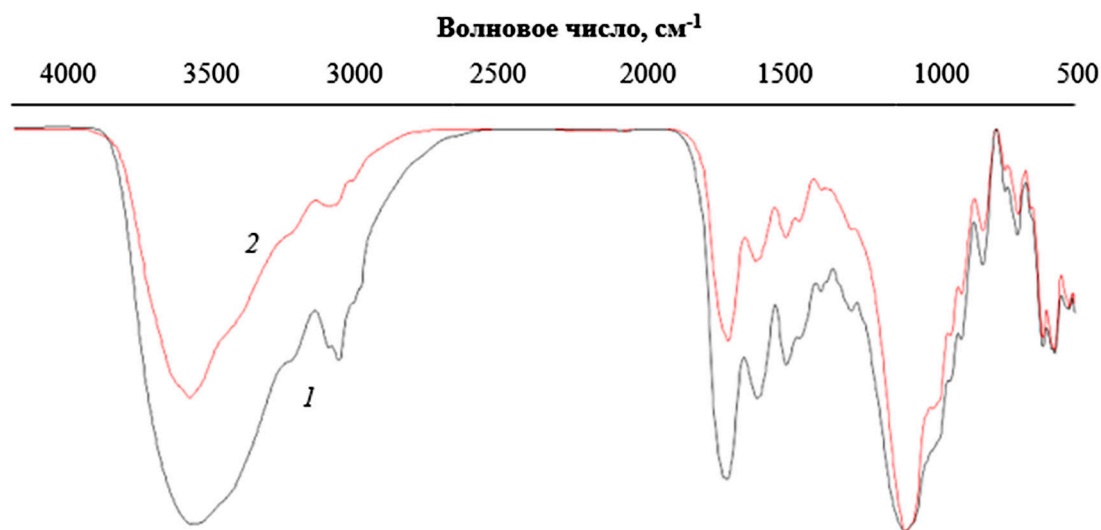


Рис. 3. ИК-спектры гранул, содержащих 25 мас.% ZnO, в исходном состоянии (1) и после 28 суток выдерживания в Трис-буфере (2)

Результаты исследования методом ИК-Фурье-спектроскопии образцов, контактировавших с Трис-буфером в течение 28 суток, указывают на то, что наряду с минеральными компонентами гранул также растворяется желатин (связующее). По рис. 3 заметно снижение интенсивности полос колебаний функциональных группировок, входящих в состав желатина, расположенных в областях $1200 - 1600 \text{ см}^{-1}$ и $2700 - 3000 \text{ см}^{-1}$. О неполном удалении связующего из состава материалов за указанный период также свидетельствует сохранность сферической формы гранул, наблюдающаяся в эксперименте (рис. 4).

В ИК-спектрах гранул, контактировавших с Трис-буфером, не отмечено колебаний, не относящихся к исходным компонентам гранул. Спектры образцов в исходном состоянии и после 28 суток выдерживания в модельном растворе характеризуются набором полос поглощения группировок, входящих в состав гидроксиапатита ($563, 603, 630, 962, 1026, 1087 \text{ см}^{-1}$ [13]), волластонита ($568, 647, 684, 828, 905, 935, 968, 1020, 1063, 1200$ (плечо) см^{-1} [14]) и желатина (оксид цинка не имеет собственных полос поглощения в области $500 - 4000 \text{ см}^{-1}$). Это позволяет сделать вывод о неизменности качественного состава основного объема гранул. При этом заметно снижение интенсивности полос поглощения группировок Si-O, образующих $\beta\text{-CaSiO}_3$, по истечении 4 недель контакта с водной средой. Очевидно, это связано с большей растворимостью фазы силиката кальция в сравнении с апатитом.

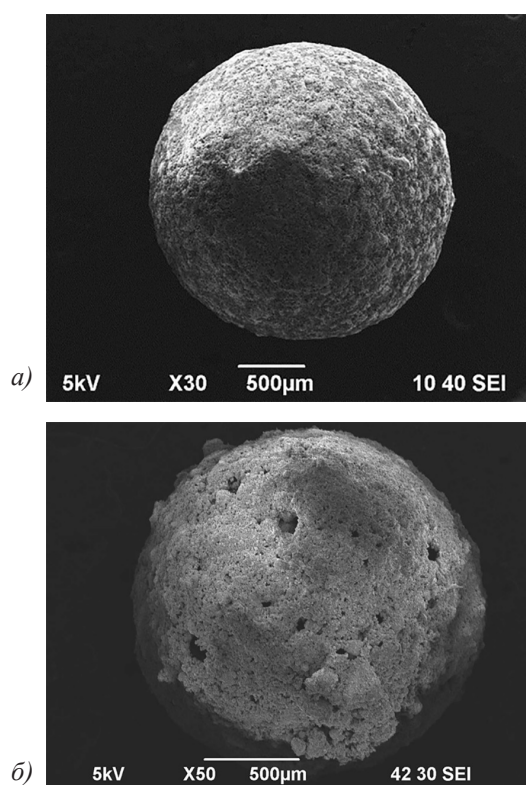


Рис. 4. Микрофотографии гранул, содержащих 25 мас.% ZnO, в исходном состоянии (а) и после 28 суток выдерживания в Трис-буфере (б)

На рис. 4 представлены микрофотографии гранул исходного состояния и после 28 суток выдерживания в Трис-буфере. Видно, что после контакта с водной средой на поверхности сфер появляется большое

число пор с диаметром от единиц до нескольких десятков микрометров, гранулы становятся более пористыми. Таким образом, результаты исследования материалов методом сканирующей электронной микроскопии также указывают на постепенное преобразование композитных частиц в результате растворения входящих в их состав компонентов.

Заклучение

По результатам выполненного исследования установлено, что синтетические пористые композитные гранулы, сочетающие в своем составе фосфат кальция (гидроксиапатит), силикат кальция (волластонит), желатин и оксид цинка (до 25 мас.%), постепенно деградируют в водном слабощелочном растворе. При этом растворяются все компоненты материалов. Ионы цинка длительно монотонно выделяются в окружающую среду, что может обеспечить устойчивый антибактериальный эффект при имплантации гранул в место инфицированного костного дефекта. При этом варьирование количества ZnO в составе материалов, вероятно, позволит регулировать длительность растворения данной добавки и, соответственно, период противомикробного действия имплантата.

Список литературы

1. Deng Y., Jiang C., Li C., Li T., Peng M., Wang J., Dai K. 3D printed scaffolds of calcium silicate-doped β -TCP synergize with co-cultured endothelial and stromal cells to promote vascularization and bone formation // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. P. 5588. DOI: 10.1038/s41598-017-05196-1.
2. Сафронова Т.В., Путляев В.И., Иванов В.К., Кнотько А.В., Шаталова Т.Б. Порошковые смеси на основе гидрофосфата аммония и карбоната кальция для получения биосовместимой пористой керамики в системе CaO-P₂O₅ // *Новые огнеупоры*. 2015. № 9. С. 45-53. DOI: 10.17073/1683-4518-2015-9-45-53.
3. Buriti J.S., Barreto M.E.V., Santos K.O., M.V.L. Fook. Thermal, morphological, spectroscopic and biological study of chitosan, hydroxyapatite and wollastonite biocomposites // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2018. Vol. 134. P. 1521-1530. DOI: 10.1007/s10973-018-7498-y.
4. Demirkol N., Turan M. Production and characterization of ternary sheep hydroxyapatite (SHA)-wollastonite (W)-commercial inert glass (CIG) biocomposite // *Research on Engineering Structures & Materials*. 2019. Vol. 5. No. 2. P. 167-174. DOI: 10.17515/resm2018.68is0919.
5. Sedelnikova M.B., Komarova E.G., Sharkeev Y.P., Chebodaeva V.V., Tolkacheva T.V., Kondranova A.M., Zakharenko A.M., Bakina O.V. Effect of the porosity, roughness, wettability, and charge of micro-arc coatings on the efficiency of doxorubicin delivery and suppression of cancer cells // *Coatings*. 2020. Vol. 10. No. 7. P. 664. DOI: 10.3390/coatings10070664.
6. Nguyen N.H., Lu Z., Elbourne A., Vasilev K., Roohani I., Zreiqat H., Truong V.K. Engineering antibacterial bioceramics: Design principles and mechanisms of action // *Materials Today Bio*. 2024. Vol. 26. P. 101069. DOI: 10.1016/j.mtbio.2024.101069.
7. Howlin R.P., Brayford M.J., Webb J.S., Cooper J.J., Aiken S.S., Stoodley P. Antibiotic-loaded synthetic calcium sulfate beads for prevention of bacterial colonization and biofilm formation in periprosthetic infections // *Antimicrobial Agents Chemotherapy*. 2015. Vol. 59. No. 1. P. 111-120. DOI: 10.1128/AAC.03676-14.
8. Леонтьев В.К., Кузнецов Д.В., Фролов Г.А., Погорельский И.П., Латуца Н.В., Карасенков Я.Н. Антибактериальные эффекты наночастиц металлов // *Российский стоматологический журнал*. 2017. Т. 21, № 6. С. 304-307. DOI: 10.18821/1728-2802-2017-21-6-304-307.
9. Permyakova E.S., Manakhov A., Kiryukhantsev-Korneev P.V., Konopatsky A.S., Makarets Y.A., Kotyakova K.Y., Filippovich S.Y., Ignatov S.G., Solovieva A.O., Shtansky D.V. Self-Sanitizing Polycaprolactone Electrospun Nanofiber Membrane with Ag Nanoparticles // *Journal of Functional Biomaterials*. 2023. Vol. 14. No. 7. P. 336. DOI: 10.3390/jfb14070336.
10. Aswad M.A., Rashed H.K., Selman A. Preparation and Characterization of Bioceramic Composite Based on Hydroxyapatite and Silver Nanoparticles // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. Vol. 14. No. 9. P. 10659-10664. DOI: 10.36478/jeasci.2019.10659.10664.
11. Su Y., Cockerill I., Wang Y., Qin Y.-X., Chang L., Zheng Y., Zhu D. Zinc-Based Biomaterials for Regeneration and Therapy // *Trends Biotechnology*. 2019. Vol. 37. P. 428-441. DOI: 10.1016/j.tibtech.2018.10.009.
12. Солоненко А.П., Шевченко А.Е., Полонянкин Д.А. Исследование динамики резорбции в Трис-буфере гранул на основе гидроксиапатита, волластонита и желатина // *Неорганические материалы*. 2023. Т. 59, № 3. С. 341-348. DOI: 10.31857/S0002337X23030144.
13. Hossain M.S., Ahmed S. FTIR spectrum analysis to predict the crystalline and amorphous phases of hydroxyapatite: a comparison of vibrational motion to reflection // *RSC Advances*. 2023. Vol. 13. P. 14625-14630. DOI: 10.1039/d3ra02580b.
14. Handke M. FT-IR isotopic shifted spectra of calcium silicates // *Fourier and computerized infrared spectroscopy*. 1985. Vol. 553. P. 395-396. DOI: 10.1117/12.970876.