

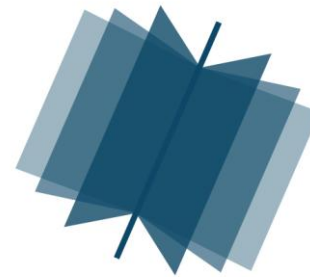
№ 9 (75) ▪ 2018
Часть 1 ▪ Сентябрь

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЖУРНАЛ**

INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL

**ISSN 2303-9868 PRINT
ISSN 2227-6017 ONLINE**

Екатеринбург
2018



Периодический теоретический и научно-практический журнал.
Выходит 12 раз в год.
Учредитель журнала: Соколова М.В.
Главный редактор: Меньшаков А.И.
Адрес издателя и редакции: 620075, г. Екатеринбург, ул.
Красноармейская, д. 4, корп. А, оф. 17.
Электронная почта: editors@research-journal.org
Сайт: www.research-journal.org
16+

**№ 9 (75) 2018
Часть 1
Сентябрь**

Дата выхода 17.09.2018.
Подписано в печать 17.09.2018.
Тираж 900 экз.
Цена: бесплатно
Заказ 34008.
Отпечатано с готового оригинал-макета.
Отпечатано в типографии ООО "Компания ПОЛИГРАФИСТ",
623701, г. Березовский, ул. Театральная, дом № 1, оф. 88.

Журнал имеет свободный доступ, это означает, что статьи можно читать, загружать, копировать, распространять, печатать и ссылаться на их полные тексты с указанием авторства без каких-либо ограничений. Тип лицензии CC поддерживаемый журналом: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0). Актуальная информация об индексации журнала в библиографических базах данных <https://research-journal.org/indexing/>.

Номер свидетельства о регистрации в Федеральной Службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций: **ПИ № ФС 77 – 51217.**

Члены редколлегии:

Филологические науки:

Растягеев А.В. д-р филол. наук, Московский Городской Университет (Москва, Россия);
Сложеникина Ю.В. д-р филол. наук, Московский Городской Университет (Москва, Россия);
Штрекер Н.Ю. к.филол.н., Калужский Государственный Университет имени К.Э. Циолковского (Калуга, Россия);
Вербицкая О.М. к.филол.н., Иркутский Государственный Университет (Иркутск, Россия).

Технические науки:

Пачурин Г.В. д-р техн. наук, проф., Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (Нижний Новгород, Россия);
Федорова Е.А. д-р техн. наук, проф., Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (Нижний Новгород, Россия);
Герасимова Л.Г. д-р техн. наук, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева (Апатиты, Россия);
Курасов В.С. д-р техн. наук, проф., Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Россия);
Оськин С.В. д-р техн. наук, проф. Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Россия).

Педагогические науки:

Куликовская И.Э. д-р пед. наук, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Россия);
Сайкина Е.Г. д-р пед. наук, Российский государственный педагогический университет имени А.И. Герцена (Санкт-Петербург, Россия);
Лукьянова М.И. д-р пед. наук, Ульяновский государственный педагогический университет им. И.Н. Ульянова (Ульяновск, Россия);
Ходакова Н.П. д-р пед. наук, проф., Московский городской педагогический университет (Москва, Россия).

Психологические науки:

Розенова М.И. д-р психол. наук, проф., Московский государственный психолого-педагогический университет (Москва, Россия);
Иевков Н.Н. д-р психол. наук, Российская академия образования (Москва, Россия);
Каменская В.Г. д-р психол. наук, к. биол. наук, Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина (Елец, Россия).

Физико-математические науки:

Шамолин М.В. д-р физ.-мат. наук, МГУ им. М. В. Ломоносова (Москва, Россия);
Глезер А.М. д-р физ.-мат. наук, Государственный Научный Центр ЦНИИчермет им. И.П. Бардина (Москва, Россия);
Свиштунов Ю.А. д-р физ.-мат. наук, проф., Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия).

Географические науки:

Умывакин В.М. д-р геогр. наук, к.техн.н. проф., Военный авиационный инженерный университет (Воронеж, Россия);
Брылев В.А. д-р геогр. наук, проф., Волгоградский государственный социально-педагогический университет (Волгоград, Россия);
Огуреева Г.Н. д-р геогр. наук, проф., МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, Россия).

Биологические науки:

Буланый Ю.П. д-р биол. наук, Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (Саратов, Россия);
Аникин В.В. д-р биол. наук, проф., Саратовский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского (Саратов, Россия);
Еськов Е.К. д-р биол. наук, проф., Российский государственный аграрный заочный университет (Балашиха, Россия);
Шеуджен А.Х. д-р биол. наук, проф., Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Россия);

Ларионов М.В. д-р биол. наук, профессор, Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (Саратов, Россия).

Архитектура:

Янковская Ю.С. д-р архитектуры, проф., Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург, Россия).

Ветеринарные науки:

Алиев А.С. д-р ветеринар. наук, проф., Санкт-Петербургская государственная академия ветеринарной медицины (Санкт-Петербург, Россия);

Татарникова Н.А. д-р ветеринар. наук, проф., Пермская государственная сельскохозяйственная академия имени академика Д.Н. Прянишникова (Пермь, Россия).

Медицинские науки:

Никольский В.И. д-р мед. наук, проф., Пензенский государственный университет (Пенза, Россия);

Ураков А.Л. д-р мед. наук, Ижевская Государственная Медицинская Академия (Ижевск, Россия).

Исторические науки:

Меерович М.Г. д-р ист. наук, к.архитектуры, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия);

Бакулин В.И. д-р ист. наук, проф., Вятский государственный университет (Киров, Россия);

Бердинских В.А. д-р ист. наук, Вятский государственный гуманитарный университет (Киров, Россия);

Лёвочкина Н.А. к.ист.наук, к.экон.н. ОмГУ им. Ф.М. Достоевского (Омск, Россия).

Культурология:

Куценков П.А. д-р культурологии, к.искусствоведения, Институт востоковедения РАН (Москва, Россия).

Искусствоведение:

Куценков П.А. д-р культурологии, к.искусствоведения, Институт востоковедения РАН (Москва, Россия).

Философские науки:

Петров М.А. д-р филос. наук, Института философии РАН (Москва, Россия);

Бессонов А.В. д-р филос. наук, проф., Институт философии и права СО РАН (Новосибирск, Россия);

Цыганков П.А. д-р филос. наук., МГУ имени М.В. Ломоносова (Москва, Россия);

Лойко О.Т. д-р филос. наук, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск, Россия).

Юридические науки:

Костенко Р.В. д-р юрид. наук, проф., Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Россия);

Мазуренко А.П. д-р юрид. наук, Северо-Кавказский федеральный университет г. Пятигорске (Пятигорск, Россия);

Мещерякова О.М. д-р юрид. наук, Всероссийская академия внешней торговли (Москва, Россия);

Ершашев Е.Р. д-р юрид. наук, проф., Уральский государственный юридический университет (Екатеринбург, Россия).

Сельскохозяйственные науки:

Важов В.М. д-р с.-х. наук, проф., Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В.М. Шукшина (Бийск, Россия);

Раков А.Ю. д-р с.-х. наук, Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр (Михайловск, Россия);

Компаний В.И. д-р с.-х. наук, проф., Кубанский государственный аграрный университет (Краснодар, Россия);

Никитин В.В. д-р с.-х. наук, Белгородский научно-исследовательский институт сельского хозяйства (Белгород, Россия);

Наумкин В.П. д-р с.-х. наук, проф., Орловский государственный аграрный университет.

Социологические науки:

Замараева З.П. д-р социол. наук, проф., Пермский государственный национальный исследовательский университет (Пермь, Россия);

Солодова Г.С. д-р социол. наук, проф., Институт философии и права СО РАН (Новосибирск, Россия);

Кораблева Г.Б. д-р социол. наук, Уральский Федеральный Университет (Екатеринбург, Россия).

Химические науки:

Абдиев К.Ж. д-р хим. наук, проф., Казахстанско-Британский технический университет (Алма-Аты, Казахстан);

Мельдешов А. д-р хим. наук, Казахстанско-Британский технический университет (Алма-Аты, Казахстан);

Скачилова С.Я. д-р хим. наук, Всероссийский Научный Центр По Безопасности Биологически Активных Веществ (Купавна Старая, Россия).

Науки о Земле:

Горяинов П.М. д-р геол.-минерал. наук, проф, Геологический институт Кольского научного центра Российской академии наук (Апатиты, Россия).

Экономические науки:

Бурда А.Г. д-р экон. наук, проф., Кубанский Государственный Аграрный Университет (Краснодар, Россия);

Лёвочкина Н.А. д-р экон. наук, к.ист.н., ОмГУ им. Ф.М. Достоевского (Омск, Россия);

Ламоттке М.Н. к.экон.н., Нижегородский институт управления (Нижний Новгород, Россия);

Акбулаев Н. к.экон.н., Азербайджанский государственный экономический университет (Баку, Азербайджан);

Кулиев О. к.экон.н., Азербайджанский государственный экономический университет (Баку, Азербайджан).

Политические науки:

Завершинский К.Ф. д-р полит. наук, проф. Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Россия).

Фармацевтические науки:

Тринеева О.В. к.фарм.н., Воронежский государственный университет (Воронеж, Россия);

Кайшева Н.Ш. д-р фарм. наук, Волгоградский государственный медицинский университет (Волгоград, Россия);

Ерофеева Л.Н. д-р фарм. наук, проф., Курский государственный медицинский университет (Курс, Россия);

Папанов С.И. д-р фарм. наук, Медицинский университет (Пловдив, Болгария);

Петкова Е.Г. д-р фарм. наук, Медицинский университет (Пловдив, Болгария);

Скачилова С.Я. д-р хим. наук, Всероссийский Научный Центр По Безопасности Биологически Активных Веществ (Купавна Старая, Россия);

Ураков А.Л., д-р мед. наук, Государственная Медицинская Академия (Ижевск, Россия).

**Екатеринбург
2018**

ОГЛАВЛЕНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

ПОСТРОЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ ПРИТЯЖЕНИЯ ПРИ ВЫРОЖДЕНИИ СИНГУЛЯРНО ВОЗМУЩЕННЫХ УРАВНЕНИЙ Алыбаев К.С., Мурзабаева А.Б.	7
РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ Голик С.С., Лисица В.В., Майор А.Ю., Толстоногова Ю.С., Бабий М.Ю., Нагорный И.Г.	12
О РАЗРЕШИМОСТИ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ СИСТЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ С ПАРАМЕТРОМ Джээнбаева Г.А.	17
СМЕШАННАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ОДНОГО КВАЗИЛИНЕЙНОГО ПАРАБОЛИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ С ГИСТЕРЕЗИСОМ Исаева С.Э.	24
ПОСТРОЕНИЕ РАЗМЕЧЕННЫХ МНОЖЕСТВ ПРИМЕНЕНИЕМ ГАРМОНИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ Мурзабаева А.Б.	32
МИНИМАЛЬНЫЕ И МАКСИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ УПРУГИХ МОДУЛЕЙ И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА МОНОКРИСТАЛЛОВ TiFe И TiNi С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ Муслов С.А.	36
ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ РАЗЛИЧНЫХ СОРТОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ, РАСТВОРЕННЫХ В МОРСКОЙ ВОДЕ, ПРИ ДВУХЧАСТОТНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ ИМПУЛЬСАМИ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ Проценко Д.Ю., Майор А.Ю., Голик С.С.	42
СИНТЕЗ И ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ДОПИРОВАННЫХ МАРГАНЦЕМ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК СУЛЬФИДА ЦИНКА Сергеев А.А., Сергеева К.А., Леонов А.А.	47

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / ENGINEERING

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И РАЗДАЧИ КОРМОВ НА СВИНОВОДЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ Базыкин В.И., Трифанов А.В.	53
НЕОБХОДИМОСТЬ АВТОМАТИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ НА ПРОИЗВОДСТВЕ Корастылева А.В.	59
DATA MINING ПОДХОД К ВОПРОСУ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ Овечкин М.В.	62
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИСТЕМЫ «IWIZARD-E» Пальмов С.В., Мифтахова А.А.	67
THEORETICAL AND NUMERICAL EVALUATION OF COLLECTIVE ANT BEHAVIOUR Svistova S.F.	73

НАУКИ О ЗЕМЛЕ / SCIENCE ABOUT THE EARTH

МОНИТОРИНГ СОПРЯЖЕННЫХ СИСТЕМ ПРИБРЕЖНОГО РЕГИОНА Павлова С.А., Павлов И. Е., Поляхов А. С., Поляхов И. А.	78
--	----

ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ / GEOLOGY AND MINERALOGY

АНАЛИЗ ЛИТОЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА И КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД ПЛАСТОВ АЧИМОВСКОГО ГОРИЗОНТА (АЧ ₁ , АЧ ₂ , АЧ ₃) АЛЕХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ХМАО-ЮГРЫ Гамидуллаева А.З., Романова Т.И.	83
НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ТЕХНОГЕННО-МИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ Наумов В.А., Фиоруччи А., Голдырев В.В., Брюхов В.Н., Фетисов В.В.	89

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ / BIOLOGY

ESTIMATION OF INTER-OSCILLATORY COHERENCE IN THE ELECTROENCEPHALOGRAMS BY USE OF THEIR MATHEMATICAL MODELING	
Bakharev B.V., Vorobyov V.V.	93

NEW TECHNOLOGY OF INFORMATION INTERACTION BETWEEN MAN AND DOLPHIN	
Ivanov M.P., Tolmachev Yu.A., Stefanov V.E.	98

ANGLE OF MOUTH GAPING OF THE NILE CROCODILE <i>CROCODYLUS NILOTICUS</i> AT BASKING	
Kiladze A.B.	103

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПУТЬ СОХРАНЕНИЯ КОЛЛЕКЦИИ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КОРМОВЫХ КУЛЬТУР	
Филипенко Г.И., Забегаева О.Н., Баранова Е.А., Герасимова Т.В.	106

МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ / MEDICINE

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТЕНТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ МОТИВАЦИИ ДЕТЕЙ К ЛЕЧЕНИЮ НА ОРТОДОНТИЧЕСКОМ ПРИЕМЕ	
Бахур Е.С., Восканян А.Р., Волобуев В.В., Митропанова М.Н.	113

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТИЛЕНОВОГО СИНЕГО В ИНТРАОПЕРАЦИОННОМ ПОИСКЕ ОКОЛОЩИТОВИДНЫХ ЖЕЛЕЗ	
Зубков А.В., Краюшкин А.И., Загребин В.Л.	118

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЛГОРИТМА МЕСТНЫХ САНАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ У ДЕТЕЙ С ЭМПИЕМОЙ ПЛЕВРЫ	
Слесарев В.В.	122

КОРРЕКЦИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОЙ ГЕМОФИЛЬТРАЦИЕЙ ПЕРЕКИСНОГО ОКИСЛЕНИЯ ЛИПИДОВ ПРИ АБДОМИНАЛЬНОМ СЕПСИСЕ	
Фомин А.М.	125

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.001>**ПОСТРОЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ ПРИТЯЖЕНИЯ ПРИ ВЫРОЖДЕНИИ СИНГУЛЯРНО ВОЗМУЩЕННЫХ УРАВНЕНИЙ**

Научная статья

Алыбаев К.С.¹, Мурзабаева А.Б.^{2,*}¹ ORCID: 0000-0002-7962-534X,

Жалал-Абадский государственный университет, Жалал-Абад, Кыргызстан;

² ORCID: 0000-0003-0694-6633,

Ошский технологический университет, Ош, Кыргызстан

* Корреспондирующий автор (aytbu.murzabaeva[at]mail.ru)

Аннотация

В работе проведен анализ систем сингулярно возмущенных обыкновенных дифференциальных уравнений. Дается обзор известных результатов по рассматриваемому вопросу и на их основе обоснована степень актуальности исследуемой задачи. Рассматривается система сингулярно возмущенных обыкновенных дифференциальных уравнений с аналитическими функциями в комплексной области. Вырожденная система, соответствующая рассматриваемой системе, теряет единственность при вырождении. Для анализа решения начальной задачи по малому параметру введено понятие области притяжения решения вырожденной системы. Поставленная задача сводится к отысканию областей притяжения. С привлечением линии уровня гармонических функций в комплексной области построены области и доказано, что они являются областями притяжения рассматриваемых решений вырожденной системы.

Ключевые слова: сингулярное возмущение, вырожденные уравнения, гармоническая функция, линии уровня, область притяжения, асимптотика.

CONSTRUCTION OF DOMAINS OF ATTRACTION AT DEGENERATION OF SINGULARLY PERTURBED EQUATIONS

Research article

Alibaev K.S.¹, Murzabaeva A.B.^{2,*}¹ ORCID: 0000-0002-7962-534X,

Jalal-Abad State University, Jalal-Abad, Kyrgyzstan;

² ORCID: 0000-0003-0694-6633,

Osh Technological University, Osh, Kyrgyzstan

* Corresponding author (aytbu.murzabaeva[at]mail.ru)

Abstract

The paper presents the analysis of singularly perturbed systems of ordinary differential equations. The overview of known results on the considered issue is given and the degree of relevance of the problem under investigation is substantiated based on them. We consider a system of singularly perturbed ordinary differential equations with analytic functions in the complex domain. A degenerate system corresponding to the system under consideration loses its uniqueness under degeneracy. In order to analyze the solution of the initial problem with respect to a small parameter, we introduce the notion of the domain of attraction of a solution of a degenerate system. The problem is reduced to finding the domains of attraction. Domains are constructed with the use of the level line of harmonic functions in the complex domain, and it is proved that they are domains of attraction of the solutions of the degenerate system under consideration.

Keywords: singular perturbation, degenerate equations, harmonic function, level lines, domain of attraction, asymptotics.

Введение

Многочисленные задачи математики, математической и теоретической физики, техники приводят к исследованию дифференциальных уравнений или их систем с малыми параметрами при старших производных. Такие классы уравнений получило название сингулярно возмущенные.

Примеры сингулярно возмущенных уравнений прикладного характера приведены в [1].

Асимптотическими разложениями решений сингулярно возмущенных уравнений занимались многие исследователи. Об этом подробнее можно ознакомиться в [2], [3]. Сингулярно возмущенные уравнения в комплексных областях рассмотрены редко. В этом направлении из ранних работ можно назвать [4], [5], [6], [11], [12]. К более поздним работам относятся [8], [9], [10].

В [8] рассматриваются сингулярно возмущенные обыкновенные дифференциальные уравнения (системы) с аналитическими функциями в некоторых комплексных областях. Рассматриваемые области содержат отрезки действительной оси. Присоединённые уравнения (системы) заданных уравнений (систем) имеют одну точку покоя, причём она устойчива по Ляпунову в части отрезка действительной оси и неустойчива в другой части этого отрезка.

Доказано, что решения начальных задач рассматриваемых уравнений (систем) при потере устойчивости не сразу уходит от возникшей неустойчивой точки покоя, а в течении конечного времени остается вблизи него. Это явление получило название «затягивание потери устойчивости при динамических бифуркациях».

В [9], [10] доказано, сингулярно возмущенные обыкновенные дифференциальные уравнения (системы) с аналитическими функциями в комплексных областях обладают рядом специфических свойств. В частности доказано

существование так называемых «погранслоинных линий», которые можно рассматривать как частные случаи линий Стокса. Погранслоинные линии разделяют рассматриваемые комплексные области на части. В одних частях решение стремится к решению вырожденного уравнения (системы) по ε ($\varepsilon \rightarrow +0$), а в другой части не ограничена, а в самой погранслоинной линии решение не имеет предела по ε . Также доказано, явление «затягивание потери устойчивости» происходит при определенных условиях на правые части рассматриваемых уравнений (систем). Таким образом, существование погранслоинных линий специфическое свойство сингулярно возмущенных уравнений (систем) с аналитическими функциями, а «затягивание потери устойчивости» явление происходящее при благоприятных условиях.

В [8], [10] исследования проведены в предположении, что вырожденные уравнения (системы), соответствующие рассматриваемым уравнениям (системам) в комплексных областях имеют одно единственное решение. Уравнения (системы), когда вырожденные уравнения (системы) имеют несколько решений ранее не рассматривались.

Постановка задачи

Пусть рассматривается система

$$\varepsilon z'(t, \varepsilon) = f(t, z(t, \varepsilon)) \quad (1)$$

с начальным условием

$$z(t_0, \varepsilon) = z^0, \quad (2)$$

где $t \in \Omega \subset \mathbb{C}$ и Ω - односвязная область; $t_0 \in \Omega$ и её внутренняя точка.

$$z(t, \varepsilon) = \text{colon}(z_1(t, \varepsilon), z_2(t, \varepsilon), \dots, z_n(t, \varepsilon)) \\ f(t, z) = \text{colon}(f_1(t, z_1, z_2, \dots, z_n), f_2(t, z_1, z_2, \dots, z_n), \dots, f_n(t, z_1, z_2, \dots, z_n)).$$

$f(t, z)$ – комплекснозначная аналитическая функция по переменным (t, z) в некоторой области H переменных (t, z) .

При $\varepsilon = 0$ из (1) получим вырожденную систему

$$f(t, \xi(t)) = 0. \quad (3)$$

Предложим, что система (3) имеет изолированные решения (корни) $\xi_j(t)$ ($j = 1, 2, \dots, k$).

Далее: $Q(\Omega)$ - означает пространство аналитических функций в Ω .

Запись $\forall t \in \Omega(\sigma(t))$ будет означать, что для любого t из Ω справедливо утверждение $\sigma(t)$.

Определение 1: Если $\xi_j(t) \in Q(\Omega)$ и $\forall t \in \Omega(\xi_j(t) \neq \xi_k(t) \text{ при } j \neq k)$, то решения $\xi_j(t)$ и $\xi_k(t)$ называются изолированными в Ω .

Определение 2: Если: 1. Существует область $\Omega_j \subset \Omega$ содержащая точку t_0 .

2. $\forall t \in \Omega_j$ существует $z(t, \varepsilon)$ - решение задачи (1)-(2).

3. $\forall t \in \Omega_j(z(t, \varepsilon) \rightarrow \xi_j(t) \text{ по } \varepsilon)$, то область Ω_j назовем областью притяжения решения $\xi_j(t)$.

Далее область притяжения обозначим $\Omega_j(\xi_j(t))$.

Предметом наших исследований будут формулировка условий на правые части системы (1), при которых существуют области притяжения.

Для наглядности рассмотрим случай, когда

$$f_j(t, z_1, z_2) = a_j(t)z_j + b_j(t)z_j^2, \quad j = 1, 2.$$

Предположим выполнения условия U1. $a_j(t), b_j(t) \in Q(\Omega) \wedge \forall t \in \Omega(a_j(t) \neq 0, b_j(t) \neq 0)$.

Для этого случая каждое вырожденное уравнение имеет по два решения, которые обозначим

$$\xi_{j1}(t) \equiv 0, \quad \xi_{j2}(t) = -a_j(t)/b_j(t) (j = 1, 2).$$

Из полученных решений составим следующие решения для вырожденной системы

$$\xi_1(t) = \text{colon}(\xi_{11}(t), \xi_{21}(t)), \quad \xi_2(t) = \text{colon}(\xi_{12}(t), \xi_{22}(t)), \\ \xi_3(t) = \text{colon}(\xi_{12}(t), \xi_{21}(t)), \quad \xi_4(t) = \text{colon}(\xi_{11}(t), \xi_{22}(t)).$$

Задача: Существуют ли области притяжения $\Omega_k(\xi_k(t))$ ($k = 1, 2, 3, 4$)?

Предварительные обозначения и построения

Рассмотрим функции $F_j(t) = \int_{t_0}^t a_j(\tau) d\tau$ ($j = 1, 2$) и введем обозначения $Re F_j(t) \equiv F_{j1}(t_1, t_2)$, $Im F_j(t) = F_{j2}(t_1, t_2)$. Согласно U.1 функции $F_{jk}(t)$ ($j, k = 1, 2$) - гармонические.

По определению $F_j(t_0) = 0$. Тогда существуют линии уровня $(L_{j0}) = \{t \in \Omega | Re F_{j1}(t_0) = 0\}$ проходящие через точку t_0 .

U.3 Пусть линии уровня (L_{10}) и (L_{20}) не имеют общих точек, кроме точки t_0 .

Линии (L_{j0}) область Ω делят на четыре части. Эти части обозначим Ω_k ($k = 1, 2, 3, 4$).

Если учесть U.2, то линия (L_{10}) не имеет кратных точек и область Ω делит на две части в каждом из которых $F_{11}(t) \leq 0$ или $F_{11}(t) \geq 0$, причем равенство имеет место только для точек (L_{10}) . Аналогичное имеет место для (L_{20}) и $F_{21}(t)$. Условие U.3 обеспечивает существование единственной области, где $F_{11}(t) \leq 0$ и $F_{21}(t) \leq 0$, а в оставшихся областях функции $F_{11}(t), F_{21}(t)$, по совокупности принимают значения разных знаков.

Для определенности будем считать

$$\forall t \in \Omega_1(F_{11}(t) \leq 0, F_{21}(t) \leq 0), \quad \forall t \in \Omega_2(F_{11}(t) \leq 0, F_{21}(t) \geq 0), \quad (4)$$

$\forall t \in \Omega_3(F_{11}(t) \geq 0, F_{21}(t) \leq 0), \quad \forall t \in \Omega_4(F_{11}(t) \geq 0, F_{21}(t) \geq 0)$.

Введем в рассмотрение линии уровня

$$(L_{j1}) = \{t \in \Omega | F_{j1}(t_1, t_2) = L_{j1} - \text{const}\}, \\ (L_{j2}) = \{t \in \Omega | F_{j2}(t_1, t_2) = L_{j2} - \text{const}\}$$

и составим множества $\{(L_{j1})\}, \{(L_{j2})\}, j = 1, 2$.

Пусть выполняется условие

У4. Произвольные линии из множеств $\{(L_{11})\}$ и $\{(L_{22})\}$, а также из множеств $\{(L_{12})\}$ и $\{(L_{21})\}$ пересекаются только в одной точке.

Заметим, $(L_{10}) \in \{(L_{11})\}$, $(L_{20}) \in \{(L_{21})\}$.

Далее рассмотрим линии уровня

$$(L_{1\epsilon}^{\pm}) = \{t \in \Omega | F_{11}(t_1, t_2) = \mp \epsilon \ln \epsilon\},$$

$$(L_{2\epsilon}^{\pm}) = \{t \in \Omega | F_{21}(t_1, t_2) = \mp \epsilon \ln \epsilon\}.$$

Линии $(L_{1\epsilon}^{\pm})$ и $(L_{2\epsilon}^{\pm})$ согласно У. 4 пересекаются только в одной точке (всего четыре точки). Функции $F_{j1}(t_1, t_2)$, $F_{j2}(t_1, t_2)$ непрерывны и $F_{j1}(t_{10}, t_{20}) = 0$, $F_{j2}(t_{10}, t_{20}) = 0$, тогда точки пересечения линий $(L_{1\epsilon}^{\pm})$ и $(L_{2\epsilon}^{\pm})$ принадлежат достаточно малой окрестности точки t_0 . К примеру за это окрестность можно взять область, ограниченную линиями $(L_{1\epsilon}^{\pm})$ и $(L_{2\epsilon}^{\pm})$.

Область ограниченную $(L_{1\epsilon}^{-})$ и $(L_{2\epsilon}^{-})$ обозначим $\Omega_{1\epsilon}^{-}$; $(L_{1\epsilon}^{+})$ и $(L_{2\epsilon}^{-})$ обозначим $\Omega_{3\epsilon}$; $(L_{1\epsilon}^{+})$ и $(L_{2\epsilon}^{+})$ обозначим $\Omega_{4\epsilon}$; $(L_{1\epsilon}^{-})$ и $(L_{2\epsilon}^{+})$ обозначим $\Omega_{2\epsilon}$.

Согласно У. 1 линии уровня определяемые функциями $F_{jk}(t)$ ($j, k = 1, 2$) являются аналитическими кривыми и их можно представить параметрически [6].

Возьмём (L_{j0}) и её уравнение представим параметрически в виде $t_1 = t_1(s_j)$, $t_2 = t_2(s_j)$, $0 \leq s_j < s_{j0}$ (случай $s_{j0} = +\infty$ не исключается), где s_j означает длину дуги (L_{j0}) отсчитываемого от точки t_0 , $j = 1, 2$.

Возьмём (L_{k2}) ($k = 1, 2$) и её уравнение представим в виде

$$t_1 = t_1(\sigma_k), t_2 = t_2(\sigma_k) \quad 0 \leq \sigma_k < \sigma_{k0}$$

(случай $\sigma_{k0} = +\infty$ не исключается), где σ_k означает длину дуги (L_{2k}) отсчитываемого от точки $\tilde{t} \in (L_{j0})$ ($j = 1, 2$).

Также обозначим

$$F_{k2}(t) \equiv F_{k2}(t(s_k)) \equiv F_{k2}(s_k),$$

$$F_{k1}(t) \equiv F_{k1}(t(\sigma_k)) \equiv F_{k1}(\sigma_k), (k = 1, 2).$$

Вспомогательные леммы

Лемма 1. Функция $F_{11}(t_1, t_2)$ строго монотонна вдоль линии (L_{12}) , а функция $F_{21}(t_1, t_2)$ вдоль линии (L_{22}) .

Доказательство леммы приведен в [7].

Лемма 2. В каждом из частей $\Omega_{k\epsilon}$ ($k = 1, 2, 3, 4$) ($\exp \frac{1}{\epsilon} F_{j1}(\tau_1) \rightarrow 0$ по ϵ) или ($\exp \frac{-1}{\epsilon} F_{j1} \rightarrow 0$ по ϵ) ($j = 1, 2$).

Доказательство. Пусть $t \in (\Omega_{1\epsilon} \cup \Omega_{2\epsilon})$. Возьмём $\exp \frac{1}{\epsilon} F_{11}(\tau_1)$.

$$\forall t \in (\Omega_{1\epsilon} \cup \Omega_{2\epsilon}) (F_{11}(\tau_1) \leq \epsilon \ln \epsilon) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \forall t \in (\Omega_{1\epsilon} \cup \Omega_{2\epsilon}) (\exp \frac{1}{\epsilon} F_{11}(\tau_1) \leq \exp \frac{1}{\epsilon} (\ln \epsilon) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \forall t \in (\Omega_{1\epsilon} \cup \Omega_{2\epsilon}) (\exp \frac{1}{\epsilon} F_{11}(\tau_1) \rightarrow 0 \text{ по } \epsilon).$$

Отсюда следует справедливость леммы для одного случая. Оставшиеся случаи доказываются аналогично.

Решение задачи

Теорема. Пусть выполняются условия У. 1 – У. 4. Тогда существует решение задачи (1) – (2) и $\Omega_{k\epsilon}$ являются областями притяжения для решений $\xi_k(t)$ ($k = 1, 2, 3, 4$).

Доказательство. Для рассматриваемого случая решение задачи (1)-(2) можно представить в виде

$$z(t, \epsilon) = colon (z_1(t, \epsilon), z_2(t, \epsilon)),$$

где $z_j(t, \epsilon) = \epsilon z_j^0 \exp \frac{1}{\epsilon} F_j(t) / (\epsilon - z_j^0 \cdot I_j(t, \epsilon))$, $F_j(t) = \int_{t_0}^t a_j(\tau) d\tau$, $I_j(t, \epsilon) = \int_{t_0}^t b_j(\tau) \exp \frac{1}{\epsilon} F_j(\tau) d\tau$, $j = 1, 2$.

Функцию $z(t, \epsilon)$ будем рассматривать для $t \in \Omega_{k\epsilon}$ ($k = 1, 2, 3, 4$). При исследовании $z(t, \epsilon)$ по ϵ , существенную роль играют знаки функций $Re F_j(t)$ и асимптотическое поведение интегралов $I_j(t, \epsilon)$ по ϵ . Выберем пути интегрирования для этих интегралов. Путь для всех случаев $t \in \Omega_{k\epsilon}$ выбирается единым и состоит из части (L_{j0}) соединяющего точки t_0 и \tilde{t} ; части (L_{j2}) соединяющего точки \tilde{t} и t .

При $j = 1$ получим путь для $z_1(t, \epsilon)$, а при $j = 2$ путь для $z_2(t, \epsilon)$.

Компоненты $z_j(t, \epsilon)$ в зависимости от знака функций $Re F_j(t)$ представим в различных вариантах. Знаки $Re F_j(t)$ определяются согласно (4).

1. Пусть $t \in \Omega_{1\epsilon}$. Тогда $Re F_j(t) < 0$ и компоненты $z_j(t, \epsilon)$ представляются в виде

$$z_j(t, \epsilon) = \epsilon z_j^0 \exp \frac{1}{\epsilon} F_j(t) / (\epsilon - z_j^0 \cdot I_j(t, \epsilon)), j = 1, 2. \quad (5)$$

2. $t \in \Omega_{2\epsilon}$. В этом случае $Re F_1(t) < 0$, $Re F_2(t) > 0$ и

$$z_1(t, \epsilon) = \epsilon z_1^0 \exp \frac{1}{\epsilon} F_1(t) / (\epsilon - z_1^0 \cdot I_1(t, \epsilon)), \quad (6)$$

$$z_2(t, \epsilon) = \epsilon z_2^0 / (\exp \frac{-1}{\epsilon} F_2(t) - z_2^0 \exp \frac{-1}{\epsilon} F_2(t) I_2(t, \epsilon)). \quad (7)$$

3. $t \in \Omega_{3\epsilon}$. Имеем $Re F_1(t) > 0$, $Re F_2(t) < 0$ и

$$z_1(t, \epsilon) = \epsilon z_1^0 (\epsilon z_1^0 \exp \frac{-1}{\epsilon} F_1(t) - z_1^0 \exp \frac{-1}{\epsilon} F_1(t) \cdot I_1(t, \epsilon)), \quad (8)$$

$$z_2(t, \epsilon) = \epsilon z_2^0 \exp \frac{1}{\epsilon} F_2(t) / (\epsilon - z_2^0 \cdot I_2(t, \epsilon)). \quad (9)$$

4. $t \in \Omega_{4\epsilon}$, тогда $Re F_1(t) > 0$, $Re F_2(t) > 0$ и

$$z_j(t, \epsilon) = \epsilon z_j^0 / (\epsilon \exp \frac{-1}{\epsilon} F_j(t) - z_j^0 \exp \frac{-1}{\epsilon} F_j(t) I_j(t, \epsilon)), j = 1, 2. \quad (10)$$

С учетом выбранных путей интегрирования и параметрическое представление линий $(L_{j0}), (L_{j2})$ ($j = 1, 2$) интегралы $I_j(t, \varepsilon)$ представим в виде

$$I_j(t, \varepsilon) = \int_0^{s_j} b_{1j}(\tilde{s}_j) \exp \frac{i}{\varepsilon} F_{j2}(\tilde{s}_j) d\tilde{s}_j + \int_0^{\sigma_j} b_{2j}(\tilde{\sigma}_j) \exp \frac{1}{\varepsilon} (F_{j1}(\tilde{\sigma}_j) + iL_{j2}) d\tilde{\sigma}_j$$

где $b_{1j}(\tilde{s}_j) \equiv b_j(\tau(\tilde{s}_j)) \cdot \tau'(\tilde{s}_j)$, $b_{2j}(\tilde{\sigma}_j) \equiv b_{1j}(\tau(\tilde{\sigma}_j)) \cdot \tau'(\tilde{\sigma}_j)$,

$$F_{j2}(\tilde{s}_j) \equiv F_{j2}(\tau_1(\tilde{s}_j), \tau_2(\tilde{s}_j)),$$

$$F_{j1}(\tilde{\sigma}_j) \equiv F_{j1}(\tau_1(\tilde{\sigma}_j), \tau_2(\tilde{\sigma}_j)), L_{j2} - \text{const}, j = 1, 2.$$

Во всех рассматриваемых случаях будут присутствовать интегралы

$$I_{j1}(t(s_j), \varepsilon) = \int_0^{s_j} b_j(\tilde{s}_j) \exp \frac{i}{\varepsilon} F_{j2}(\tilde{s}_j) d\tilde{s}_j.$$

К таким интегралам применяя метод стационарной фазы (функция $F_{j2}(\tilde{s}_j)$ не имеет особенностей) [6] получим

$$I_{j1}(t(s_j), \varepsilon) = O(\varepsilon). \quad (11)$$

Если $\text{Re} F_j < 0$, то к интегралу

$$I_{j2}(t(\sigma_j), \varepsilon) = \int_0^{\sigma_j} b_{2j}(\tilde{\sigma}_j) \exp \frac{1}{\varepsilon} (F_{j1}(\tilde{\sigma}_j) + iL_{j2}) d\tilde{\sigma}_j$$

применяя интегрирование по частям имеем

$$I_{j2}(t(\sigma_j), \varepsilon) = O(\varepsilon). \quad (12)$$

Если $\text{Re} F_j > 0$ то согласно (7)-(8)-(9)-(10) рассмотрим выражения

$$I_{j3}(t, \varepsilon) = \exp \frac{-1}{\varepsilon} F_j(t) I_j(t, \varepsilon), \text{ которые можно записать так}$$

$$I_{j3}(t(\sigma), \varepsilon) = \int_0^{\sigma_j} b_{2j}(\tilde{\sigma}_j) \exp \frac{1}{\varepsilon} (F_{j1}(\tilde{\sigma}_j) - F_{j1}(\sigma)) d\tilde{\sigma}_j.$$

К $I_{j3}(t(\sigma), \varepsilon)$ применяя интегрирование по частям и учитывая Лемму 1 получим

$$I_{j3}(t(\sigma), \varepsilon) = \varepsilon \left[b_{2j}(\tilde{\sigma}_j) / F'_{j1}(\sigma_j) - (b_{2j}(0) / F'_{j1}(0)) \exp \frac{i}{\varepsilon} L_{j2} - O(\varepsilon) \right].$$

Заметим, что $b_{2j}(\sigma_j) / F'_{j1}(\sigma_j) \equiv b_j(t) / a_j(t)$ $j=1, 2$.

Теперь каждый из случаев $t \in \Omega_{k\varepsilon}$ ($k = 1, 2, 3, 4$) рассмотрим отдельно. Отметим, что в каждом случае надо учесть Лемму 2.

1. $t \in \Omega_{1\varepsilon}$, тогда на основе (11), (12) ($j = 1, 2$) имеем

$$z_j(t, \varepsilon) = \varepsilon z_j^0 \exp \frac{1}{\varepsilon} F_j(t) / (\varepsilon - z_j^0 \cdot O(\varepsilon)) = z_j^0 \exp \frac{1}{\varepsilon} F_j(t) / (1 - O(1)z_j^0)$$

Так как $\forall t \in \Omega_{1\varepsilon} (\text{Re} F_j(t) < \varepsilon \ln \varepsilon) \Rightarrow (\exp \frac{1}{\varepsilon} F_j(t) \rightarrow 0 \text{ no } \varepsilon)$, то

$$\forall t \in \Omega_{1\varepsilon} (z_j(t, \varepsilon) \rightarrow 0 \text{ no } \varepsilon) \Rightarrow \forall t \in \Omega_{1\varepsilon} (z(t, \varepsilon) \rightarrow \xi_1(t) \text{ no } \varepsilon) \Rightarrow \Omega_{1\varepsilon}(\xi_1(t)).$$

2. $t \in \Omega_{2\varepsilon}$. В этом случае учитывая (11)-(12) при $j = 1$ и (13) при $j = 2$ будем иметь

$$\forall t \in \Omega_{2\varepsilon} (z_1(t, \varepsilon) \rightarrow 0, z_2 \rightarrow -a_2(t)/b_2(t) \text{ no } \varepsilon) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \forall t \in \Omega_{2\varepsilon} (z(t, \varepsilon) \rightarrow \xi_2(t) \text{ no } \varepsilon) \Rightarrow \Omega_{2\varepsilon}(\xi_2(t)).$$

3. Если $t \in \Omega_{3\varepsilon}$, то учтем (11), (12) при $j = 2$ и (13) при $j = 1$.

$$\forall t \in \Omega_{3\varepsilon} (z_1(t, \varepsilon) \rightarrow -a_1(t)/b_1(t), z_2(t, \varepsilon) \rightarrow 0 \text{ no } \varepsilon) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \forall t \in \Omega_{3\varepsilon} (z(t, \varepsilon) \rightarrow \xi_3(t) \text{ no } \varepsilon) \Rightarrow \Omega_{3\varepsilon}(\xi_3(t)).$$

4. Пусть $t \in \Omega_{4\varepsilon}$. Тогда надо учесть (11)-(12) при $j = 1, 2$, а (13) при $j = 1, 2$.

$$\forall t \in \Omega_{4\varepsilon} (z_1(t, \varepsilon) \rightarrow -a_1(t)/b_1(t), z_2(t, \varepsilon) \rightarrow -a_2(t)/b(t) \text{ no } \varepsilon) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \forall t \in \Omega_{4\varepsilon} (z(t, \varepsilon) \rightarrow \xi_4(t) \text{ no } \varepsilon) \Rightarrow \Omega_{4\varepsilon}(\xi_4(t)). \text{ Теорема доказана.}$$

Заключение

1. Работа носит теоретический характер, но полученные результаты можно использовать на практике, когда состояние объекта описывается сингулярно возмущенными уравнениями (системами), причем объект при различных режимах стремится к определенному стабильному состоянию, а также при построении областей притяжения для систем сингулярно возмущенных уравнений более общего вида.

2. Как показывают наши исследования, области притяжения, в некоторых случаях, существуют не для всех решений вырожденных уравнений (систем). Для подтверждения этого высказывания достаточно заменить $a_2(t)$ на $(-a_1(t))$.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Мищенко Е.Ф. Дифференциальные уравнения с малым параметром и релаксационные колебания / Е.Ф.Мищенко, Н.Х. Розов – М: Наука, 1975. - 248 с.
2. Тихонов А.Н. Системы дифференциальных уравнений содержащие малые параметры при производных / А.Н. Тихонов // Мат. сб. – 1952.-Т.31(73), №3. – С. 575-586.
3. Васильева А.Б. Асимптотические разложения решений сингулярно возмущенных уравнений / А.Б. Васильева, В.Ф. Бутузов // Москва: Наука, 1973. -278 с.

4. Евграфов М.А. Асимптотика решений уравнения $\omega'' - p(z, \lambda)\omega = 0$ при $\lambda \rightarrow +\infty$ в комплексной плоскости / М.А. Евграфов, М.В. Федорюк // Успехи математических наук, 21 -1966. – Т.21, №1, С. 3-50.
5. Федорюк М.В. Асимптотика дискретного спектра оператора $w''(x) - \lambda^2 p(x)w(x)$ / М.В. Федорюк // Матем. сб., 68(110), 1965, №1, С. 68-97.
6. Федорюк М.В. Топология линий Стокса уравнений второго порядка / М.В. Федорюк // Изв. АН СССР. - Сер. матем., 29(1965), В. 3, С. 645-656.
7. Федорюк М.В. Метод перевала / М.В. Федорюк // Москва: Наука, 1977, С. 368.
8. Алыбаев К.С. Метод линий уровня исследования сингулярно возмущенных уравнений при нарушении условия устойчивости / К.С. Алыбаев // Вестник КГНУ. – Серия 3, Выпуск 6. – Бишкек, 2001. – С. 190-200.
9. Алыбаев К.С. Метод погранслойных линий построения регулярно и сингулярных областей для линейных сингулярно возмущенных уравнений с аналитическими функциями / К.С. Алыбаев, К.Б. Тампагаров // Естественные и математические науки в современном мире: сб. статей по материалам XLVII международной научно-практической конференции. № 10 (45) Россия, Новосибирск: СибАК, 2016. – С. 59-66.
10. Тампагаров К.Б. Погранслойные линии для сингулярно и регулярно возмущенных дифференциальных уравнений первого порядка с аналитическими функциями / К.Б. Тампагаров // Естественные и математические науки в современном мире: сб. статей по материалам XLVII международной научно-практической конференции. №10 (45). Россия, Новосибирск: СибАК, 2016. – С. 67-73.
11. Olver W.J Error bounds for the Liouville - Green (or WKB) approximation / W.J. Olver. // Proc Cambridge Phil. Soc., 57-1966. – Т.57. - P. 790-810.
12. Heading J. The stokes phenomenon and certain nth order differential equations, I, II / J. Heading // Proc. Cambridge Phil. Soc., 53(1957) - P. 399-441.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Mishchenko E.F. Differentsial'nyye uravneniya s malym parametrom i relaksatsionnyye kolebaniya [Differential Equations with Small Parameter and Relaxation Oscillations] / E.F. Mishchenko, N.Kh. Rozov - M: Science, 1975, – 248 p. [in Russian]
2. Tikhonov A.N. Sistemy differentsial'nykh uravneniy soderzhashchiye малыe parametry pri proizvodnykh [Systems of Differential Equations Containing Small Parameters for Derivatives] / A.N. Tikhonov // Math. Col. – 1952. – V.31 (73), No.3. – P. 575-586. [in Russian]
3. Vasilyeva A.B. Asimptotika resheniy uravneniya pri v kompleksnoy ploskostiz [Asymptotic Expansions of Solutions of Singularly Perturbed Equations] / A.B. Vasilyeva, V.F. Butuzov // Moscow: Nauka, 1973 – 278 p. [in Russian]
4. Evgrafov M.A. Asimptotika resheniy uravneniya pri v kompleksnoy ploskostiz [Asymptotics of Solutions of Equation in Complex Plane] / M.A. Evgrafov, M.V. Fedoryuk // Uspekhi Matematicheskikh Nauk [Successes of Mathematical Sciences], 21 – 1966. – V.21, No.1 – P. 3-50. [in Russian]
5. Fedoryuk M.V. Asimptotika diskretnogo spektra operatora [Asymptotics of Discrete Spectrum of Operator] / M.V. Fedoryuk // Math. Sc., 68 (110), 1965, No. 1 – P. 68-97. [in Russian]
6. Fedoryuk M.V. Topologiya liniy Stoksa uravneniy vtorogo poryadka [Topology of Stokes lines of second-order equations] / M.V. Fedoryuk // Izv. AN SSSR. – Math. Ser., 29 (1965), B. – P. 645-656. [in Russian]
7. Fedoryuk M.V. Metod perevala [Saddle-point method] / M.V. Fedoryuk / Moscow: Science, 1977 – P. 368. [in Russian]
8. Alibayev K.S. Metod liniy urovnya issledovaniya singulyarno vozmushchennykh uravneniy pri narushenii usloviya ustoychivosti [Method of Level Lines for Investigating Singularly Perturbed Equations under Violation of Stability Condition] / K.S. Alybaev // Vestnik KGNU [Bulletin of KGNU]. – Series 3, Issue 6. – Bishkek, 2001. – P. 190-200. [in Russian]
9. Alibayev K.S. Metod pogransloynnykh liniy postroyeniya regularno i singulyarnykh oblastey dlya lineynykh singulyarno vozmushchennykh uravneniy s analiticheskimi funktsiyami [Method of Boundary Layer Lines for Construction of Regular and Singular Domains for Linear Singularly Perturbed Equations with Analytic Functions] / K.S. Alibayev, K.B. Tampagarov // Yestestvennyye i matematicheskiye nauki v sovremennom mire: sb. statey po materialam XLVII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Natural and mathematical sciences in the modern world: Sat. articles on the materials of the XLVII International scientific and practical conference]. № 10 (45) Russia, Novosibirsk: SIBAK, 2016. – P. 59-66 [in Russian]
10. Tampagarov K.B. Pogransloynnyye linii dlya singulyarno i regularno vozmushchennykh differentsial'nykh uravneniy pervogo poryadka s analiticheskimi funktsiyami [Boundary Lines for Singularly and Regularly Perturbed First-Order Differential Equations with Analytic Functions] / K.B. Tampagarov // Yestestvennyye i matematicheskiye nauki v sovremennom mire: sb. statey po materialam XLVII mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Natural and mathematical sciences in the modern world: Sat. articles on the materials of the XLVII International scientific and practical conference]. №10 (45). Russia, Novosibirsk: SIBAK, 2016. – P. 67-73 [in Russian]
11. Olver W.J Error bounds for the Liouville - Green (or WKB) approximation / W.J. Olver. // Proc. Cambridge Phil. Soc., 57-1966. – Т.57. – P. 790-810.
12. Heading J. The stokes phenomenon and certain nth order differential equations, I, II / J. Heading // Proc. Cambridge Phil. Soc., 53(1957) – P. 399-441.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.002>

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Научная статья

Голик С.С.^{1,*}, Лисица В.В.², Майор А.Ю.³, Толстоногова Ю.С.⁴, Бабий М.Ю.⁵, Нагорный И.Г.⁶¹ ORCID: 0000-0003-4199-4163;² ORCID: 0000-0002-3482-5188;³ ORCID: 0000-0002-3562-3078;⁴ ORCID: 0000-0002-3680-6992;⁵ ORCID: 0000-0001-7162-576X;⁶ ORCID: 0000-0001-8376-1881,^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Дальневосточный Федеральный Университет, Владивосток, Россия

* Корреспондирующий автор (golik.ss[at]dvfu.ru)

Аннотация

Получены данные лидарного зондирования атмосферы в переходной зоне материк-океан тремя модификациями фемтосекундного лидара, основанными на титан-сапфировом лазере с чирпированным усилением мощности: лидар упругого рассеяния, лидар комбинационного рассеяния и лидар белого света. В режиме лидара белого света зарегистрированы эмиссионные линии первой положительной системы молекул азота. Представлено сравнение полученных данных с результатами лидарного зондирования с использованием лазерных импульсов наносекундной длительности.

Ключевые слова: фемтосекундные импульсы, суперконтинуум, лидар.

DEVELOPMENT OF ATMOSPHERE LIDAR SOUNDING METHODS WITH FEMTOSECOND IMPULSES

Research article

Golik S.S.^{1,*}, Lisitsa V.V.², Major A.Yu.³, Tolstonogova Yu.S.⁴, Babiya M.Yu.⁵, Nagorny I.G.⁶¹ ORCID: 0000-0003-4199-4163;² ORCID: 0000-0002-3482-5188;³ ORCID: 0000-0002-3562-3078;⁴ ORCID: 0000-0002-3680-6992;⁵ ORCID: 0000-0001-7162-576X;⁶ ORCID: 0000-0001-8376-1881,

PhD in Physics and Mathematics

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

* Corresponding author (golik.ss[at]dvfu.ru)

Abstract

Data were obtained for lidar sounding of the atmosphere in the continent-ocean transition zone by three modifications of a femtosecond lidar, based on a titanium-sapphire laser with chirped power amplification: elastic scattering lidar, Raman scattering lidar, and white light lidar. In the lidar mode of white light, the emission lines of the first positive system of nitrogen molecules were registered. A comparison of the obtained data with the results of lidar sounding using laser pulses of nanosecond duration is presented.

Keywords: femtosecond pulses, supercontinuum, lidar.

Особенностью дистанционного зондирования атмосферы с использованием фемтосекундных лазеров является использование излучения суперконтинуума (СК), как явления спектрального и пространственно-временного уширения мощного ультракороткого зондирующего импульса. Процесс генерации СК сопровождается процессом филаментации исходного импульса, когда значение мощности импульса превышает определенный порог ($\approx 3,2$ ГВт в воздухе), нелинейная добавка к показателю преломления становится значимой в зоне взаимодействия и происходит самофокусировка лазерного излучения, а затем наблюдаются эффект филаментации и генерации конической эмиссии [1, С. 592]. Спектральные компоненты СК распределены в конусах, а направление излучения СК - в направлении распространения зондирующего импульса. Излучение СК наблюдается как в стоксовой части спектра по отношению к длине волны лазера, так и в антистоксовой части спектра в диапазоне нескольких спектральных октав. Потери энергии импульса для филаментации и генерации конических выбросов СК составляют не более 20%. Таким образом, широкополосный источник короткого импульса с характеристиками, близкими к лазерным источникам, формируется на траектории зондирования.

Использование эффекта генерации СК открыло новые возможности для измерения атмосферных параметров методом лидарного зондирования. Первые шаги в использовании тераваттного фемтосекундного лидара в 1990х годах показали, что при зондировании атмосферы фемтосекундными лазерными импульсами формируется источник СК, который позволяет исследовать атмосферу на высотах от 12 до 15 км [2, С. 73], [3, С. 51]. В рамках проекта «Teramobile» за последние два десятилетия были разработаны современные тераваттные лидарные системы, решены многие проблемы атмосферной оптики и накоплен методологический опыт [4, С. 1633-1713]. Особенности филамента, используемого в качестве источника излучения широкого спектра зондирующего излучения, приводят к пересмотру основных требований к лидарным

системам, методам регистрации лидарных сигналов и лидарному уравнению [5, С. 2717], [6, С. 157]. Теоретически можно оценить положение нелинейного фокуса с учетом длины волны, сечения коллимированного импульса и отношения его мощности к критическому значению [7, С. 35]. Экспериментально и теоретически доказана возможность дистанционного позиционирования точек филаментации и генерации СК. Можно сформировать множество филаментов как в направлении распространения, так и в поперечном сечении импульса [8, С. 243].

Целью настоящей работы является определение возможностей зондирования атмосферы в переходной зоне материк-океан фемтосекундным лидаром с использованием лазерных импульсов гигаваттного уровня по мощности.

Для фемтосекундного лидарного зондирования атмосферы была собрана экспериментальная установка (схема изображена на рис. 1). В экспериментальной установке использовалась коаксиальная схема, в которой лазерный источник и система детекторов расположены в одном месте (в нашем случае в качестве детектора был использован телескоп Кассегрена диаметром 300 мм со спектрометром или фотоумножителем). В качестве зондирующего излучения используется титан-сапфировый лазер с центральной длиной волны 800 нм (40 фс, 7 мДж) для зондирования атмосферы в режиме генерации СК (лидар белого света). В качестве приемника используется телескоп в сочетании с стробированной высокочувствительной камерой с оптическим усилителем яркости (ЭОП) (PI-MAX3, Princeton Instruments), длиной волны 350-800 нм, минимальным временем экспозиции 3 нс, временем задержка от 1 нс до десятков секунд и спектрограф Spectra Pro 2300i (Princeton Instruments). В качестве чувствительного излучения используется вторая гармоника титан-сапфирового лазера (длина волны 400 нм) для реализации режимов многофотонного поглощения и флуоресценции (с использованием кристалла бета-бората бария (ВВО)). В этом случае в качестве приемника телескоп совмещен со спектрометром (Newport 77480) и 16-канальным фотоумножителем (10515B-04, Hamamatsu), который обеспечивает более высокую чувствительность и спектральное разрешение.

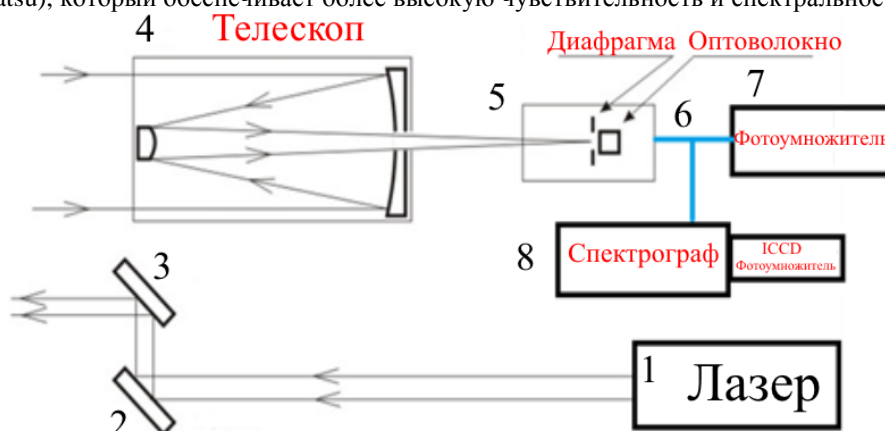


Рис. 1 – Схема экспериментальной установки:

1 - Лазер с двухкаскадным усилителем Spitfire XP (Spectra Physics); 2, 3 - система зеркал UFM10R Thorlabs, 4 - телескоп Celestron Advanced C11-SGTXT, диафрагма 279 мм, фокусное расстояние: 2800 мм, относительная диафрагма: 1/10; 5 - вход детектора с полевой диафрагмой, держателем оптического фильтра и оптическим соединением; 6 - оптоволоконно, 7 - фотоумножитель (R7400U-2, Hamamatsu), 8-спектрограф (SpectraPro 2300i) в сочетании с ICCD (PI-MAX3: 1024i, Princeton Instruments) или спектрограф (77480, Newport, дифракционная решетка 300 линий / мм, входная щель 1 мм) в сочетании с 16-канальным фотоумножителем (H10515B-04, Hamamatsu) и высокоскоростными АЦП (ADM216 100M)

В третьем варианте в качестве детектора используется фотоумножитель (Hamamatsu R7400U-2, 300-850 нм) со сменными оптическими фильтрами (Thorlabs FKB-VIS-10), обеспечивающий максимальную чувствительность обнаружения сигнала в диапазонах длин волн 445-455, 495-505, 545-555, 595 -605, 645-655, 695-705, 745-755, 795-805 нм (в зависимости от фильтра). Лидарное зондирование проводилось при ~85 Р_{кр} (критическая мощность самофокусировки) на центральной длине волны 800 нм в атмосфере с частотой повторения импульсов 1 кГц и использованием технологии «чирпирования» лазерного излучения, угол атмосферных треков варьировался в диапазоне 10-45 градусов. В оптической схеме белого лидара использовался телескоп, дважды уменьшающий диаметр исходного лазерного луча, поэтому в этом случае интенсивность генерации СК была увеличена [9, С. 1044-1046], [10, С. 135-140].

На рис. 2 показаны возможности лидара комбинационного рассеяния с использованием фемтосекундных лазерных импульсов с центральной длиной волны 400 нм. Между зеркалами 2 и 3 (см. рис.1) был установлен кристалл ВВО толщиной 300 мкм. В результате было получено излучение на центральной длине волны 400 нм с полушириной спектра ~ 5 нм, энергия в импульсе 1,2 мДж; частота повторения 1 кГц, начальный диаметр луча - 10 мм. Регистрация проводилась системой ICCD при зондировании на второй гармонике и показала возможность обнаружения линии комбинационного рассеяния азота (441 нм).

На рис. 3 показаны ослабленные вертикальные профили вертикального рассеяния R (z) (коэффициент ослабленного рассеяния) [11, С. 565] для случаев лазерных импульсов наносекундной длительности (при λ = 355 нм) и фемтосекундной длительности (при λ = 400 нм) где

$$R(z) = \frac{\beta_a(z) + \beta_m(z)}{\beta_m} \exp\left(-2 \int_0^z \alpha_a(z') dz'\right) = \frac{P(z)}{P_m(z)}$$

β_a (z), β_m (z) - коэффициенты аэрозольного и молекулярного рассеяния соответственно; α_a (z) коэффициент экстинкции атмосферного аэрозоля; P (z) и P_m (z) - лидарные сигналы, вызванные действительной и молекулярной атмосферой,

соответственно, z - расстояние до области зондирования. Можно заметить, что $R(z)$ для этих двух случаев практически одинаковы. Небольшие различия связаны с различными конфигурациями систем приема и передачи сигнала, а также спектральной зависимостью коэффициентов обратного рассеяния и экстинкции для молекулярных и аэрозольных атмосферных компонентов, на которые также влияет соотношение $R(z)$. Равновесные отношения лидарных сигналов, вызванные реальной и молекулярной атмосферой ($R(z)$) для зондирования наносекундными и фемтосекундными импульсами, подтверждают предположение о линейном распространении «постфиламентации» фемтосекундного излучения в атмосфере [11, С. 566].

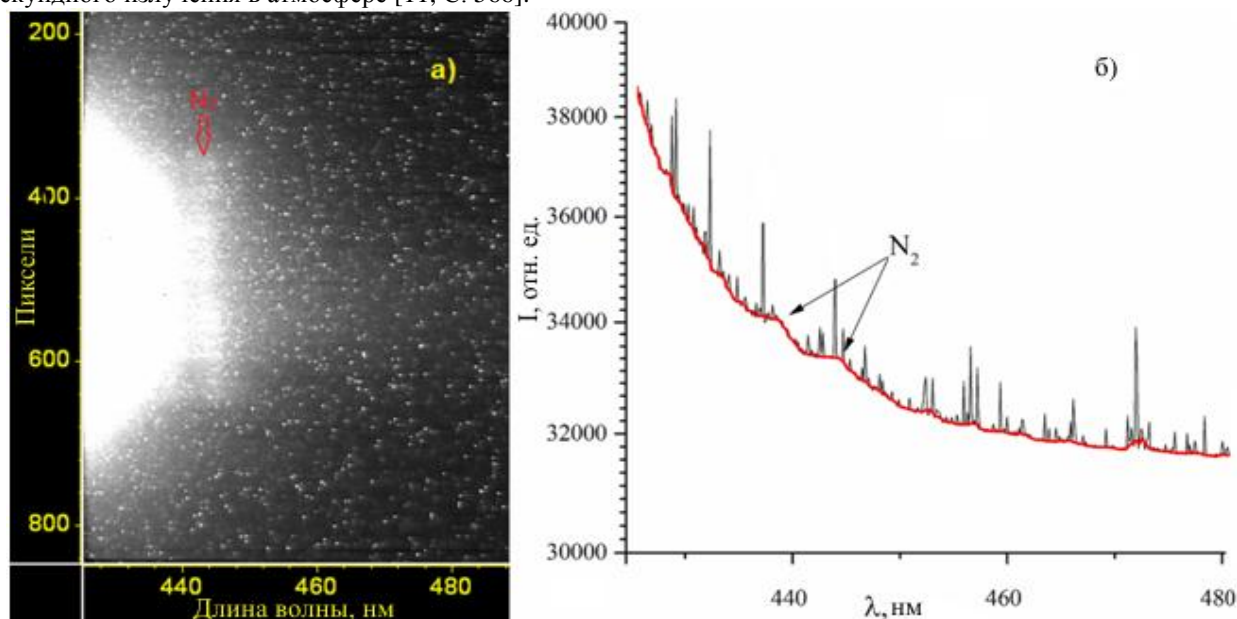


Рис. 2 – Обнаружение линии комбинационного рассеяния азота с помощью фемтосекундного лидара: (а) изображение ICCD камеры, (б) линии N_2

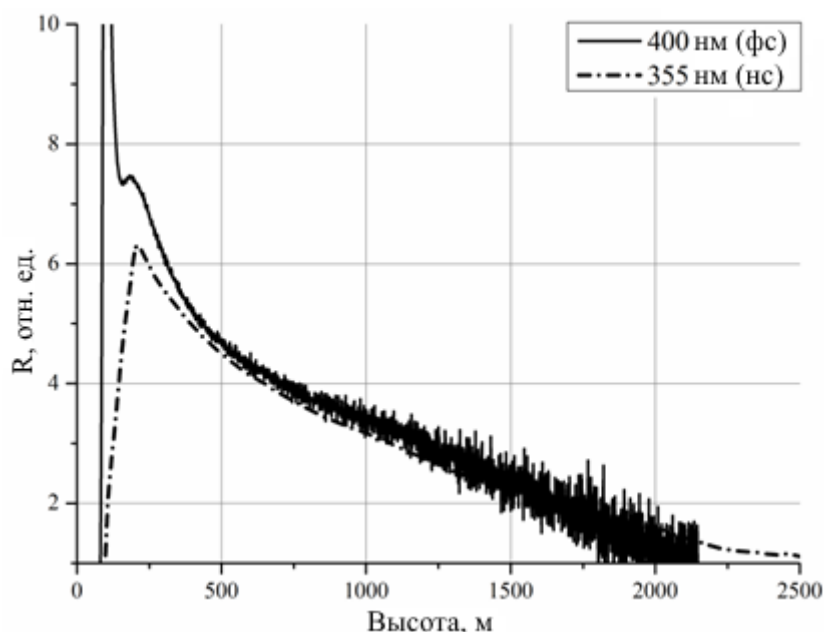


Рис. 3 – $R(z)$ для наносекундных импульсов ($\lambda = 355$ нм) и фемтосекундных импульсов ($\lambda = 400$ нм)

На рис. 4 (а) показан широкополосный сигнал рассеяния в атмосфере (начальное расстояние 75 м, шаг 28,5 м). На рис. 4 (б) выделяются линии в спектрах, полученных на фоне излучения СК на длинах волн 815 нм и 847 нм. Также линии были зарегистрированы на длинах волн 752, 760, 775 нм, имеющие значительно меньшие интенсивности, чем основной лазерный импульс. По нашим оценкам, эти линии соответствуют первой положительной системе молекулы азота.

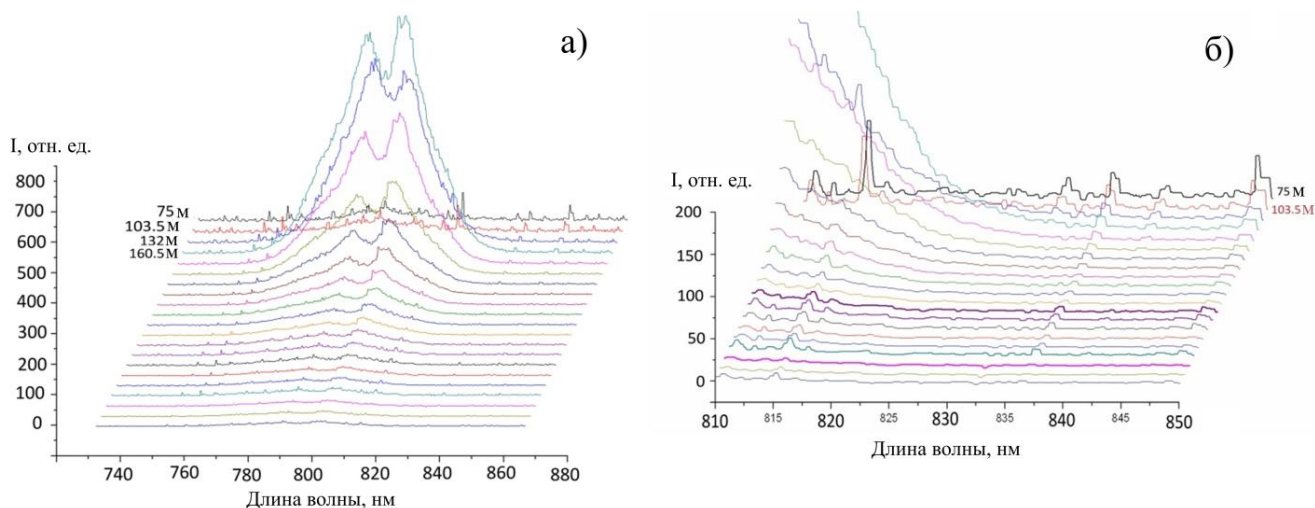


Рис. 4 – Лидарный широкополосный сигнал рассеяния в атмосфере:
(а) диапазон длин волн 740-880 нм, (б) диапазон длин волн 810-850 нм

На рис. 5 (а) показана возможность регистрации конической эмиссии в диапазоне высоты 75-225 м (на спектрографе в сочетании с ICCD камерой) и (б), (в) – S-функции лидарного сигнала для переходной зоне материк-океан, полученной при энергии лазерного излучения 7 мДж на центральной длине волны 800 нм и длительность импульса 50 фс. Угол наклона трассы зондирования составлял 25 градусов. Для получения лидарных сигналов (б) и (в) использовалась схема лидара упругого рассеяния с оптическими фильтрами с пропусканием в диапазоне 795-805 нм (для (б)) и 745-755 нм (для (в)). На рис. 5 показано, что конфигурация лидара упругого рассеяния позволяет получать сигнал с расстояния до 12 км при длине волны излучения (800 ± 5) нм и до 2,5 км при длине волны излучения (750 ± 5) нм.

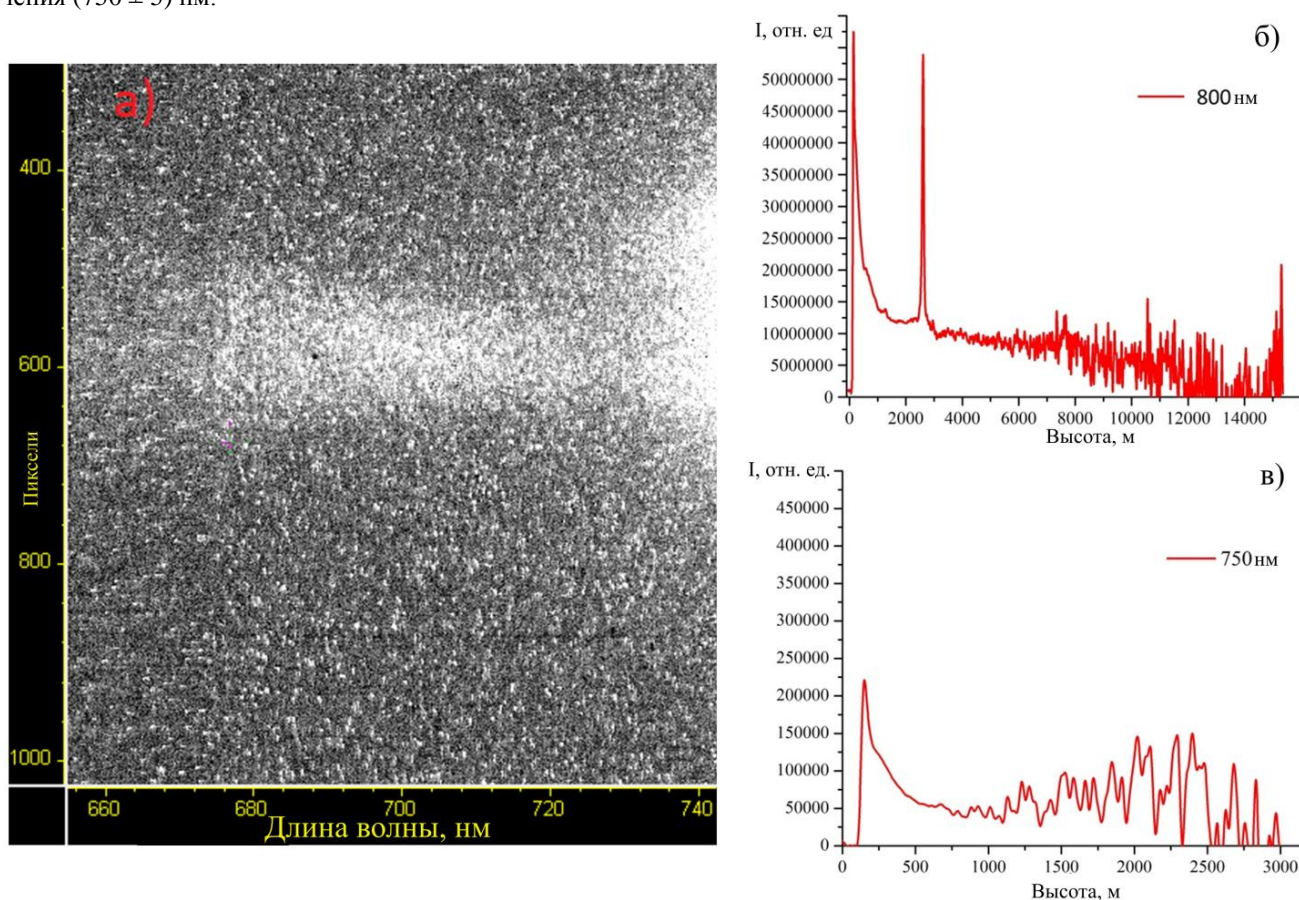


Рис. 5 – Регистрация конической эмиссии в диапазоне высоты 75-225 м (а) и S-функция лидарного сигнала в диапазоне 795-805 нм (б) и 745-755 нм (в)

Согласно полученным результатам использование фемтосекундных импульсов гигаваттной мощности позволяет проводить зондирование атмосферы в конфигурации лидара упругого рассеяния на расстояниях до 12 км и в конфигурации лидара белого света до 2,5 км на длине волны (750 ± 5) нм. Ослабленные вертикальные профили вертикального рассеяния $R(z)$ для случаев лазерных импульсов наносекундной длительности (при $\lambda = 355$ нм) и

фемтосекундной длительности (при $\lambda = 400$ нм) практически одинаковы, что подтверждает предположение о линейном распространении «постфиламентации» фемтосекундного излучения в атмосфере.

Финансирование

Работа поддержана Российским Научным Фондом в ДВФУ (соглашение №14-50-00034) с использованием установок ЦКП ЛАМИ ИАПУ ДВО РАН.

Funding

The work was supported by the Russian Science Foundation in the FEFU (agreement No. 14-50-00034) using the LAMI IACP FED RAS facilities.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Alfano R. R. Observation of self-phase modulation and small-scale filaments in crystals and glasses / R. R. Alfano, S. L. Shapiro // *Phys. Rev. Lett.* – 1970. – 24. – P. 592
2. Braun A. Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air / Braun A., Korn G., Liu X. and others // *Opt. Lett.* – 1995. – 20(1). – P. 73.
3. Woste L. Femtosecond atmospheric lamp / Woste L., Wedekind C., Wille H. and others // *Laser und Optoelektronik.* – 1997. – 29. – P. 51.
4. Berge L. Ultrashort filaments of light in weakly ionized, optically transparent media / Berge L., Skupin S., Nuter R. and others // *Rep. Prog. Phys.* – 2007. – 70. – P. 1633–1713.
5. Geints Y. E. Broadband emission spectrum dynamics of large water droplets exposed to intense ultrashort laser radiation / Geints Y. E., Kabanov A. M., Matvienko G. G. and others // *Optics Letters.* – 2010. – 35(16). – P. 2717-2719.
6. Faye G. Modifications to the lidar equation due to nonlinear propagation / Faye G., Kasparian J., Sauerbrey R. // *Appl. Phys. B, Lasers and Optics.* – 2001. – 73. – P. 157.
7. Marburger J.H. *Progress in Quantum Electronics*, Pergamon, Oxford. – 1975. – 4 – P. 35.
8. Geints Y.E. Model description of intense ultra-short laser pulse filamentation: multiple foci and diffraction rays / Geints Y.E., Bulygin A.D., Zemlyanov A.A. // *Applied Physics.* – 2012. – B107(1). – P. 243.
9. Golik S. S. The influence of laser pulse repetition rate on the intensity of spectral lines in femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy of a liquid / Golik S. S., Ilyin A. A., Babiy M. Yu. And others // *Technical Physics Letters.* – 2015. – 41(11). – P. 1044-1046.
10. Apeksimov D. V. Multiple filamentation of collimated laser radiation in water and glass / Apeksimov D. V., Golik S. S., Zemlyanov A. A. and others // *Atmospheric and Oceanic Optics.* – 2016. – 29(2). – P. 135-140.
11. Bukin O. A. Lidar sensing of the atmosphere with gigawatt laser pulses of femtosecond duration, / Bukin O. A., Babiy M. Yu., Golik S. S. and others // *Quantum Electronics.* – 2014. – 44(6). – P. 563–569.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.003>**О РАЗРЕШИМОСТИ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ СИСТЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ С ПАРАМЕТРОМ**

Научная статья

Джээнбаева Г.А.*

Институт Математики Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызстан

* Корреспондирующий автор (baytemirova2007[at]mail.ru)

Аннотация

Исследовать проблему разрешимости задач Коши для нелинейных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных можно провести методом преобразования решений. Сутью такого подхода является преобразование исходной задачи Коши в эквивалентное ей интегральное уравнение Вольтерра второго рода, к которой можно применить топологический метод – принцип сжатых отображений. Из условий сжатости оператора и определяются достаточные условия на заданные функции, при которых исходная проблема разрешима.

В данной работе исследована проблема разрешимости задачи Коши для систем нелинейных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка с параметром и найдено интегральное представление полученных решений. Далее, для нового класса систем нелинейных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных третьего порядка найдены достаточные условия существования решений задачи Коши и кроме того, построено интегральное представление таких решений. В силу нелинейности начальных задач, найденные достаточные условия, вообще говоря, не гарантирует единственность полученных решений.

Ключевые слова: интегро-дифференциальные уравнения в частных производных с параметром, достаточное условие разрешимости задачи Коши для систем нелинейных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных, отображение в себя, принцип сжатых отображений, нелинейное интегральное уравнение Вольтерра второго рода, пространство функций непрерывных со своими производными, интегральное представление решений задачи Коши.

ON SOLVABILITY OF CAUCHY PROBLEM FOR SYSTEMS OF NON-LINEAR INTEGRO-DIFFERENTIAL EQUATIONS IN PARTIAL DERIVATIVES WITH PARAMETERS

Research article

Dzhaenbaeva G.A.*

Institute of Theoretical and Applied Mathematics of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic

Bishkek, Kyrgyzstan

* Corresponding author (baytemirova2007[at]mail.ru)

Abstract

It is possible to carry out the method of transforming solutions to study the problem of solvability of the Cauchy problem for non-linear integro-differential partial differential equations. The essence of this approach is the transformation of the initial Cauchy problem into an equivalent Volterra integral equation of the second kind, to which one can apply the topological method – the principle of condensed mappings. Sufficient conditions are defined for given functions for which the original problem is solvable from the conditions of contraction of the operator u .

In this paper we study the solvability of the Cauchy problem for systems of non-linear integro-differential partial differential equations of the first order with a parameter and an integral representation of the solutions obtained. Further, for a new class of systems of non-linear integro-differential partial differential equations of the third order, sufficient conditions for the existence of solutions of the Cauchy problem are found, and, in addition, an integral representation of such solutions is constructed. In view of the non-linearity of the initial problems, sufficient conditions do not guarantee the uniqueness of the solutions obtained.

Keywords: integro-differential partial differential equations with a parameter, sufficient condition for solvability of the Cauchy problem for systems of non-linear integro-differential partial differential equations, self-mapping, principle of condensed mappings, Volterra non-linear integral equation of the second kind, space of continuous functions with its derivatives, integral representation solutions of the Cauchy problem.

В связи с требованиями практики о повышении точности анализа исследуемых явлений, приходится отказываться от математических моделей, которые описываются линейными уравнениями. Большинство задач теории динамических систем практического характера, в частности задачи дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений в частных производных, по своей сущности являются нелинейными. Некоторые проблемы нелинейных дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений в частных производных высокого порядка, например, исследование вопроса разрешимости задачи Коши и разработка конструктивных методов построения существующих решений мало изучены. В литературе имеется несколько разных методов для исследования разрешимости нелинейных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка. Например, хорошо известны: классический метод характеристик, метод Галеркина, метод дополнительного аргумента. Следует отметить, что помощью метода дополнительного аргумента также удастся исследовать разрешимость и уравнения выше первого порядка[3].

Исследовать разрешимость задачи Коши для дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений в частных производных можно провести методом преобразования решений [4], [5], [6]. Сутью такого подхода является преобразование исходной задачи Коши в эквивалентное ей интегральное уравнение, к которой можно применить топологический метод – принцип сжатых отображений. Мы в данной работе при исследовании проблему

установления разрешимости начальной задачи для нелинейных систем интегро-дифференциальных уравнений в частных производных будем следовать методу предложенной в [6].

Приведем математические обозначения, используемые в данной работе: R – числовая ось, $R_+ := (0; +\infty)$, $D = [0, T] \times R$; E – единичная матрица; $C^{p,q,\dots}(\Omega \times \Lambda)$ – пространство функций f , непрерывных вместе со своими производными порядка p по первой переменной, q по второй переменной; где Ω и Λ – области в евклидовых пространствах и R^k соответственно; $\bar{C}^{p,q,\dots}(\Omega \times \Lambda)$ – пространство функций f , ограниченных и непрерывных вместе с производными до соответствующего порядка; $Lip(L|_u)$ – класс функций, удовлетворяющих условию Липшица по переменной u с коэффициентом L ;

Нормой в пространстве $C^{p,q,\dots}(\Omega \times \Lambda)$ будем понимать отображение, которое определяется в виде $\|f\| = \max_{\Omega \times \Lambda} |f|$.

I. Рассмотрим задачу Коши для системы интегро-дифференциальных уравнений в частных производных с параметром

$$\begin{aligned} \varepsilon \left[u_t(t, x, y) + u_x(t, x, y) + u_y(t, x, y) \right] + \\ + A(t, x, y, \varepsilon) u(t, x, y) = f(t, x, y, u(t, x, y), \varepsilon) + \int_0^t K(t, s, x, y, u(s, x, y), \varepsilon) ds, \end{aligned} \quad (1)$$

где $t \in [0, T]$, $(x, y) \in R \times R$, с начальным условием

$$u(0, x, y) = \varphi(x, y) \quad (2)$$

Предположение А. Пусть

$$A(t, x, y, \varepsilon) \in \bar{C}([0, T] \times R \times R), \quad f(t, x, y, u, \varepsilon) \in \bar{C}([0, T] \times R \times R \times R) \cap Lip(L_1|_u),$$

$$K(t, s, x, y, u, \varepsilon) \in \bar{C}((0 \leq s \leq t \leq T) \times R \times R \times R) \cap Lip(L_2|_u), \quad \varphi(x, y) \in \bar{C}^{1,1}(R \times R).$$

Ясно, что из предположения А имеем $\|A(t, x, y, \varepsilon)\| \leq M_A = const$.

Решение задачи Коши (1)-(2) ищем в виде

$$u(t, x, y) = \varphi(x-t, y-t) + \int_0^t e^{-\frac{\alpha(t-s)}{\varepsilon} - \frac{\beta s}{\varepsilon}} \frac{1}{\varepsilon} Q(s, x-t+s, y-t+s) ds. \quad (3)$$

где $Q(t, x, y)$ – неизвестная вектор-функция, подлежащая определению; $\alpha, \beta \in R_+$ и их значения будут определяться позже.

Последовательно дифференцируя по t и x, y соотношение (3), имеем

$$\begin{aligned} u_t(t, x, y) &= -[\varphi'_x(x-t, y-t) + \varphi'_y(x-t, y-t)] + \frac{1}{\varepsilon} e^{\frac{\beta t}{\varepsilon}} Q(t, x, y) - \frac{\alpha}{\varepsilon} (u - \varphi) - \\ &- \int_0^t e^{-\frac{\alpha(t-s)}{\varepsilon} - \frac{\beta s}{\varepsilon}} \frac{1}{\varepsilon} [Q_x(s, x-t+s, y-t+s) + Q_y(s, x-t+s, y-t+s)] ds \\ u_x(t, x, y) &= \varphi'_x(x-t, y-t) + \int_0^t e^{-\frac{\alpha(t-s)}{\varepsilon} - \frac{\beta s}{\varepsilon}} \frac{1}{\varepsilon} Q_x(s, x-t+s, y-t+s) ds, \\ u_y(t, x, y) &= \varphi'_y(x-t, y-t) + \int_0^t e^{-\frac{\alpha(t-s)}{\varepsilon} - \frac{\beta s}{\varepsilon}} \frac{1}{\varepsilon} Q_y(s, x-t+s, y-t+s) ds. \end{aligned}$$

$$\text{Тогда } u_t(t, x) + u_x(t, x, y) + u_y(t, x, y) = \frac{1}{\varepsilon} e^{\frac{\beta t}{\varepsilon}} Q(t, x, y) - \frac{\alpha}{\varepsilon} u + \frac{\alpha}{\varepsilon} \varphi(x-t, y-t).$$

Умножая обе части последнего уравнения на ε , имеем

$$\varepsilon(u_t + u_x + u_y) + \alpha u(t, x, y) = e^{\frac{\beta t}{\varepsilon}} Q(t, x, y) + \alpha \varphi(x-t, y-t). \quad (4)$$

Учитывая (3) вычислим соотношение

$$\begin{aligned} [A(t, x, y, \varepsilon) - \alpha E] u &= [A(t, x, y, \varepsilon) - \alpha E] \varphi(x-t, y-t) + [A(t, x, y, \varepsilon) - \alpha E] * \\ &* \int_0^t e^{-\frac{\alpha(t-s)}{\varepsilon} - \frac{\beta s}{\varepsilon}} \frac{1}{\varepsilon} Q(s, x-t+s, y-t+s) ds. \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом соотношений (4) и (5), получим следующие равенства

$$\begin{aligned} \varepsilon(u_t + u_x + u_y) + A(t, x, y, \varepsilon)u &= f(t, x, y, u, \varepsilon) + \int_0^t K(t, s, x, y, u, \varepsilon)ds = e^{\frac{\beta t}{\varepsilon}} Q(t, x, y) + \\ &+ \alpha \varphi(x-t, y-t) + A(t, x, y, \varepsilon) \varphi(x-t, y-t) - \alpha \varphi(x-t, y-t) + \\ &+ [A(t, x, y) - \alpha E] \int_0^t e^{-\frac{\alpha}{\varepsilon}(t-s) + \frac{\beta s}{\varepsilon}} \frac{1}{\varepsilon} Q(s, x-t+s, y-t+s) ds. \end{aligned}$$

Отсюда, учитывая (3), находим неизвестную вектор-функцию

$$\begin{aligned} Q(t, x, y) &= e^{-\frac{\beta t}{\varepsilon}} \{ f(t, x, y, [*], \varepsilon) + \\ &+ \int_0^t K(t, s, x, y, [*], \varepsilon) ds - A(t, x, y, \varepsilon) \varphi(x-t, y-t) \} - \\ &- [A(t, x, y, \varepsilon) - \alpha E] \int_0^t e^{-\frac{\alpha+\beta}{\varepsilon}(t-s)} \frac{1}{\varepsilon} Q(s, x-t+s, y-t+s) ds \equiv PQ, \end{aligned} \quad (6)$$

где $[*]$ обозначает правую часть соотношения (3). Уравнение (6) является интегральным уравнением Вольтерра второго рода, относительно неизвестной вектор-функции $Q(t, x, y)$. Правую часть обозначим как оператор PQ .

К нелинейному интегральному уравнению Вольтерра второго рода (6) будем применять принцип сжатых отображений.

Рассмотрим шар $Q = \{ Q(t, x, y) : Q(t, x, y) \in C([0, T_0] \times R \times R) \cap \|Q(t, x, y)\| \leq h \}$.

Отметим, что величины $T_0 \leq T$ и h будут определены ниже.

Пусть

$$\| \{ f(t, x, y, [*], \varepsilon) + \int_0^t K(t, s, x, y, [*], \varepsilon) ds - A(t, x, y, \varepsilon) \varphi(x-t, y-t) \} \| \leq M.$$

Из (6) в силу предположения А имеем $\|PQ\| \leq e^{\frac{\beta T}{\varepsilon}} M + \frac{M_A + \alpha}{\alpha + \beta} h$.

Выберем $\alpha, \beta \in R_+$ так, чтобы

$$\frac{L_1 + L_2 T + M_A + \alpha}{\alpha + \beta} < 1. \quad (7)$$

Тогда, ясно, что $\alpha, \beta \in R_+$. Будем считать $T_0 \leq T$ и h такими, что $e^{\frac{\beta T}{\varepsilon}} M + \frac{M_A + \alpha}{\alpha + \beta} h \leq h$.

Тогда оператор отображает шар Q в себя, т.е. $PQ : Q \rightarrow Q$.

Покажем теперь, что оператор P является оператором сжатия. Из (6), используя предположения А, получаем

$$\begin{aligned} \|PQ_1 - PQ_2\| &\leq \left\| e^{-\frac{\beta t}{\varepsilon}} \left[f(t, x, \varphi(x-t, y-t) + e^{\frac{\beta t}{\varepsilon}} \int_0^t e^{-\frac{\alpha+\beta}{\varepsilon}(t-s)} \frac{1}{\varepsilon} Q_1(s, x-t+s, y-t+s) ds, \varepsilon) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - f(t, x, \varphi(x-t, y-t) + e^{\frac{\beta t}{\varepsilon}} \int_0^t e^{-\frac{\alpha+\beta}{\varepsilon}(t-s)} \frac{1}{\varepsilon} Q_2(s, x-t+s, y-t+s) ds, \varepsilon) \right] \right\| + \\ &\quad \left\| e^{-\frac{\beta t}{\varepsilon}} \left[\int_0^t K(t, s, x, y, \varphi(x-s, y-s) + e^{\frac{\beta s}{\varepsilon}} \int_0^s e^{-\frac{\alpha+\beta}{\varepsilon}(s-\tau)} \frac{1}{\varepsilon} Q_1(s, x-s+\tau, y-s+\tau) d\tau, \varepsilon) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \int_0^t K(t, s, x, y, \varphi(x-s, y-s) + e^{\frac{\beta s}{\varepsilon}} \int_0^s e^{-\frac{\alpha+\beta}{\varepsilon}(s-\tau)} \frac{1}{\varepsilon} Q_2(s, x-s+\tau, y-s+\tau) d\tau, \varepsilon) \right] \right\| + \\ &\quad + \left\| [A(t, x, y, \varepsilon) - \alpha E] \int_0^t e^{-\frac{\alpha+\beta}{\varepsilon}(t-s)} \frac{1}{\varepsilon} [Q_1(s, x-t+s, y-t+s) - Q_2(s, x-t+s, y-t+s)] ds \right\| \leq \frac{L_1 + L_2 T + M_A + \alpha}{\alpha + \beta} \|Q_1 - Q_2\|. \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда из (8), (7) следует что PQ есть оператор сжатия на шаре Q . По принципу сжатых отображений уравнение (6) имеет единственное решение $Q(t, x, y) \in Q$. Подставив найденную вектор-функцию в (3), получим искомое решение задачи Коши (1), (2).

Очевидно, что условие (2) выполнится, если положить в (3) значение $t = 0$.

Изучим теперь дифференциальные свойства решений начальной задачи (1)-(2). Для всех D из равенства (3) следует неравенство

$$\|u(t, x, y)\| \leq \|\varphi(x-t, y-t)\| + \left\| \int_0^t e^{-\frac{\alpha(t-s)}{\varepsilon} - \frac{\beta s}{\varepsilon}} \frac{1}{\varepsilon} Q(s, x-t+s, y-t+s) ds \right\| \leq C_0 + \frac{he^{\frac{\beta T}{\varepsilon}}}{\alpha + \beta} = M_0 = \text{const}.$$

Аналогично, из соотношений (3П) можно доказать, что все производные входящие в уравнение (1), в D равномерно ограничены.

Сформулируем полученные нами результаты.

Теорема 1. Предположим, что выполнены условия (А). Тогда $\exists T_0 > 0$, такое, что начальная задача (1), (2) имеет решение $u(t, x, y) \in \bar{C}^{(1,1,1)}([0, T_0] \times R \times R)$, причем, эти решения имеют интегральное представление в виде (3).

Замечание 1. В силу нелинейности начальной задачи (1), (2), выполнение условия (А), вообще говоря, не гарантирует единственность полученных решений.

II. Рассмотрим задачу Коши для системы нелинейных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных третьего порядка

$$\varepsilon^3 u_{txy} + \varepsilon(u_t + u_x + u_y) + A(t, x, y, \varepsilon)u = f(t, x, y, u, \varepsilon) + \int_0^t K(t, s, x, y, u(s, x, y), \varepsilon) ds, \quad (9)$$

$$t \in [0, T], (x, y) \in R \times R,$$

с начальным условием (2), а функции $A(t, x, y, \varepsilon), f(t, x, y, u, \varepsilon)$ такие же, как в пункте I. Решение задачи Коши (9), (2) будем искать в виде

$$u(t, x, y) = \varphi(x, y) + \int_0^t \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}v} \frac{1}{\varepsilon^3} Q(s, \mu, v) d\mu dv ds, \quad (10)$$

где $Q(t, x, y)$ – неизвестная функция, подлежащая определению; $\alpha, \beta, \gamma \in R_+$ – некоторые положительные постоянные, которые будут определяться позже.

Из (10) находим частные производные первого и второго порядка функции $u(t, x, y)$, т.е.

$$u_t = \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}t + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}v} \frac{1}{\varepsilon^3} Q(t, \mu, v) d\mu dv, \quad (11)$$

$$u_x = \varphi'_x(x, y) + \int_0^t \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}x + \frac{\gamma}{\varepsilon}v} \frac{1}{\varepsilon^3} Q(s, x, v) ds dv, \quad (12)$$

$$u_y = \varphi'_y(x, y) + \int_0^t \int_{-\infty}^x e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}y} \frac{1}{\varepsilon^3} Q(s, \mu, y) ds d\mu$$

$$u_{tx} = \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}t + \frac{\beta}{\varepsilon}x + \frac{\gamma}{\varepsilon}v} \frac{1}{\varepsilon^3} Q(t, x, v) dv. \quad (13)$$

$$u_{txy} = e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}t + \frac{\beta}{\varepsilon}x + \frac{\gamma}{\varepsilon}y} \frac{1}{\varepsilon^3} Q(t, x, y).$$

Тогда из (9), учитывая (11)–(13) имеем

$$\begin{aligned} \varepsilon^3 u_{txy} + \varepsilon(u_t + u_x + u_y) + A(t, x, y, \varepsilon)u &\equiv e^{\frac{\gamma}{\varepsilon}y + \frac{\beta}{\varepsilon}x + \frac{\alpha}{\varepsilon}t} Q(t, x, y) + \varepsilon \varphi'_x(x, y) + \\ &+ \int_0^t \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}x + \frac{\gamma}{\varepsilon}v} \frac{1}{\varepsilon^2} Q(s, x, v) ds dv + \varepsilon \varphi'_y(x, y) + \int_0^t \int_{-\infty}^x e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}y} \frac{1}{\varepsilon^2} Q(s, \mu, y) ds d\mu + \\ &+ \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}t + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}v} \frac{1}{\varepsilon^2} Q(t, \mu, v) d\mu dv + A(t, x, y, \varepsilon)\varphi(x, y) + A(t, x, y, \varepsilon) \cdot \\ &\int_0^t \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}v} \frac{1}{\varepsilon^3} Q(s, \mu, v) d\mu dv ds = f(t, x, y, [*], \varepsilon) + \int_0^t K(t, s, x, y, [*], \varepsilon) ds \end{aligned} \quad (14)$$

где $[*]$ обозначает правую часть соотношения (10).

Из (14) имеем

$$\begin{aligned}
Q(t, x, y) = & e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon}y - \frac{\beta}{\varepsilon}x - \frac{\alpha}{\varepsilon}t} \left[-A(t, x, y, \varepsilon)\varphi(x, y) - \varepsilon\varphi'_x(x, y) - \varepsilon\varphi'_y(x, y) \right] + \\
& + e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon}y - \frac{\beta}{\varepsilon}x - \frac{\alpha}{\varepsilon}t} \left[f(t, x, y, [*], \varepsilon) + \int_0^t K(t, s, x, y, [*], \varepsilon) ds \right] + e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon}y - \frac{\beta}{\varepsilon}x - \frac{\alpha}{\varepsilon}t} - \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}t + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^2} Q(t, \mu, \nu) d\mu d\nu - \\
& - \int_0^t \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}x + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^2} Q(s, x, \nu) ds d\nu - \int_0^t \int_{-\infty}^x e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}y} \frac{1}{\varepsilon^2} Q(s, \mu, y) ds d\mu - \\
& - A(t, x, y, \varepsilon) \int_0^t \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^3} Q(s, \mu, \nu) d\mu d\nu ds] \equiv P(Q), \quad (15)
\end{aligned}$$

К нелинейному интегральному уравнению Вольтерра второго рода (15) применим принцип сжатых отображений.

Условия (C). Предположим, что $A(t, x, y, \varepsilon) \in \bar{C}([0, T] \times R \times R)$,

$$f(t, x, y, u, \varepsilon) \in \bar{C}([0, T] \times R \times R \times R) \cap Lip(L_1|_u),$$

$$K(t, s, x, y, u, \varepsilon) \in \bar{C}((0 \leq s \leq t \leq T) \times R \times R \times R) \cap Lip(L_2|_u),$$

$$\varphi(x, y) \in \bar{C}^{1,1}(R \times R), \varepsilon > 0.$$

Ясно, что $\|A(t, x, y, \varepsilon)\| \leq M_A = const$.

Рассмотрим шар

$$\Omega = \{u(t, x, y) : u(t, x, y) \in \bar{C}([0, T] \times R \times R) \cup \|u\| \leq h\},$$

причем величина h будет, определяется ниже.

Из (15) имеем

$$\begin{aligned}
\|PQ\| \leq & e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon}y - \frac{\beta}{\varepsilon}x - \frac{\alpha}{\varepsilon}t} \left[\|A(t, x, y, \varepsilon)\| \|\varphi(x, y)\| + \varepsilon \|\varphi'_x(x, y)\| + \varepsilon \|\varphi'_y(x, y)\| \right] + \\
& + \left\| e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon}y - \frac{\beta}{\varepsilon}x - \frac{\alpha}{\varepsilon}t} \left[f(t, x, y, \varphi(x, y)) + \int_0^t \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^3} Q(s, \mu, \nu) d\mu d\nu ds, \varepsilon \right] \right\| + \\
& + \left\| e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon}y - \frac{\beta}{\varepsilon}x - \frac{\alpha}{\varepsilon}t} \left[K(t, x, y, \varphi(x, y)) + \int_0^t \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^3} Q(s, \mu, \nu) d\mu d\nu ds, \varepsilon \right] \right\| + \\
& + e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon}y - \frac{\beta}{\varepsilon}x - \frac{\alpha}{\varepsilon}t} \left[\int_0^t \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}x + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^2} \|Q(s, x, \nu)\| ds d\nu + \int_0^t \int_{-\infty}^x e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}y} \frac{1}{\varepsilon^2} \|Q(s, \mu, y)\| ds d\mu + \right. \\
& \left. + \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}t + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^2} \|Q(t, \mu, \nu)\| d\mu d\nu + \|A(t, x, y)\| \times \right. \\
& \left. \times \int_0^t \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^3} \|Q(s, \mu, \nu)\| d\mu d\nu ds \right] \leq M_{fK} + \left(\frac{1}{\alpha\gamma} + \frac{1}{\alpha\beta} + \frac{1}{\beta\gamma} + M_A \frac{1}{\alpha\beta\gamma} \right) \times \\
& \times \|Q\| \leq M + \left(\frac{1}{\alpha\gamma} + \frac{1}{\alpha\beta} + \frac{1}{\beta\gamma} + M_A \frac{1}{\alpha\beta\gamma} \right) \|Q\|.
\end{aligned}$$

$$\text{где } M = M_{fK} + \left\| e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon}y - \frac{\beta}{\varepsilon}x - \frac{\alpha}{\varepsilon}t} \left[\|A(t, x, y, \varepsilon)\| \|\varphi(x, y)\| + \varepsilon \|\varphi'_x(x, y)\| + \varepsilon \|\varphi'_y(x, y)\| \right] \right\|,$$

$$M_{fK} = \max \left\| e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon}y - \frac{\beta}{\varepsilon}x - \frac{\alpha}{\varepsilon}t} \left[f(t, x, y, [*], \varepsilon) + \int_0^t K(t, s, x, y, [*], \varepsilon) ds \right] \right\|.$$

Выберем T, α, β, γ и h так, чтобы

$$\frac{L_1 + L_2 T}{\alpha\beta\gamma} + \frac{1}{\alpha\gamma} + \frac{1}{\alpha\beta} + \frac{1}{\beta\gamma} + M_A \frac{1}{\alpha\beta\gamma} < 1, \quad (16)$$

$$M + \left(\frac{1}{\alpha\gamma} + \frac{1}{\alpha\beta} + \frac{1}{\beta\gamma} + M_A \frac{1}{\alpha\beta\gamma} \right) h \leq h. \quad (17)$$

В силу выбора (17), оператор PQ переводит шар Ω в себя.

Покажем теперь, что оператор PQ и является оператором сжатия.

Покажем теперь, что оператор P и является оператором сжатия. Из соотношения (15) получаем

$$\begin{aligned} \|PQ_1 - PQ_2\| \leq & \left\| e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon}y - \frac{\beta}{\varepsilon}x - \frac{\alpha}{\varepsilon}t} \left[f(t, x, y, \varphi(x, y)) + \int_0^t \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^3} Q_1(s, \mu, \nu) d\mu dv ds, \varepsilon \right) - \right. \\ & \left. - f(t, x, y, \varphi(x, y)) + \int_0^t \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^3} Q_2(s, \mu, \nu) d\mu dv ds, \varepsilon \right] \right\| + \\ & + \left\| e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon}y - \frac{\beta}{\varepsilon}x - \frac{\alpha}{\varepsilon}t} \left[\int_0^t K(t, x, y, \varphi(x, y)) + \int_0^t \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^3} Q_1(s, \mu, \nu) d\mu dv ds, \varepsilon \right) - \right. \\ & \left. - \int_0^t K(t, x, y, \varphi(x, y)) + \int_0^t \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^3} Q_2(s, \mu, \nu) d\mu dv ds, \varepsilon \right] \right\| + \\ & + \left\| e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon}y - \frac{\beta}{\varepsilon}x - \frac{\alpha}{\varepsilon}t} \left[- \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}t + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^2} (Q_1(t, \mu, \nu) - Q_2(t, \mu, \nu)) d\mu dv - \right. \right. \\ & \left. - \int_0^t \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^2} (Q_1(t, \mu, \nu) - Q_2(t, \mu, \nu)) ds dv - \int_0^t \int_{-\infty}^x e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^2} (Q_1(t, \mu, \nu) - Q_2(t, \mu, \nu)) ds d\mu - \right. \\ & \left. - A(t, x, y, \varepsilon) \int_0^t \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^3} (Q_1(t, \mu, \nu) - Q_2(t, \mu, \nu)) d\mu dv ds \right] \right\|. \end{aligned}$$

Заметим, что

$$\left\| e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon}y - \frac{\beta}{\varepsilon}x - \frac{\alpha}{\varepsilon}t} \int_0^t \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^3} d\mu dv ds \right\| \leq \frac{1}{\alpha\beta\gamma}, \quad \text{т.к. } \alpha, \beta, \gamma \in R_+$$

Аналогично

$$\begin{aligned} \left\| e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon}y - \frac{\beta}{\varepsilon}x - \frac{\alpha}{\varepsilon}t} \int_0^t \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^2} dv ds \right\| & \leq \frac{1}{\alpha\gamma}, \\ \left\| e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon}y - \frac{\beta}{\varepsilon}x - \frac{\alpha}{\varepsilon}t} \int_0^t \int_{-\infty}^x e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}s + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^2} d\mu ds \right\| & \leq \frac{1}{\alpha\beta}, \\ \left\| e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon}y - \frac{\beta}{\varepsilon}x - \frac{\alpha}{\varepsilon}t} \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y e^{\frac{\alpha}{\varepsilon}t + \frac{\beta}{\varepsilon}\mu + \frac{\gamma}{\varepsilon}\nu} \frac{1}{\varepsilon^2} d\mu dv \right\| & \leq \frac{1}{\beta\gamma}. \end{aligned}$$

Из (15), используя условия (C) получаем

$$\|PQ_1 - PQ_2\| \leq \left(\frac{L_1 + L_2 T}{\alpha\beta\gamma} + \frac{1}{\alpha\gamma} + \frac{1}{\alpha\beta} + \frac{1}{\beta\gamma} + M_A \frac{1}{\alpha\beta\gamma} \right) \|Q_1 - Q_2\|. \quad (18)$$

Тогда из (16), (18) следует что PQ есть оператор сжатия на шаре Ω . По принципу сжатых отображений уравнение (15) имеет единственное решение в шаре $Q(t, x, y) \in \Omega$. Подставив найденную функцию $Q(t, x, y)$ в (10) находим искомое решение начальной задачи (9), (2).

Теорема 2. Пусть выполнены условия (C). Тогда $\exists T_0 > 0$, такое, что начальная задача (9), (2) имеет решение $u(t, x, y) \in \bar{C}^{(1,1,1)}([0, T_0] \times R \times R)$, причем, эти решения имеют интегральное представление в виде (10).

Замечание 2. В силу нелинейности начальной задачи (9), (2), выполнение условия (C), вообще говоря, не гарантирует единственность полученных решений.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Байзаков А.Б. Разрешимость и структура решений начальной задачи интегро-дифференциальных уравнений в частных производных четвертого порядка / Байзаков А.Б., Джээнбаева Г.А. // Наука, новые технологии и инновации. – Бишкек, 2017. – №5. – С.100-104.
2. Bayzakov A.B. On the initial problem of integro- differential equation in partial derivatives of the third order / Bayzakov A.B., Aitbaev K.A., Asankulova A.S. // Abstracts of VI Congress of the Turkic World Mathematical Society. – Astana, 2017. – P. 44.
3. Иманалиев Т.М. Обоснование и развитие метода дополнительного аргумента для решения дифференциальных уравнений в частных производных: Дисс. докт. физ.-мат.наук: 01.01.02 / Иманалиев Т.М. // – Бишкек, 2000. 128 с.
4. Иманалиев М.И. Сингулярно-возмущенное дифференциальное уравнение второго порядка с точкой поворота / Иманалиев М.И., Какишов К.К., Какишов Ж.К. // Тез. докл. межд. науч. конф.: «Актуальные проблемы дифференц. уравнений и мат. физики». – Алматы, 2005. – С. 94.
5. Иманалиев М.И. О задачах Коши для нелинейных дифференциальных уравнений с частными производными шестого порядка / Иманалиев М.И., Иманалиев Т.М., Какишов К. // Исслед. по интегро-дифференц. уравнениям. – Бишкек: Илим, 2007. вып. 36. – С. 19-28.
6. Байзаков А.Б. Методы преобразования решений в аналитической и асимптотической теории дифференциальных и интегральных уравнений [Текст]: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.01.02 / Байзаков А.Б. // – Бишкек, 2011. – 31 с.
7. Байзаков А.Б. Разрешимость и структура начальной задачи сингулярно-возмущенных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка с точкой поворота / Байзаков А.Б., Кыдыралиев Т.Р. // Ижевск, 2016. № 5(53). – С. 22-27
8. Кыдыралиев Т.Р. О задаче Коши нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка с комплексными параметрами / Кыдыралиев Т. // – Ижевск, 2016. № 3(55). – С. 16-20
9. Айтбаев К.А. Разрешимость и структура решений дифференциальных и интегральных уравнений: автореф. дис. ... канд.ф.-м.н.:01.01.02 / Айтбаев К.А. – Бишкек, 2016. – 18с.
10. Байзаков А.Б. О разрешимости начальной задачи сингулярно-возмущенной интегро-дифференциальных уравнений в частных производных третьего порядка / Байзаков А.Б., Джээнбаева Г.А. Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии: инновации в науке и образовании» (Актюбинский региональный государственный университет им. К.Жубанова).- г.Актюбинск, 2015. – С. 130-132.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bayzakov A.B. Razreshimost i struktura reshenii nachalnoi zadachi integro-differentsialnykh uravnenii v chastnykh proizvodnykh chetvertogo poriadka [Solvability and Structure of Solutions of Initial Problem of Integro-differential Partial Differential Equations of the Fourth Order] / Bayzakov A.B., Dzhaenbaeva G.A. // Nauka, novyye tekhnologii i innovatsii [Science, New Technologies and Innovations]. - Bishkek, 2017. - No.5. - P.100-104. [in Russian]
2. Bayzakov A.B. On the initial problem of integro- differential equation in partial derivatives of the third order / Bayzakov A.B., Aitbaev K.A., Asankulova A.S. // Tezisy VI s"yezda Tyurkskogo mirovogo matematicheskogo obshchestva [Abstracts of VI Congress of the Turkic World Mathematical Society]. – Astana, 2017. – P. 44. [in Russian]
3. Imanaliev T.M. Obosnovanie i razvitie metoda dopolnitelnogo argumenta dlia resheniya differentsialnykh uravnenii v chastnykh proizvodnykh: Diss.... dokt. fiz.-mat.nauk: 01.01.02 [Substantiation and Development of the Method of an Additional Argument for Solving Partial Differential Equations: Thesis of PhD in Physics and Mathematics: 01.01.02] / Imanaliev T.M.// – Bishkek, 2000. 128 p. [in Russian]
4. Imanaliev M.I. Singuliarno-vozmushchennoe differentsialnoe uravnenie vtorogo poriadka s tochkoi povorota [Singularly Perturbed Second-Order Differential Equation with Pivot Point] / Imanaliev M.I., Kakishov K.K., Kakishov Zh.K.// Tezisy nauch. prakt. konf.: «Aktual'nyye problemy differentsiala. Uravneniya i mat. Fizika [Thesis of Int. Sci. Conf.: "Topical Problems of Differential. Equations and Mat. Physics."] - Almaty, 2005. - P. 94. [in Russian]
5. Imanaliev M.I. O zadachakh Koshi dlia nelineinykh differentsialnykh uravnenii s chastnymi proizvodnymi shestogo poriadka [On Cauchy Problems for Non-linear Partial Differential Equations of the Sixth Order] / Imanaliev M.I., Kakishov K.K., Kakishov Zh.K.// Izucheniye integro-differentsiala. uravneniya [Study of Integro-differen. Equations]. – Bishkek: Ilim, 2007. Issue 36. - P. 19-28. [in Russian]
6. Bayzakov A.B. Metody preobrazovaniya reshenii v analiticheskoi i asimptoticheskoi teorii differentsialnykh i integralnykh uravnenii [Tekst]: avtoref. dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk: 01.01.02 [Methods of Transforming Solutions in Analytic and Asymptotic Theory of Differential and Integral Equations [Text]: Author's abstract. of PhD in Math. Sciences: 01.01.02] / Bayzakov A.B.// – Bishkek, 2011. – 31 p. [in Russian]
7. Bayzakov A.B. Razreshimost i struktura nachalnoi zadachi singuliarno-vozmushchennykh integro-differentsialnykh uravnenii v chastnykh proizvodnykh pervogo poriadka s tochkoi povorota [Solvability and Structure of Initial Problem of Singularly Perturbed First-order Integro-differential Partial Differential Equations with Pivot Point] / Bayzakov A.B., Kydyraliev T.R.// – Izhevsk, 2016. No. 5 (53). - P. 22-27 [in Russian]

8. Kydyraliev T.R. O zadache Koshi nelineynykh differentsialnykh uravnenii v chastnykh proizvodnykh vtorogo poriadka s kompleksnymi parametrami [On the Cauchy Problem of Second Order Non-linear Partial Differential Equations with Complex Parameters] / Kydyraliev T.R. // – Izhevsk, 2016. No. 3(55). – P. 16-20

9. Aitbaev K.A. Razreshimost i struktura reshenii differentsialnykh i integralnykh: avtoref. dis. ... kand.f.-m.n.:01.01.02 [Solvability and Structure of Solutions of Differential and Integral: Author's abstract of PhD in Physics and Mathematics: 01.01.02] / Aitbaev K.A. –Bishkek, 2016. –18 p. [in Russian]

10. Bayzakov A.B. O razreshimosti nachalnoi zadachi singuliarno-vozmushchennoi integro-differentsialnykh uravnenii v chastnykh proizvodnykh tretiego poriadka [On Solvability of the Initial Problem of Singular-Perturbed Integro-differential Partial Differential Equations of the Third Order] / Bayzakov A.B., Dzhaenbaeva G.A. // Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Informatsionnyye tekhnologii: innovatsii v nauke i obrazovanii» (Aktubinskiy oblastnoy gosudarstvennyy universitet im. K. Zhubanova) [International Scientific and Practical Conference "Information Technologies: Innovations in Science and Education" (Aktubinsk Regional State University named after K.Zhubanov)] .- Aktobe City, 2015. - P. 130-132. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.004>

СМЕШАННАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ОДНОГО КВАЗИЛИНЕЙНОГО ПАРАБОЛИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ С ГИСТЕРЕЗИСОМ

Научная статья

Исаева С.Э.*

ORCID: 000-0002-0872-1350,

Бакинский Государственный Университет, Баку, Азербайджан

* Корреспондирующий автор (isayevasevda[at]rambler.ru)

Аннотация

В данной работе рассматривается начально-краевая задача для одного квазилинейного параболического уравнения с запоминающим оператором в ограниченной области с достаточно гладкой границей. Доказана теорема о существовании решений рассматриваемой начально-краевой задачи с запоминающим оператором. Для доказательства этой теоремы использован метод дискретизации по времени. Доказана также единственность решений этой задачи, если запоминающий оператор является гистерезисной нелинейностью типа обобщенного люфта.

Ключевые слова: квазилинейное параболическое уравнение, запоминающий оператор, гистерезис, обобщенный люфт.

MIXED PROBLEM FOR ONE QUASILINEAR PARABOLIC EQUATION WITH HYSTERESIS

Research article

Isaeva S.E.*

ORCID: 000-0002-0872-1350,

Baku State University, Baku, Azerbaijan

* Corresponding author (isayevasevda[at]rambler.ru)

Abstract

The paper considers an initial-boundary value problem for a quasilinear parabolic equation with a memory operator in a bounded domain with a sufficiently smooth boundary. A theorem on the existence of solutions of the initial-boundary value problem with a memory operator is proved. We used the method of discretization with respect to time to prove this theorem. The uniqueness of the solutions of this problem is also proved if the memory operator is a hysteresis nonlinearity of the generalized backlash type.

Keywords: quasilinear parabolic equation, memory operator, hysteresis, generalized backlash.

Введение

Дифференциальные уравнения с запоминающим оператором, особенно уравнения с гистерезисом имеют большое значение среди нелинейных дифференциальных уравнений с частными производными. Понятие гистерезисного оператора впервые было введено в [1]. Смешанные задачи с гистерезисными нелинейностями изучены, например, в работах [2], [3], [4]. В данной работе рассматривается начально-краевая задача для одного квазилинейного параболического уравнения с запоминающим оператором. В случае отсутствия запоминающего оператора, эта задача исследована, например в [5]. Разрешимость такой задачи без нелинейного слагаемого $|u|^p$, исследована в работе [6].

В данной работе доказана теорема о существовании решений рассматриваемой задачи. Доказана также единственность решений этой задачи, если запоминающий оператор является гистерезисной нелинейностью типа обобщенного люфта. Отметим, что смешанные задачи с такими гистерезисными нелинейностями изучены, например, в работах [7,8].

Постановка задачи и основные результаты

Пусть $\Omega \subset R^N (N \geq 1)$ ограниченная область с достаточно гладкой границей Γ В области $Q = \Omega \times (0, T)$ рассмотрим квазилинейное параболическое уравнение:

$$\frac{\partial}{\partial t} [u + F(u)] - \Delta u + |u|^p u = f \quad (1)$$

с граничным условием

$$u = 0, (x, t) \in \Gamma \times (0, T) \quad (2)$$

и с начальным условием

$$[u + F(u)]_{t=0} = u^0 + w^0, \quad (3)$$

где $0 < p \leq \frac{2}{2-N}$ если $N \geq 3$ и $p > 0$ если $N = 1, 2$; $f : \Omega \times (0, T) \rightarrow R$ и нелинейный оператор F действует из пространства $M(\Omega; C^0([0, T]))$ в $M(\Omega; C^0([0, T]))$, где $M(\Omega; C^0([0, T]))$ - пространство измеримых функций, действующих из Ω в $C^0([0, T])$. Предполагается, что F является запоминающим оператором, который действует в каждой точке $x \in \Omega$ независимо, то есть $[F(u(x, \cdot))](t)$ зависит от $u(x, \cdot)|_{[0, t]}$ и не зависит от $u(y, \cdot)|_{[0, t]}$ для $y \neq x$.

Пусть оператор F удовлетворяет следующим условиям:

$$\begin{cases} \text{если для любых } v_1, v_2 \in M(\Omega; C^0([0, T])) \text{ и для любого } t \in [0, T] \\ v_1 = v_2 \text{ на } [0, t], \text{ то } [F(v_1)](\cdot, t) = [F(v_2)](\cdot, t) \text{ п.в. в } \Omega; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \text{если } v_n \in M(\Omega; C^0([0, T])) \text{ и } v_n \rightarrow v \text{ равномерно на } [0, T], \text{ п.в. в } \Omega, \\ \text{то } F(v_n) \rightarrow F(v) \text{ равномерно на } [0, T], \text{ п.в. в } \Omega. \end{cases} \quad (5)$$

Пусть $V = H_0^1(\Omega)$. Предполагаем, что

$$u^0 \in V, w^0 \in L^2(\Omega), \quad (6)$$

$$f = f_1 + f_2, f_1 \in L^2(Q), f_2 \in W^{1,1}(0, T; V'). \quad (7)$$

Определение. Функция $u \in M(\Omega; C^0([0, T])) \cap L^2(0, T; V)$ такая, что $F(u) \in L^2(Q)$

и удовлетворяющая для любого $v \in L^2(0, T; V) \cap H^1(0, T; L^2(\Omega))$ ($v(\cdot, T) = 0$ п.в. в Ω) равенству

$$\iint_Q \left\{ -[u + F(u)] \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla u \cdot \nabla v + |u|^p uv \right\} dx dt = \int_0^T \langle f, v \rangle_{V'} dt + \int_{\Omega} [u^0(x) + w^0(x)] v(x, 0) dx, \quad (8)$$

называется решением задачи (1)-(3).

Из определения решения следует, что

$$\frac{\partial}{\partial t} [u + F(u)] - \Delta u + |u|^p u = f \quad \text{в } D'(0, T; V'), \quad (9)$$

откуда

$$\frac{\partial}{\partial t} [u + F(u)] = f + \Delta u - |u|^p u \in L^2(0, T; V');$$

поэтому $u + F(u) \in H^1(0, T; V')$ и (9) удовлетворяется в V' п. в. на $(0, T)$. Интегрирование по частям в соотношении (8) дает следующее:

$$[u + F(u)]_{t=0} = u^0 + w^0 \text{ в } V' \text{ (в смысле распределений)}. \quad (10)$$

В свою очередь из (9) и (10) получается соотношение (8).

Предположим, что оператор F удовлетворяет также условиям:

$$\begin{cases} \text{существуют } \exists L > 0, \exists g \in L^2(\Omega), \text{ что для любого } v \in M(\Omega; C^0([0, T])) \\ \|F(v)(x, \cdot)\|_{C^0([0, T])} \leq L \|v(x, \cdot)\|_{C^0([0, T])} + g(x) \text{ п.в. в } \Omega; \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \text{если } v \in M(\Omega; C^0([0, T])) \text{ и для любого } [t_1, t_2] \subset [0, T] \\ v(x, \cdot) \text{ является аффинной на } [t_1, t_2] \text{ п.в. в } \Omega, \\ \text{то } \{F(v)(x, t_2) - F(v)(x, t_1)\} [v(x, t_2) - v(x, t_1)] \geq 0, \text{ п.в. в } \Omega. \end{cases} \quad (12)$$

Теорема 1. Пусть выполняются условия (4)-(7), (11), (12). Тогда задача (1)-(3) имеет по крайней мере одно решение, для которого имеет место:

$$u \in H^1(0, T; L^2(\Omega)) \cap L^\infty(0, T; V), \quad F(u) \in L^2(\Omega; C^0([0, T])). \quad (13)$$

Доказательство. Применим метод дискретизации по переменному t (см.[6]).

Разбивая отрезок $[0, T]$ точками $t_n = nk$, $n = 0, 1, \dots, m$ на m частей, обозначая

$$f_{1m}^n = \frac{1}{k} \int_{(n-1)k}^{nk} f_1(\tau) d\tau, \quad f_{2m}^n = f_2(nk), \quad f_m^n = f_{1m}^n + f_{2m}^n, \quad n = 1, \dots, m,$$

$$u_m^0 = u^0, \quad w_m^0 = w^0, \quad u_m^n(x) = u(x, nk), \quad n = 1, \dots, m,$$

$$w_m^n(x) = [F(u_m)](x, nk), \quad n = 1, \dots, m, \quad \text{п.в. в } \Omega,$$

$u_m(x, \cdot)$ – линейная интерполяция по времени $u_m^n(x)$ для $n = 0, 1, \dots, m$ п.в. в Ω и аналогичным образом определяя $w_m(x, \cdot)$, рассмотрим задачу

$$\frac{u_m^n - u_m^{n-1}}{k} + \frac{w_m^n - w_m^{n-1}}{k} - \Delta u_m^n + |u_m^n|^p u_m^n = f_m^n \quad \text{в } V', n = 1, 2, \dots, m, \quad (14)$$

$$u_m^0 = u^0, \quad w_m^0 = w^0. \quad (15)$$

Покажем, что эта задача может быть решена шаг за шагом. Предположим, что $u_m^1, u_m^2, \dots, u_m^{n-1} \in V$ известны для любого $n \in \{1, 2, \dots, m\}$ и рассмотрим задачу определения u_m^n . Функция $u_m(x, \cdot)$ является аффинной на отрезке $[(n-1)k, nk]$, почти для всякого $x \in \Omega$; поэтому $[F(u_m)](x, nk)$ зависит только от $u_m(x, \cdot)|_{[0, (n-1)k]}$, которое известно, и от $u_m^n(x)$, которое должно быть определено. Поэтому

$$w_m^n(x) = [F(u_m)](x, nk) = \Psi_m^n(u_m^n(x), x), \quad \text{п.в. в } \Omega.$$

Пусть

$$U_m^{n-1}(x) = \max_{[0, (n-1)k]} |u_m(x, \cdot)| = \max_{j=0, 1, \dots, n-1} |u_m^j(x)|, \quad \text{п.в. в } \Omega. \quad (16)$$

Согласно (16), $U_m^{n-1} \in L^2(\Omega)$ и из (11) получаем, что

$$|\Psi_m^n(v(x), x)| \leq L \max\{|U_m^{n-1}(x)|, |v(x)|\} + g(x), \quad \text{п.в. в } \Omega. \quad (17)$$

для любого $v \in M(\Omega)$.

Определим оператор $\hat{\Psi}_m^n : M(\Omega) \rightarrow M(\Omega)$, $v \rightarrow \Psi_m^n(v(\cdot), \cdot)$. Согласно (5) и (17) имеем

$$\Psi_m^n : L^2(\Omega) \rightarrow L^2(\Omega) \text{ аффинно ограничен и сильно непрерывен.} \quad (18)$$

Из (12) получается, что

$$(\hat{\Psi}_m^n(v) - w_m^{n-1})(v - u_m^{n-1}) \geq 0, \quad \text{п.в. в } \Omega$$

для любого $v \in L^2(\Omega)$. Из последнего неравенства и из (17), получаем, что существуют такие постоянные $c_1, c_2 \in R^+$ (зависящие от m, n , но не от v), что

$$\int_{\Omega} \hat{\Psi}_m^n(v) v dx \geq -c_1 \|v\|_{L^2(\Omega)} - c_2 \quad (19)$$

для $v \in L^2(\Omega)$.

Если не учесть фиксированные индексы m и n , то уравнение (14) можем записать в виде:

$$u + \hat{\Psi}(u) - k\Delta u + k|u|^p u = \varphi \quad \text{в } V', \quad (20)$$

где $\varphi = kh + u_m^{n-1} + w_m^{n-1}$. Для доказательства существования хотя бы одного решения этого уравнения воспользуемся стандартной процедурой. Пусть $\{V_j\}_{j \in N}$ – последовательность конечномерных подпространств, покрывающих V ; для любого $j \in N$ рассмотрим следующую конечномерную задачу:

$$\begin{cases} \text{найти функцию } u_j \in V_j \text{ такую, что} \\ Z(u_j) = u_j + \hat{\Psi}(u_j) - k\Delta u_j + k|u_j|^p u_j = \varphi \quad \text{в } V_j^1. \end{cases} \quad (21)$$

Согласно (18), $Z : V \rightarrow V'$ является сильно непрерывным оператором. Из (19) (а также из того факта, что для $f(u) = |u|^p u$ выполняется неравенство $f(u) \cdot u \geq -\bar{c}_1 u^2 - \bar{c}_2$, где $\bar{c}_1, \bar{c}_2 \in R^+$ – некоторые постоянные) получается, что этот оператор удовлетворяет следующему условию:

$$\frac{1}{\|v\|_V} \langle Z(v), v \rangle_V \rightarrow +\infty \quad \text{при } \|v\|_V \rightarrow +\infty. \quad (22)$$

Отсюда получаем, что задача (21) имеет хотя бы одно решение (по одному варианту теоремы Брауэра о неподвижной точке, [5], гл. I, раздел 4.3). Умножая (21) на u_j и используя (22), получаем, что последовательность $\{u_j\}$ равномерно ограничена в V . Следовательно, существует такая функция u и можно выделить такую подпоследовательность $\{u_{j'}\}$, что $u_{j'} \rightarrow u$ слабо в V .

Согласно компактному вложению: $V \subset L^2(\Omega)$ и (18) имеем

$$\hat{\Psi}(u_j) \rightarrow \hat{\Psi}(u) \text{ в } L^2(\Omega).$$

Поэтому переходя к пределу в (21) (для $j = \tilde{j}$) при $\tilde{j} \rightarrow \infty$, получаем (20); то есть существует функция u , которая является решением уравнения (20) (или (14)).

Чтобы получить априорные оценки, умножим обе части (14) на $u_m^n - u_m^{n-1}$. Тогда суммируя по $n = 1, 2, \dots, l$ для любого $l \in \{1, 2, \dots, m\}$ и интегрируя по Ω , получим:

$$\begin{aligned} k \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} \left(\frac{u_m^n - u_m^{n-1}}{k} \right)^2 dx + \frac{1}{k} \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} (w_m^n - w_m^{n-1}) (u_m^n - u_m^{n-1}) dx + \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} \nabla u_m^n (\nabla u_m^n - \nabla u_m^{n-1}) dx + \\ + \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} |u_m^n|^p u_m^n (u_m^n - u_m^{n-1}) dx = \sum_{n=1}^l \int_{V'} \langle f_m^n, u_m^n - u_m^{n-1} \rangle_V \end{aligned} \quad (23)$$

Согласно (12) имеем

$$(w_m^n - w_m^{n-1})(u_m^n - u_m^{n-1}) \geq 0 \text{ п.в. в } \Omega, n = 1, 2, \dots, l; \quad (24)$$

кроме того

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} \nabla u_m^n (\nabla u_m^n - \nabla u_m^{n-1}) dx &\geq \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} \left(|\nabla u_m^n|^2 - \frac{1}{2} |\nabla u_m^n|^2 - \frac{1}{2} |\nabla u_m^{n-1}|^2 \right) dx = \\ &= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} (|\nabla u_m^n|^2 - |\nabla u_m^{n-1}|^2) dx = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (|\nabla u_m^l|^2 - |\nabla u^0|^2) dx \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} |u_m^n|^{p+2} dx - \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} |u_m^n|^p u_m^n u_m^{n-1} dx &\geq \\ &\geq \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} |u_m^n|^{p+2} dx - \sum_{n=1}^l \left(\int_{\Omega} |u_m^n|^{(p+1)\frac{p+2}{p+1}} dx \right)^{\frac{p+1}{p+2}} \cdot \left(\int_{\Omega} |u_m^{n-1}|^{p+2} dx \right)^{\frac{1}{p+2}} = \\ &= \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} |u_m^n|^{p+2} dx - \sum_{n=1}^l \left(\int_{\Omega} |u_m^n|^{(p+2)} dx \right)^{\frac{p+1}{p+2}} \cdot \left(\int_{\Omega} |u_m^{n-1}|^{p+2} dx \right)^{\frac{1}{p+2}} \geq \\ &\geq \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} |u_m^n|^{p+2} dx - \frac{p+1}{p+2} \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} |u_m^n|^{p+2} dx - \frac{1}{p+2} \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} |u_m^{n-1}|^{p+2} dx = \\ &= \frac{1}{p+2} \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} (|u_m^n|^{p+2} - |u_m^{n-1}|^{p+2}) dx = \frac{1}{p+2} \int_{\Omega} (|u_m^l|^{p+2} - |u^0|^{p+2}) dx. \end{aligned} \quad (26)$$

Учитывая (24), (25), (26) в (23), имеем

$$\begin{aligned} k \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} \left(\frac{u_m^n - u_m^{n-1}}{k} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_{\Omega} (|\nabla u_m^l|^2 - |\nabla u^0|^2) dx + \\ + \frac{1}{p+2} \int_{\Omega} (|\nabla u_m^l|^{p+2} - |u^0|^{p+2}) dx \leq \sum_{n=1}^l \int_{V'} \langle f_m^n, u_m^n - u_m^{n-1} \rangle_V = \\ = \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} f_{1m}^n (u_m^n - u_m^{n-1}) dx + \int_{V'} \langle f_{2m}^l, u_m^l \rangle_V - \int_{V'} \langle f_2(0), u^0 \rangle_V - \\ - \sum_{n=2}^l \int_{V'} \langle f_{2m}^n - f_{2m}^{n-1}, u_m^{n-1} \rangle_V \leq \left(k \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} (f_{1m}^n)^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \left[k \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} \left(\frac{u_m^n - u_m^{n-1}}{k} \right)^2 dx \right]^{\frac{1}{2}} + \\ + \left(\max_{n=1, \dots, l} \|f_{2m}^n\|_{V'} + k \sum_{n=2}^l \left\| \frac{f_{2m}^n - f_{2m}^{n-1}}{k} \right\|_{V'} \right) \max_{n=1, \dots, l} \|u_m^n\|_V + \|f_2(0)\|_{V'} \|u^0\|_V \leq \\ \leq \frac{1}{2} \|f_1\|_{L^2(\mathcal{Q})}^2 + \frac{k}{2} \sum_{n=1}^l \int_{\Omega} \left(\frac{u_m^n - u_m^{n-1}}{k} \right)^2 dx + C_1 \|f_2\|_{W^{1,1}(0,T;V')}^2 + \frac{1}{4} \max_{n=0,1, \dots, l} \|u_m^n\|_V^2, \end{aligned} \quad (27)$$

где постоянная C_1 не зависит от m . Так как (27) справедливо для любого $l \in \{1, 2, \dots, m\}$, то проведя несложные преобразования, получим, что

$$k \sum_{k=1}^m \left\| \frac{u_m^n - u_m^{n-1}}{k} \right\|_{L^2(\Omega)}^2, \quad \max_{n=1, \dots, m} \|u_m^n\|_V \leq C_2, \quad (28)$$

где постоянная C_2 не зависит от m .

Пусть

$$\tilde{u}_m(x, t) = u_m^n(x), \quad \text{если } (n-1)k < t \leq nk, \quad n = 1, 2, \dots, m; \quad \text{п.в. в } \Omega$$

и определим \tilde{w}_m, \tilde{f}_m аналогичным образом. Тогда из (14) и (28) имеем:

$$\frac{\partial}{\partial t}(u_m + w_m) - \Delta \tilde{u}_m + (\tilde{u}_m)^p \tilde{u}_m = \tilde{f}_m \quad \text{в } V', \quad \text{п.в. на } (0, T), \quad (29)$$

$$\|u_m\|_{H^1(0, T; L^2(\Omega)) \cap L^\infty(0, T; V)}, \quad \|\tilde{u}_m\|_{L^\infty(0, T; V)} \leq \text{const}. \quad (30)$$

Так как $H^1(0, T; L^2(\Omega)) = L^2(\Omega; H^1(0, T)) \subset L^2(\Omega; C^0([0, T]))$ (с непрерывным вложением), то согласно (11) и (30)

$$\|w_m\|_{L^2(\Omega; C^0([0, T]))} \leq L \|u_m\|_{L^2(\Omega; C^0([0, T]))} + \|g\|_{L^2(\Omega)} \leq \text{const}. \quad (31)$$

и поскольку $\varphi \rightarrow |\varphi|^p \varphi$ порождает отображение $L^{p+2}(\Omega) \rightarrow L^{p'}(\Omega)$, $\frac{1}{p+2} + \frac{1}{p'} = 1$, то легко проверить, что

$$|\tilde{u}_m|^p \tilde{u}_m \in L^\infty(0, T; L^{p'}(\Omega)). \quad (32)$$

Из соотношений (29)-(32) получаем, что

$$\begin{aligned} \|u_m + w_m\|_{H^1(0, T; V')} &\leq C_3 \|u_m + w_m\|_{L^2(Q)} + \left\| \frac{\partial}{\partial t}(u_m + w_m) \right\|_{L^2(0, T; V')} \leq \\ &\leq C_3 \|u_m\|_{L^2(Q)} + C_3 \|w_m\|_{L^2(Q)} + \|\tilde{f}_m + \Delta \tilde{u}_m - |\tilde{u}_m|^p \tilde{u}_m\|_{L^2(0, T; V')} \leq \\ &\leq C_3 \|u_m\|_{L^2(Q)} + C_3 \sqrt{T} \|w_m\|_{L^2(\Omega; C^0([0, T]))} + \|\tilde{f}_m + \Delta \tilde{u}_m\|_{L^2(0, T; V')} + \\ &+ \left\| |\tilde{u}_m|^p \tilde{u}_m \right\|_{L^2(0, T; V')} \leq \text{const} \end{aligned} \quad (33)$$

Известно, что если D - Банахово пространство и $\rho' = \frac{\rho}{\rho-1}$ при $\rho > 1$ ($\rho' = \infty$), то

$$L^{\rho'}(\Omega; D') \subset (L^\rho(\Omega; D))' = L_{w*}^{\rho'}(\Omega; D')$$

(см. [9]); кроме того, если D рефлексивно, или D' сепарабельно, то

$$L^{\rho'}(\Omega; D') = (L^\rho(\Omega; D))'.$$

Используя этот факт для $D = L^1(0, T)$ и оценку (33), заключаем, что существуют функции u, w такие, что (после выделения быть может под последовательности) при $m \rightarrow \infty$

$$u_m \rightarrow u \quad * - \text{слабо в } H^1(0, T; L^2(\Omega)) \cap L^\infty(0, T; V), \quad (34)$$

$$\tilde{u}_m \rightarrow u \quad * - \text{слабо в } L^\infty(0, T; V), \quad (35)$$

$$w_m \rightarrow w \quad * - \text{слабо в } L_{w*}^2(\Omega; L^\infty(0, T)), \quad (36)$$

$$u_m + w_m \rightarrow u + w \quad * - \text{слабо в } L_{w*}^2(\Omega; L^\infty(0, T)) \cap H^1(0, T; V'), \quad (37)$$

где $L_{w*}^2(\Omega; L^\infty(0, T)) = (L^2(\Omega; L^1(0, T)))'$.

Учитывая (34)-(37), переходим к пределу в (29) при $m \rightarrow \infty$ и получаем (9); легко получается и (10). И это, как мы уже отметили, приводит к (8).

Известно ([10], глава 4, стр. 378), что

$$H^1(0, T; L^2(\Omega)) \cap L^\infty(0, T; V) \subset H^1(Q) \subset H^s(\Omega; H^{1-s}(0, T)) \subset L^2(\Omega; C^0([0, T])) \left(s \in \left(0, \frac{1}{2}\right) \right)$$

с непрерывными вложениями (последнее вложение также компактное). Поэтому, выделяя быть может очередную подпоследовательность, имеем:

$$u_m \rightarrow u \quad \text{равномерно на } [0, T], \quad \text{п. в. в } \Omega.$$

Тогда, согласно (5), $F(u) \in M(\Omega; C^0([0, T]))$ и $F(u_m) \rightarrow F(u)$ равномерно на $[0, T]$, п. в. в Ω .

Так как $w_m(x, \cdot)$ является линейной интерполяцией по времени от $w_m^n(x) = [F(u_m)](x, nk)$ ($n = 0, 1, \dots, m$) для почти всех $x \in \Omega$, то имеем $w_m \rightarrow F(u)$ равномерно на $[0, T]$, п. в. в Ω .

Поэтому согласно (36) имеем: $w = F(u)$ п. в. в Q . Из (11) получается, что w_m сходится в $L^2(\Omega; C^0([0, T]))$.

Теорема 1 доказана.

Теперь рассмотрим задачу (1)-(3) при дополнительном условии, что F является гистерезисной нелинейностью типа обобщенного люфта (см. [6]).

Пусть для функций $\gamma_l(\sigma), \gamma_r(\sigma) \in C^0(R)$ удовлетворяется условие

$$\gamma_r(\sigma) \leq \gamma_l(\sigma) \quad (38)$$

для любого $\sigma \in R$.

Обозначим через E гистерезисный оператор обобщенного люфта (см. [6], глава III). Зафиксируем некоторое $\xi^0 \in L^1(\Omega)$ и предположим, что

$$[F(v)](x, t) = [E(v(x, \cdot), \xi^0(x))](t) \quad \text{п. в. в } \Omega, \quad (39)$$

для любого $v \in M(\Omega; C^0([0, T]))$ и для любого $t \in [0, T]$.

Оператор E удовлетворяет условиям (4)-(5), (11)-(12). Для этого оператора удовлетворяются также неравенство

$$\left| \frac{\partial}{\partial t} F(u) \right| \leq L \left| \frac{\partial u}{\partial t} \right| \quad \text{п. в. на } (0, T),$$

и следующее

Неравенство Гильберта ([6], глава III). Пусть

$$(\sigma_i, \varepsilon_i^0) \in W^{1,1}(0, T) \times R \quad (i = 1, 2)$$

и $g: [0, T] \rightarrow R$ - измеримая функция, такая, что $g \in H(\sigma_1 - \sigma_2)$ п. в. на $(0, T)$. Если $\varepsilon_i = E(\sigma_i, \varepsilon_i^0)$ ($i = 1, 2$), $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$ и $\bar{\varepsilon}^+ = \max\{\bar{\varepsilon}, 0\}$, то

$$\frac{d\bar{\varepsilon}}{dt} g \geq \frac{d}{dt} (\bar{\varepsilon}^+) \quad \text{п. в. на } (0, T).$$

Теорема 2. Пусть $u_i, \xi_i^0 \in L^2(\Omega)$, $h_i(x) \in L^2(\Omega)$ ($i = 1, 2$); $\gamma_l(\sigma), \gamma_r(\sigma) \in C^0(R)$ - липшицево непрерывны, аффинно ограничены и удовлетворяют условию (38). Определим F как в (39) и предположим, что

$$\omega_i^0 = \min \left\{ \max \left\{ \xi_i^0, \gamma_r(u_i^0) \right\}, \gamma_l(u_i^0) \right\} \quad \text{п. в. на } \Omega \quad (i = 1, 2).$$

Если $u_i \in W^{1,1}(0, T; L^1(\Omega)) \cap L^2(0, T; V)$ - соответствующие решения задачи (1)-(3) с $f = h_i$ и $w_i = F(u_i)$ ($i = 1, 2$), то для любого $t \in [0, T]$ удовлетворяются неравенство

$$\int_{\Omega} \left[(u_1 - u_2)^+(x, t) + (w_1 - w_2)^+(x, t) \right] dx \leq \int_{\Omega} \left[(u_1^0 - u_2^0)^+(x) + (w_1^0 - w_2^0)^+(x) \right] dx + T \int_{\Omega} (h_1 - h_2)^+ dx. \quad (40)$$

Доказательство. Пусть

$$H_m(\eta) = \begin{cases} 1, & \text{если } \eta > \frac{1}{m}, \\ m\eta, & \text{если } 0 \leq \eta < \frac{1}{m}, \\ 0, & \text{если } \eta < 0. \end{cases}$$

Согласно теореме III. 2.3 (см. [1]), $w_i \in W^{1,1}(0, T; L^1(\Omega))$, $i = 1, 2$.

Так как

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [u_1 + F(u_1)] - \Delta u_1 + |u_1|^p u_1 &= h_1, \\ \frac{\partial}{\partial t} [u_2 + F(u_2)] - \Delta u_2 + |u_2|^p u_2 &= h_2, \end{aligned}$$

то

$$\frac{\partial}{\partial t} [(u_1 - u_2) + F(u_1) - F(u_2)] - \Delta(u_1 - u_2) + |u_1|^p u_1 - |u_2|^p u_2 = h_1 - h_2,$$

откуда умножая на $H_m(u_1 - u_2)$ и интегрируя по Ω , имеем

$$\int_{\Omega} \left[\frac{\partial}{\partial t} (u_1 - u_2) + \frac{\partial}{\partial t} (w_1 - w_2) \right] H_m(u_1 - u_2) dx + \int_{\Omega} \nabla(u_1 - u_2) \nabla H_m(u_1 - u_2) dx +$$

$$+ \int_{\Omega} [|u_1|^p u_1 - |u_2|^p u_2] H_m(u_1 - u_2) dx = \int_{\Omega} (u_1 - u_2) H_m(u_1 - u_2) dx. \quad (41)$$

Так как

$$\int_{\Omega} \nabla(u_1 - u_2) \nabla H_m(u_1 - u_2) dx = \int_{\Omega} H'_m(u_1 - u_2) |\nabla(u_1 - u_2)|^2 dx \geq 0$$

п. в. на $(0, T)$ и

$$\int_{\Omega} [|u_1|^p u_1 - |u_2|^p u_2] H_m(u_1 - u_2) dx \geq 0,$$

то из (41) получаем

$$\int_{\Omega} \left[\frac{\partial}{\partial t} (u_1 - u_2) + \frac{\partial}{\partial t} (w_1 - w_2) \right] H_m(u_1 - u_2) dx \leq \int_{\Omega} (h_1 - h_2) H_m(u_1 - u_2) dx. \quad (42)$$

Теперь переходим к пределу при $m \rightarrow \infty$. Существует функция $\psi \in L^\infty(\Omega)$ такая, что $H_m(u_1 - u_2) \rightarrow \psi$ п. в. в Q . Кроме того $\psi \in H_m(u_1 - u_2)$ п. в. в Q , где

$$H(y) = \begin{cases} \{0\}, & \text{если } y < 0, \\ [0, 1], & \text{если } y = 0, \\ \{1\}, & \text{если } y > 0. \end{cases}$$

Тогда из (42) получаем, что

$$\int_{\Omega} \left[\frac{\partial}{\partial t} (u_1 - u_2) + \frac{\partial}{\partial t} (w_1 - w_2) \right] \psi dx \leq \int_{\Omega} (h_1 - h_2) \psi dx \leq \int_{\Omega} (h_1 - h_2)^+ dx. \quad (43)$$

Так как в силу неравенства Гильберта удовлетворяется неравенство

$$\frac{\partial}{\partial t} (w_1 - w_2) \psi \geq \frac{\partial}{\partial t} [(w_1 - w_2)^+] \quad \text{п. в. в } Q,$$

то из (43) имеем

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} [(u_1 - u_2)^+ + (w_1 - w_2)^+] dx \leq \int_{\Omega} (h_1 - h_2)^+ dx, \quad \text{п. в. в } Q,$$

откуда получается (40).

Теорема 2 доказана.

Теорема 3. Пусть

$$u^0 \in V, \xi^0 \in L^2(\Omega), h \in L^2(\Omega),$$

функции $\gamma_l(\sigma), \gamma_r(\sigma) \in C^0(R)$ липшицево непрерывны, аффинно ограничены и удовлетворяют условию (38), а F определяется как в (39). Тогда задача (1)-(3) с $f = h$ имеет единственное решение, которое удовлетворяет условию (13).

Доказательство. Эта теорема является прямым следствием теорем 1 и 2.

Заключение

Дифференциальные уравнения с запоминающим оператором, особенно уравнения с гистерезисом имеют большое значение среди нелинейных дифференциальных уравнений с частными производными, которые встречаются в физике, механике, биологии, химии, экономике и в других областях науки; гистерезисные явления часто встречаются также в теории трения, в ферромагнетизме, в теории сверхпроводимости. Особую трудность имеют уравнения с гистерезисом, если гистерезисный оператор находится под оператором дифференцирования по переменной t . В этой статье методом дискретизации по времени исследована разрешимость смешанной задачи для одного квазилинейного параболического уравнения с запоминающим оператором; доказана также единственность решений этой задачи, при дополнительном условии, что запоминающий оператор является гистерезисной нелинейностью типа обобщенного люффа.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Красносельский М.А. Системы с гистерезисом // М.А. Красносельский, А.В. Покровский. - М.: Наука, 1983.-272 с.
2. Mielke A. Rate-independent systems. Theory and application / A. Mielke, T. Roubicek // Applied Mathematical Sciences. - vol. 193. - Springer, New York. - 2015. - 660 p.
3. Visintin A. Quasilinear hyperbolic equations with hysteresis // Ann. Inst. H. Poincaré. Analyse nonlineaire. - 19. - 2002. - P. 451-476.

4. Visintin A. Mathematical models of hysteresis / In: The Science of Hysteresis (G. Bertotti, I. Mayergoyz, eds.) Elsevier. - 2006. - chap.1. - P. 1-123.
5. Лионс Ж.Л. Некоторые методы решения нелинейных краевых задач / Ж.Л. Лионс. - М.: Мир. - 1972. - 588 с.
6. Visintin A. Differential Models of Hysteresis / A. Visintin. - Springer, 1993. - 411 p.
7. Kopfova J. Uniqueness theorem for a Cauchy problem with hysteresis // Proceedings of the American Mathematical Society. - 1999. - vol. 127. - No 12. - PP. 3527-3532.
8. Kopfova J. Periodic solutions and asymptotic behavior of a PDE with hysteresis in the source term // Rocky Mountain Journal of Mathematics. - 2006. - vol. 36. - No 2. - P. 539-554.
9. Ларькин Н.А. Нелинейные уравнения переменного типа / Н.А. Ларькин, В.А. Новиков, Н.Н. Яненко - Наука, Новосибирск, 1983. - 269 с.
10. Лионс Ж.Л. Неоднородные граничные задачи и их приложения / Ж.Л. Лионс, Э. Мадженес. - М.: Мир, 1971.- 357 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Krasnoselskii M.A. Sistemy s gisterezisom [Systems with Hysteresis] // M.A. Krasnoselski, A.V. Pokrovsky. - М.: Nauka, 1983. [in Russian]
2. Mielke A. Rate-independent systems. Theory and application / A. Mielke, T. Roubicek // Applied Mathematical Sciences. - Vol. 193. - Springer, New York. - 2015. - 660 p.
3. Visintin A. Quasilinear hyperbolic equations with hysteresis // Ann. Inst. H. Poincare. Analyse nonlineaire. - 19. - 2002. - P. 451-476.
4. Visintin A. Mathematical models of hysteresis / In: The Science of Hysteresis (G. Bertotti, I. Mayergoyz, eds.) Elsevier.-2006. - Ch.1. - P. 1-123.
5. Lions J.L. Nekotorye metody resheniya nelineinykh kraevykh zadach [Some Methods for Solving Nonlinear Boundary Value Problems] / J.L. Lions - М.: Mir. - 1972. - 588 p. [in Russian]
6. Visintin A. Differential Models of Hysteresis / A. Visintin. - Springer, 1993. -411 p.
7. Kopfova J. Uniqueness theorem for a Cauchy problem with hysteresis // Proceedings of the American Mathematical Society. - 1999. - Vol. 127. - No 12. - P. 3527-3532.
8. Kopfova J. Periodic solutions and asymptotic behavior of a PDE with hysteresis in the source term // Rocky Mountain Journal of Mathematics. - 2006. - Vol. 36. - No 2. - P. 539-554.
9. Larkin N.A. Nelineinye uravneniya peremennogo tipa [Nonlinear Equations of Variable Type] / N.A. Larkin, V.A. Novikov, N.N. Yanenko. - Nauka, Novosibirsk, 1983. - 269 p. [in Russian]
10. Lions J.L. Neodnorodnye granichnye zadachi i ikh prilozheniya [Nonhomogeneous Boundary Value Problems and Their Applications] / J.L. Lions, E. Magenes. - М.: Mir, 1971. - 357 p. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.005>

ПОСТРОЕНИЕ РАЗМЕЧЕННЫХ МНОЖЕСТВ ПРИМЕНЕНИЕМ ГАРМОНИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

Научная статья

Мурзабаева А.Б.*

ORCID: 0000-0003-0694-6633,

Ошский технологический университет, Ош, Кыргызстан

* Корреспондирующий автор (aytbu.murzabaeva[at]mail.ru)

Аннотация

В данной статье на основе ранних работ построены размеченные области применением гармонических функций. Даны определения и обозначения размеченных областей, рассмотрены конкретные случаи размеченных областей. А также введено понятие ориентированных размеченных областей. Приведены примеры ориентированных, размеченных областей. В качестве примера применения размеченных областей рассматривается линейное сингулярно возмущенное обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка. Для исследования асимптотического поведения решения начальной задачи построена размеченная область. Доказано, существует часть размеченной области являющиеся областью притяжения решения вырожденного уравнения.

Ключевые слова: размеченная область, гармоническая функция, линии уровня, сеть кривых, точки ветвления, сингулярно возмущенное уравнение, асимптотика.

CONSTRUCTION OF LABELED MULTITUDES USING POTENTIAL FUNCTIONS

Research article

Murzabaeva A.B.*

ORCID: 0000-0003-0694-6633,

Osh Technological University, Osh, Kyrgyzstan

* Corresponding author (aytbu.murzabaeva[at]mail.ru)

Abstract

In this paper, based on earlier papers, we constructed a labeled area using potential functions. The definitions and designations of labeled areas are given, specific cases of labeled areas are considered. The paper also introduces the concept of oriented labeled areas. Examples of oriented labeled areas are given. We consider a linear singularly perturbed ordinary differential equation of the first order as an example of the application of labeled area. A labeled area is constructed to study the asymptotic behavior of the solution of the initial problem. It is proved that there is a part of the labeled area that is the area of the attraction of the solution of the degenerate equation.

Keywords: labeled area, potential function, level lines, network of curves, branching points, singularly perturbed equation, asymptotics.

Пусть $\Omega \subset R^2$ и Ω односвязная область.

Определение 1. Если Ω полностью покрывается некоторым множеством кривых $\{L(A)\}$, где A произвольная точка принадлежащая области Ω , то область Ω назовём размеченным, множеством кривых $\{L(A)\}$ и обозначим $\Omega(\{L(A)\})$.

Ниже будем рассматривать конкретные случаи множества $\{L(A)\}$.

Примеры

$$1. L(A) = \{A(x, y) \in R^2 | y = x^2 + a, a \in R\}.$$

$$2. L(A) = \{A(x, y) \in R^2 | x^2 + y^2 = r^2, r \in R\}$$

$$3. L(A) = \{A(x, y) \in R^2 | x^2 - y^2 = q, q \in R\}$$

$$4. \Omega = \{(x, y) \in R^2 | 0 \leq x \leq 1, -\infty \leq y \leq \infty\}.$$

$$L(A) = \{A(x, y) \in R^2 | 0 \leq x \leq 1, y = b - const \in R\},$$

$$L(A) = \{A(x, y) \in R^2 | 0 \leq x \leq 1, y = x + b, b \in R\}.$$

В [1] для исследования асимптотического поведения решений сингулярно возмущённых обыкновенных дифференциальных уравнений аналитическими функциями при нарушении условия устойчивости, точки покоя присоединенной системы введено понятие размеченное множество в множество \mathbb{C} комплексных чисел.

Определение 2. Если кривые $L(A)$ из множества имеют определенную ориентацию (направление), то размеченное множество Ω назовём ориентированным и будем обозначать $\Omega(\{\vec{L}(A)\})$. Ориентация кривых зависит от некоторых параметров, значения которых определяют положение точки A .

Области определенные в предыдущем примере являются ориентированными. Параметром ориентации служит независимая переменная x .

Займемся построением размеченных множеств, применением гармонических функций.

При построении размеченных областей используем частично результаты работ [1], [2], [3], [4], [5].

Пусть $u(x, y) \in \Gamma(\Omega)$ – пространство гармонических функций в области Ω .

Определение 3. Множество $(L) = \{(x, y) \in \Omega | u(x, y) = L - const\}$ назовём линией уровня функции $u(x, y)$ в области Ω .

Предположим выполнения следующего условия

$$У.1. \forall (x, y) \in \Omega \left(\frac{\partial u}{\partial x} \neq 0 \text{ или } \frac{\partial u}{\partial y} \neq 0 \right)$$

Согласно условия U.1 линии уровня (L) не имеют кратных точек в области Ω , то есть через каждую точку области Ω проходит единственная линия уровня.

Таким образом область Ω является размеченной линиями уровней (L) функции $u(x, y)$ и область Ω является размеченным.

Пример. $u(x, y) = \ln(x^2 + y^2)$, $(x, y) \in \Omega = \mathbb{R}^2 \setminus (0; 0)$.

Линиями уровня функции $u(x, y)$ являются концентрические окружности с центром в точке $(0; 0)$.

Пусть $F(z) \in Q(\Omega)$ – пространство аналитических функций в области Ω .

Полагая $z = x + iy$, где $i = \sqrt{-1}$, x, y – действительные переменные, введем обозначения $\operatorname{Re} F(z) = F_1(x, y)$, $\operatorname{Im} F(z) = F_2(x, y)$

Функции $F_k(x, y)$ являются сопряжено гармоническими в области Ω .

Предположим выполнения условия

$$U.2. \quad \forall t \in \Omega (F'(z) \neq 0).$$

Тогда функция $F(z)$ в области Ω не имеет кратных точек, следовательно линии уровня функций $F_k(x, y)$ также не имеют точек ветвления.

Линии уровней $F_k(x, y)$ ($k = 1, 2$) являются взаимно ортогональными в точках пересечения. Таким образом область Ω полностью покрывается сетью взаимно ортогональных линии уровней функций $F_k(x, y)$ ($k = 1, 2$). В рассматриваемом случае область Ω размечена двумя видами множества кривых.

При нарушении условия U.2, в общем случае, представить размеченную область Ω , практически является трудной задачей и каждый из этих случаев, надо будет рассматривать отдельно. Такие случаи рассмотрены в [1, 3].

Теперь рассмотрим случай, когда заданы несколько аналитических функций в области Ω . Частично используем результаты работ [6-10].

U.3. Пусть $F_j(z) \in Q(\Omega)$, $j = 1, 2$ и $\forall z \in \Omega (F'_j(z) \neq 0)$.

Введём обозначения

$$\operatorname{Re} F_j(z) = F_{1j}(x, y), \quad \operatorname{Im} F_j(z) = F_{2j}(x, y).$$

Согласно рассмотренному случаю линии уровня, определяемые парами

$(F_{1j}(x, y), F_{2j}(x, y))$ ($j = 1, 2$) полностью покрывают область Ω сетью взаимно ортогональных линии уровней и область Ω будет размеченным порознь парами $(F_{1j}(x, y), F_{2j}(x, y))$.

Размеченность области Ω парой (F_{11}, F_{21}) обозначим Ω^1 , а парой (F_{12}, F_{22}) обозначим Ω^2 . Какова взаимосвязь размеченных областей Ω^1 и Ω^2 ? Используя только условие U.3 решение поставленной задачи, практически является невозможным.

Пусть $z_0 \in \Omega$ и является её внутренней точкой и U.4. $F_j(z_0) = 0$, ($j = 1, 2$)

Возьмём $F_{1j}(x, y)$. Согласно U.4 имеем $F_{11}(x_0, y_0) = 0$, следовательно, существует линия уровня $(L_{10}) = \{(x, y) \in \Omega \mid F_{11}(x, y) = 0\}$, которая проходит через точку z_0 и область Ω делит на две части, которые обозначим Ω_{11} и Ω_{12} .

По линиям уровней функции $F_{12}(x, y)$ функция $F_{11}(x, y)$ строго монотонна. Пусть $z^1 = x^1 + iy^1$ произвольная точка, принадлежащая (L_{10}) . Существует линия уровня $(L_{21}) = \{(x, y) \in \Omega \mid F_{12}(x, y) = L_{21} = F_{12}(x^1, y^1)\}$.

Рассмотрим $F_{11}(x, y)$ вдоль (L_{21}) . Так как $F_{11}(x^1, y^1) = 0$ то в каждом из областей Ω_{11} и Ω_{12} функция $F_{11}(x, y)$ принимает значения разных знаков.

Для определённости возьмём $\forall (x, y) \in \Omega_{11} (F_{11}(x, y) \leq 0)$.

Тогда $\forall (x, y) \in \Omega_{12} (F_{11}(x, y) \geq 0)$, причём равенство имеет место только для точек принадлежащих линии (L_{10}) .

Области Ω_{11} и Ω_{12} являются размеченными и в совокупности определяют размеченную область Ω^1 . Аналогично рассматривая функции $F_{2j}(x, y)$ определяем области Ω_{21} , Ω_{22} , где функция $F_{21}(x, y)$ принимает значения разных знаков. Области Ω_{21} , Ω_{22} имеют общую границу $(L_{20}) = \{(x, y) \in \Omega \mid F_{21}(x, y) = 0\}$, являются размеченными и в совокупности определяют размеченную область Ω .

Для определённости считаем

$$\forall (x, y) \in \Omega_{21} (F_{21}(x, y) \leq 0), \quad \forall (x, y) \in \Omega_{22} (F_{21}(x, y) \geq 0).$$

U.5. Пусть линии уровня (L_{10}) и (L_{20}) пересекаются только в точке z_0 .

При выполнении условия U.5 существуют области, где функции $F_{1j}(x, y)$ принимают значения одинаковых или разных знаков, причём все области являются размеченными по линиям уровней функций $F_{kj}(x, y)$ ($k, j = 1, 2$).

Применение размеченных множеств для определения областей притяжения.

Размеченные множества применяются при исследовании асимптотического поведения решений сингулярно возмущённых уравнений и для определения областей притяжения решений вырожденных уравнений.

Более подробно применением размеченных множеств для различных классов сингулярно возмущённых уравнений можно ознакомиться в [1-10]. Для простоты рассмотрим линейное сингулярно возмущённое уравнение следующего вида

$$\varepsilon z'(t, \varepsilon) = a(t)z(t, \varepsilon) + \varepsilon b(t) \quad (1)$$

с начальным условием

$$z(t_0, \varepsilon) = z^0 - \text{const}, \quad (2)$$

где $0 < \varepsilon$ – малый параметр; $t \in \Omega \subset \mathbb{C}$ Ω – односвязная область;

$t_0 \in \Omega$ и является её внутренней точкой.

Пусть выполняются условия

$$U.1. \quad a(t), b(t) \in Q(\Omega). \quad U.2. \quad \forall t \in \Omega (a(t) \neq 0).$$

Задача. Исследовать асимптотическое поведение решения задачи (1)-(2).

Для решения поставленной задачи решение задачи (1)-(2) представим в виде

$$z(t, \varepsilon) = z^0 \exp \frac{F(t)}{\varepsilon} + \int_{t_0}^t b(\tau) \exp \frac{F(t) - F(\tau)}{\varepsilon} d\tau, \quad (3)$$

где $F(t) = \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau$.

Выполняются все условия раздела II. Область Ω полностью покрывается сетью взаимно ортогональных линий уровней функций $ReF(t)$ и $ImF(t)$ и является размеченным.

Функцию (3) будем рассматривать в размеченной области Ω .

По определению $F(t_0) = 0$. Тогда существует линия уровня

$(L_{10}) = \{t \in \Omega | ReF(t) = 0\}$ проходящая через точку t_0 и делящая область Ω на части Ω_1 и Ω_2 , причем в каждом из частей функция $ReF(t)$ принимает значения разных знаков. Для определенности возьмём

$$\forall t \in \Omega_1 (ReF(t) \leq 0), \forall t \in \Omega_2 (ImF(t) \geq 0).$$

Области Ω_1 и Ω_2 также являются размеченными. Для исследования асимптотического поведения функции (3) при $\varepsilon \rightarrow 0$ для (3) выберем пути интегрирования.

Пусть состоит из части (L_{10}) соединяющего точки t_0 и $\tilde{t} \in (L_{10})$ и части линии уровня

$$(\tilde{L}_2) = \{t \in \Omega | ImF(t) = \tilde{L}_2 - const\}$$

с соединяющего точки \tilde{t} и $t \in (\Omega_1 \text{ или } \Omega_2)$.

Линии уровня функций $ReF(t)$ и $ImF(t)$ являются аналитическими кривыми и их уравнения можно параметризовать по их длине.

Длину линии (L_{10}) от точки t_0 и \tilde{t} обозначим s , а длину линии (\tilde{L}_2) от точки \tilde{t} до t обозначим σ .

Учитывая выбранные пути интегрирования и параметры, функцию (3) перепишем в следующем виде

$$z(t(\sigma), \varepsilon) = z^0 \exp \frac{F(t(\sigma))}{\varepsilon} + \int_0^s \exp \frac{F(t(\sigma)) - F(\tau(\tilde{s}))}{\varepsilon} \times \\ \times b(\tau(\tilde{s})) d\tau(\tilde{s}) + \int_0^\sigma \exp \frac{F(t(\sigma)) - F(\tau(\tilde{\sigma}))}{\varepsilon} b(\tau(\tilde{\sigma})) d\tau(\tilde{\sigma}) \quad (4)$$

Рассмотрим следующие случаи:

1. $t \in (L_{10})$. Для этого случая $\sigma = 0$, $t(0) = \tilde{t}(s)$ и (4) имеет вид

$$z(\tilde{t}(s), \varepsilon) = z^0 \exp \frac{F(\tilde{t}(s))}{\varepsilon} + \int_0^s \exp \frac{F(\tilde{t}(s)) - F(\tau(\tilde{s}))}{\varepsilon} \times \\ \times b(\tau(\tilde{s})) d\tau(\tilde{s}). \quad (5)$$

К интегралу, в (5), применяя метод стационарной фазы, получим, что он имеет порядок ε . В рассматриваемом случае

$$ReF(\tau(\tilde{s})) \equiv 0, \text{ а } (ImF(\tau(\tilde{s})))'_s \neq 0.$$

Таким образом $\forall t \in (L_{10})$ функция (5) не имеет предела при $\varepsilon \rightarrow 0$, но ограничена по модулю т.е.

$$|z(\tilde{t}(s), \varepsilon)| \leq |z^0| + \varepsilon M_0,$$

где $0 < M_0$ – постоянная не зависящая от ε .

2. Пусть $t \in \Omega_1$. В этом случае для значений $\sigma \gg 0$ функция $ReF(t(\sigma)) \ll 0$. Следовательно, в (4) первое и второе слагаемое бесконечно мала по сравнению с ε , а третье слагаемое имеет порядок ε (надо учесть, что $F(t(\sigma))$ убывает). Таким образом для $t(\sigma) \in \Omega_1$ ($\sigma \gg 0$) $(z(t(\sigma), \varepsilon) \rightarrow 0$.

3. Пусть $t \in \Omega_2$ ($\sigma \gg 0$).

Для асимптотической оценки $|z(t(\sigma), \varepsilon)|$ воспользуемся неравенством

$$|z_1 - z_2| \geq ||z_1| - |z_2||.$$

Из (4) получим

$$|z(t(\sigma), \varepsilon)| \geq \exp \frac{F(t(\sigma))}{\varepsilon} \left| |z^0| - \left| \int_0^s \exp \frac{-F(\tau(\tilde{s}))}{\varepsilon} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times b(\tau(\tilde{s})) d\tau(\tilde{s}) + \int_0^\sigma \exp \frac{F(\tau(\tilde{\sigma}))}{\varepsilon} b(\tau(\tilde{\sigma})) d\tau(\tilde{\sigma}) \right| \right| \quad (6)$$

К первому интегралу в (6) применим метод стационарной фазы, тогда

$$\left| \int_0^s \exp \frac{-F(\tau(\tilde{s}))}{\varepsilon} b(\tau(\tilde{s})) d\tau(\tilde{s}) \right| \leq M_1 \varepsilon,$$

где $0 < M_1$ – постоянная не зависящая от ε ; для второго интеграла применяя метод интегрирование по частям получим оценку.

$$\left| \int_0^\sigma \exp \frac{F(\tau(\tilde{\sigma}))}{\varepsilon} b(\tau(\tilde{\sigma})) d\tau(\tilde{\sigma}) \right| \leq M_2 \varepsilon,$$

где $0 < M_2$ – постоянная не зависящая от ε

Учитывая полученные оценки, для $|z(t(\sigma), \varepsilon)|$ имеем

$$|z(t(\sigma), \varepsilon)| \geq \exp \frac{ReF(t(\sigma))}{\varepsilon} ||z^0| - \varepsilon(M_1 + M_2)|.$$

Отсюда следует, для

$$t \in \Omega_2 (\sigma \gg 0) (|z(t(\sigma), \varepsilon)| \rightarrow +\infty).$$

Таким образом часть области Ω_1 является областью притяжения вырожденного уравнения [1], [2].

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы\ References

1. Алыбаев К.С. Метод линий уровня исследования сингулярно возмущенных уравнений при нарушении условия устойчивости / К.С. Алыбаев // Вестник КГНУ. – Серия 3, Выпуск 6. – Бишкек, 2001г. – С. 190-200.
2. Панков П.С. Явление погранслоевых линий и асимптотика решений сингулярно возмущенных линейных обыкновенных дифференциальных уравнений с аналитическими функциями / Панков П.С., Алыбаев К.С., Тампагаров К.Б. и др. // Вестник ОшГУ, 2013-№1 (специальный выпуск). – С. 227-231.
3. Тампагаров К.Б. Погранслойные линии для сингулярно и регулярно возмущенных дифференциальных уравнений первого порядка с аналитическими функциями / К.Б. Тампагаров // Естественные и математические науки в современном мире: сб. статей по материалам XLVII международной научно-практической конференции. №10 (45). Россия, Новосибирск: СибАК, 2016. –С. 67-73.
4. Алыбаев К.С. Явление простирающегося симметричного пограничного слоя для сингулярно возмущенных уравнений при потере устойчивости / Алыбаев К.С., Нарбаев М.Р. // Вестник ЖАГУ. Жалал-Абад, 2008. №1. – с.122-126.
5. Алыбаев К.С. // Исслед. по интегро-дифферен. Уравнениям / Алыбаев К.С., Нарбаев М.Р. // Выпуск 35. Бишкек. 2006. С. 105 – 109
6. Алыбаев К.С. Сингулярно возмущенные уравнения с аналитическими функциями теряющие единственность при вырождении / К.С. Алыбаев, А.Б.Мурзабаева // Итоги науки в теории и практике 2017: сб. статей по материалам XXXIV международной научной конференции. № 12 (34) Россия, Москва: ЕНО, 2017. – С.15-20.
7. Мурзабаева А.Б. Системы сингулярно возмущенных обыкновенных дифференциальных уравнений с аналитическими функциями теряющие единственность при вырождении / А.Б. Мурзабаева // Теоретические и практические вопросы современной науки: сб. статей по материалам XLI международной научной конференции. № 7 (41) Россия, Москва: ЕНО, 2018. –С.12- 18.
8. Alybayev K.S. Singularly perturbed first-order equations in complex domains that lose their uniqueness under degeneracy / K.S. Alybaev, A.B. Murzabaeva // International conference on analysis and applied mathematics (icaam 2018) AIP Conference Proceedings Volume number: 1997, 020076, Aug 6 (2018); doi.org/10.1063/1.5049070.
9. Мурзабаева А.Б. Нарушение единственности решений вырожденного уравнения для сингулярно возмущенных уравнений с аналитическими функциями / А.Б. Мурзабаева // Информационные технологии и математическое моделирование в науке, технике и образовании. № 3 (39) часть 1 Кыргызстан, Бишкек: “Техник”2016.-С.162-169.
10. Мурзабаева А.Б. Сингулярно возмущенные уравнения при нарушении единственности решений вырожденного уравнения и условия устойчивости // Естественные и математические науки в современном мире: сб.ст.по матер. XLIX междунар.науч.-практ. конф.№12(47).- Новосибирск : Сибак, 2016.-С.77-85.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Alybaev K.S. Metod linii urovnya issledovaniya singuliarno vozmushchennykh uravnenii pri narushenii usloviya ustoichivosti [Method of Level Lines for Study of Singularly Perturbed Equations in Violation of Stability Condition] / K.S. Alybaev // Bulletin of KSNU. – Series 3, Issue 6. – Bishkek, 2001. – P. 190-200. [in Russian]
2. Pankov P.S. Yavlenie pogransloinykh linii i asimptotika reshenii singuliarno vozmushchennykh lineinykh obyknovennykh differentsialnykh uravnenii s analiticheskimi funktsiyami [Phenomenon of Boundary Layer Lines and Asymptotics of Solutions of Singularly Perturbed Linear Ordinary Differential Equations with Analytic Functions] / Pankov P.S., Alybaev K.S., Tampagarov K.B. and others // Bulletin of Osh State University, 2013-No.1 (special issue). – P. 227-231. [in Russian]
3. Tampagarov K.B. Pogransloinye linii dlia singuliarno i reguliarno vozmushchennykh differentsialnykh uravnenii pervogo poriadka s analiticheskimi funktsiyami [Boundary Lines for Singularly and Regularly Perturbed First-Order Differential Equations with Analytic Functions] / K.B. Tampagarov // Yestestvennyye i matematicheskiye nauki v sovremennom mire: kolledzh. statey o materialakh XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. [Natural and Mathematical Sciences in Modern World: Coll. of Articles on the Materials of the XLVII International Research-to-Practice Conference]. No.10 (45). Russia, Novosibirsk: SiBAK, 2016. – P. 67-73. [in Russian]
4. Alybaev K.S. Yavlenie prostirayushchegosia simmetrichnogo pogrannichnogo sloya dlia singuliarno vozmushchennykh uravnenii pri potere ustoichivosti [Phenomenon of Extending Symmetric Boundary Layer for Singularly Perturbed Equations with Loss of Stability] / Alybaev K.S., Narbaev M.R. // Herald of JASU. Jalal-Abad, 2008. No.1. - p.122-126. [in Russian]
5. Alybaev K.S. // Issled. po integro-differen. uravneniyam. [Study of Integro-different. Equations] / Alybaev K.S., Narbaev M.R. // Issue 35. Bishkek. 2006. P. 105 – 109 [in Russian]
6. Alybaev K.S. Singuljarno vozmushchennyye uravneniya s analiticheskimi funktsiyami teriayushchie edinstvennost pri vyrozhdanii [Singularly Perturbed Equations with Analytic Functions that Lose Uniqueness under Degeneracy] / K.S. Alybaev, A.B. Murzabaeva // Rezul'taty nauki v teorii i praktike 2017: Kolledzh. statey o materialakh XXXIV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. № 12 (34) [Results of Science in Theory and Practice 2017: Colle. of Articles on the Materials of the XXXIV International Scientific Conference. No. 12 (34) Russia, Moscow: ENO, 2017. - P.15-20. [in Russian]
7. Murzabaeva A.B. Sistemy singuliarno vozmushchennykh obyknovennykh differentsialnykh uravnenii s analiticheskimi funktsiyami teriayushchie edinstvennost pri vyrozhdanii [Systems of Singularly Perturbed Ordinary Differential Equations with Analytic Functions that Lose Uniqueness under Degeneracy] / A.B. Murzabaeva // Teoreticheskiye i prakticheskiye voprosy sovremennoy nauki: sb. statey po materialam Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii XLI [Theoretical and Practical Questions of Modern Science: Coll. of Articles on the Materials of the XLI International Scientific Conference. No. 7 (41)] Russia, Moscow: ENO, 2018. – P.12- 18. [in Russian]
8. Alybayev K.S. Singularly perturbed first-order equations in complex domains that lose their uniqueness under degeneracy / K.S. Alybaev, A.B. Murzabaeva // Mezhdunarodnaya konferentsiya po analizu i prikladnoy matematike (icaam 2018) AIP Conference Proceedings Volume number: 1997, 020076 [International conference on analysis and applied mathematics (icaam 2018) AIP Conference Proceedings Volume number: 1997], 020076, Aug 6 (2018); doi.org/10.1063/1.5049070. [in Russian]

9. Murzabaeva A.B. Narushenie edinstvennosti reshenii vyrozhdenogo uravneniya dlia singularno vozmushchennykh uravnenii s analiticheskimi funktsiyami [Violation of Uniqueness of Solutions of Degenerate Equation for Singularly Perturbed Equations with Analytic Functions] / A.B. Murzabaeva // Informatsionnyye tekhnologii i matematicheskoye modelirovaniye v nauke, tekhnike i obrazovanii [Information Technologies and Mathematical Modeling in Science, Engineering and Education]. No. 3 (39) part 1 Kyrgyzstan, Bishkek: "Tekhnika" 2016. – P.162-169. [in Russian]

10. Murzabaeva A.B. Singularno vozmushchennyye uravneniya pri narushenii edinstvennosti reshenii vyrozhdenogo uravneniya i usloviya ustoychivosti [Singularly Perturbed Equations in Violation of Uniqueness of Solutions of Degenerate Equation and Stability Condition] // Yestestvennyye i matematicheskiye nauki v sovremennom mire: sbornik statey. XLIX Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya [Natural and Mathematical Sciences in Modern World: Collected Articles. XLIX International Research-to-Practice Conf. No. 12 (47)]. – Novosibirsk: Sibak, 2016. – P.77-85. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.006>

МИНИМАЛЬНЫЕ И МАКСИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ УПРУГИХ МОДУЛЕЙ И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА МОНОКРИСТАЛЛОВ TiFe И TiNi С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Научная статья

Муслов С.А.*

Московский Государственный Медико-Стоматологический Университет им. А.И. Евдокимова Минздрава РФ, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (muslov[at]mail.ru)

Аннотация

Среди макроскопических характеристик твердых тел упругие свойства играют важнейшую роль в анализе потери устойчивости кристаллической решетки материалов к фазовым переходам. При переходах сдвигового типа, каковыми являются мартенситные превращения в металлах и сплавах, особое значение имеет исследование анизотропии параметров кристаллических структур: упругих модулей и постоянных, коэффициента Пуассона и других. В работе построены поверхности модулей Юнга и сдвига кристаллов, а также коэффициента Пуассона и их центральные сечения. Рассчитаны экстремальные значения модулей и коэффициента Пуассона кристаллов. Трансформация поверхностей и их центральных сечений дана в контексте потери стабильности сплавов к мартенситным превращениям.

Ключевые слова: модули упругости, коэффициент Пуассона, анизотропия, сплавы с памятью формы.

EXTREME VALUES OF ELASTIC MODULI AND POISSON'S RATIO OF TiFe AND TiNi WITH SHAPE MEMORY

Research article

Muslov S.A.*

Evdokimov Moscow State Medical Stomatological University, Moscow, Russia

* Corresponding author (muslov[at]mail.ru)

Abstract

Among the macroscopic characteristics of solids, elastic properties play a crucial role in the analysis of the loss of stability of the crystal lattice of materials to phase transitions. For shear-type transitions, such as martensitic transformations in metals and alloys, the study of the anisotropy of the parameters of crystal structures: elastic moduli and constants, Poisson's ratio, and others is of particular importance. In this paper, the surfaces of Young's and shear moduli of crystals, as well as the Poisson's ratio and their central sections are constructed. Extreme values of the moduli and the Poisson's ratio of the crystals are calculated. Transformation of surfaces and their central sections is given in the context of loss of stability of alloys to martensitic transformations.

Keywords: moduli of elasticity, Poisson's ratio, anisotropy, alloys with shape memory.

В В2-соединении TiFe изоморфной высокотемпературной модификации никелида титана не происходит мартенситных превращений при охлаждении, по крайней мере, до 4,2 К [1]. В сплавах же на основе TiNi хорошо изучено, что высокотемпературная ОЦК В2-фаза, упорядоченная по типу CsCl, может подвергаться при понижении температуры мартенситным превращениям по двум каналам: В2→В19' и В2→R→В19', в зависимости от состава и термомеханической обработки, здесь В19' и R – моноклинная и ромбоэдрическая фазы, соответственно [2]. Сверхэластичные сплавы с эффектом памяти формы нашли широкое применение в технике и медицине, например в качестве соединений в работе конструкций, имплантируемых в организм длительно функционирующих материалов, ортодонтических дуг, сосудистых стентов и сфера применения этих материалов постоянно продолжает расширяться [3]. Они способны обратимо изменять свою форму при изменении температуры, проявляют высокие эластичные свойства, не разрушаются в условиях знакопеременной нагрузки, поэтому представляет интерес отдельное сравнительное исследование наиболее информативных характеристик данных интерметаллидов – упругих свойств монокристаллов.

Данные свойства действительно являются наиболее важными физико-механическими свойствами в контексте устойчивости кристаллической решетки сплавов и их предрасположенности к различным структурным и мартенситным превращениям. Монокристаллы системы TiNi-TiFe были получены методом Бриджмена в графитовых тиглях в атмосфере азота. Упругие постоянные второго порядка кристаллов были измерены резонансным методом [4], [5], [6].

Упругие постоянные c_{ij} и коэффициенты податливости s_{ij} кристаллической решетки сплавов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Упругие постоянные (ГПа) и коэффициенты податливости (ГПа⁻¹) монокристаллов

Сплав	c_{11}	c_{12}	c_{44}	C'	s_{11}	s_{12}	s_{44}
Ti ₄₉ Ni ₅₁	164.5	133.5	33	15.5	0.022278	-0.00998	0.030303
Ti ₅₀ Fe ₅₀	309	104	69	102.5	0.003897	-0.00098	0.014493

В линейном приближении упругие свойства кубических кристаллов полностью описываются матрицей, которая содержит три независимые упругие постоянные c_{11} , c_{12} и c_{44} . Из них только постоянная c_{44} имеет прямой физический смысл как мера сопротивления кристалла сдвигу в плоскости куба {100} вдоль любого направления $\langle 0kl \rangle$, лежащего в этой плоскости. Коэффициенты матрицы c_{11} и c_{12} такого простого объяснения не имеют. Однако их линейные комбинации $B = (c_{11} + 2c_{12})/3$ и $C' = (c_{11} - c_{12})/2$ являются, в первом случае, мерой сопротивления кристаллов гидростатическому сжатию (модуль объемной упругости) и, во втором случае, мерой сопротивления кристалла сдвигу в плоскости {110} в направлении $\langle 1\bar{1}0 \rangle$. При этом, c_{44} и C' – экстремальные – всегда наибольший и наименьший (или наоборот) – модули сдвига в кубическом кристалле.

Знание упругих постоянных решетки позволяет вычислить другие параметры упругости. Среди них часто используются такие как: коэффициент анизотропии $A = 2 \frac{s_{11} - s_{12}}{s_{44}} = \frac{c_{11} - c_{12}}{2c_{44}} = \frac{C'}{c_{44}}$, параметр анизотропии

$\Delta = s_{11} - s_{12} - 0,5s_{44}$, фактор анизотропии $A' = \Delta/s_{11}$ и экстремальные значения модуля Юнга E и сдвига G .

Экстремальные значения упругих модулей могут быть рассчитаны по формулам

$$E_{100} = \frac{1}{s_{11}}, E_{110} = \frac{1}{s_{11} - \Delta/2}, E_{111} = \frac{1}{s_{11} - 2\Delta/3}, \quad (1)$$

$$G_{\{110\}\langle 1\bar{1}0 \rangle} = (2(s_{11} - s_{12}))^{-1}, G_{\{100\}\langle 0kl \rangle} = s_{44}^{-1} \quad (2)$$

Как видно, какая экстремальная величина модуля Юнга является максимальной или минимальной зависит от знака и величины параметра анизотропии Δ . Экстремальные значения модулей упругости TiNi и TiFe представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Экстремальные значения модулей упругости и их отношения

Сплав	E_{100} , ГПа	E_{110} , ГПа	E_{111} , ГПа	E_{\max}/E_{\min}	$G_{\{110\}\langle 1\bar{1}0 \rangle} = (2(s_{11} - s_{12}))^{-1}$, ГПа	$G_{\{100\}\langle 0kl \rangle} = s_{44}^{-1}$, ГПа	G_{\max}/G_{\min}
Ti ₄₉ Ni ₅₁	44.9	72.9	92.1	2.05	15.5	33.0	2.13
Ti ₅₀ Fe ₅₀	256	197	183	1.40	69.0	102.5	1.49

Аналогичные выводы можно сделать на основе анализа характеристик анизотропии сплавов (табл. 3).

Таблица 3 – Характеристики анизотропии сплавов

Сплав	$A = 2 \frac{s_{11} - s_{12}}{s_{44}}$	$A' = \Delta/s_{11}$	$\Delta = s_{11} - s_{12} - 0,5s_{44}$, МПа ⁻¹
Ti ₄₉ Ni ₅₁	2.13	0.77	17.1
Ti ₅₀ Fe ₅₀	0.67	-0.60	-2.35

В качестве характеристик анизотропии можно рассматривать и значения E_{\max}/E_{\min} и G_{\max}/G_{\min} из табл. 2.

Коэффициент Пуассона (μ) является также весьма информативной характеристикой при анализе упругого поведения твердых тел. Он называется коэффициентом поперечной деформации и изначально определяется как отношение поперечной деформации к продольной, взятое с обратным знаком: $-\varepsilon_{\perp} / \varepsilon_{\parallel}$.

Мы рассчитали значения коэффициента Пуассона вдоль главных направлений растяжения-сжатия и поперечной деформации. Они же являются экстремальными значениями μ (табл. 4).

Таблица 4 – Изменчивость коэффициента Пуассона

Сплав	μ_{\min}	μ_{\max}	$\mu_{100} = \mu_0$	$\mu_{110, 001}$	$\mu_{110, 1\bar{1}0}$	μ_{111}	$\langle \mu \rangle$
Ti ₄₉ Ni ₅₁	0.10	0.73	0.45	0.73	0.10	0.40	0.42
Ti ₅₀ Fe ₅₀	0.20	0.43	0.26	0.20	0.43	0.33	0.30

В нашем исследовании значения коэффициента Пуассона вдоль симметричных направлений определялись упругими константами кристалла по формулам

$$\mu_{100} = -\frac{s_{12}}{s_{11}}, \mu_{110,001} = -\frac{s_{12}}{s_{11} - 0,5\Delta}, \mu_{110,1\bar{1}0} = -\frac{s_{12} + 0,5\Delta}{s_{11} - 0,5\Delta}, \mu_{111} = -\frac{3s_{12} - \Delta}{3s_{11} - 2\Delta}. \quad (3)$$

При этом экстремальные значения коэффициента Пуассона TiNi были рассчитаны по формулам [7] для кубических кристаллов:

$$\mu_{\max} = \mu([110], [001]) = \frac{4c_{12}c_{44}}{2c_{11}c_{44} + (c_{11} - c_{12})(c_{11} + 2c_{12})}, \quad (4)$$

$$\mu_{\min} = \mu([110], [\bar{1}\bar{1}0]) = -\frac{2c_{11}c_{44} - (c_{11} - c_{12})(c_{11} + 2c_{12})}{2c_{11}c_{44} + (c_{11} - c_{12})(c_{11} + 2c_{12})}.$$

Для TiFe правые части (4) нужно было поменять местами в силу обратной анизотропии. Усредненный по поперечным направлениям коэффициент Пуассона $\langle \mu \rangle$ в табл. 4 вычисляли как [7]

$$\langle \mu \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi d\varphi \int_0^\pi \sin \theta \mu(\varphi, \theta) d\theta, \quad (5)$$

где $\mu(\varphi, \theta)$ – коэффициент Пуассона как функция 2-х углов.

Как видно, коэффициент Пуассона никелида титана рассчитанный по данным, полученных на монокристаллах, выше, чем табличные значения для поликристаллического TiNi (0,32-0,33), которые можно встретить в литературе, например в [8]. Возможно это связано с весьма большими различиями в значениях μ_{\min} и μ_{\max} и в связи с этим большой погрешностью усреднения. Однако и согласно данным <http://progs.coudert.name/elate/mp?query=mp-571> усредненный коэффициент Пуассона кристаллов TiNi выше упомянутых 0,32-0,33.

Что касается TiFe экстремальные значения μ из табл. 4 весьма близки к литературным данным, например размещенным на <http://progs.coudert.name/elate/mp?query=mp-305>: 0,13 (μ_{\min}) и 0,49 (μ_{\max}), соответственно. Среднее значение коэффициента Пуассона TiFe также очень близко к данным, полученным с помощью известных методов усреднения: $\mu(\text{Voight})=0,28$; $\mu(\text{Reuss})=0,30$; $\mu(\text{Hill})=0,29$ (там же).

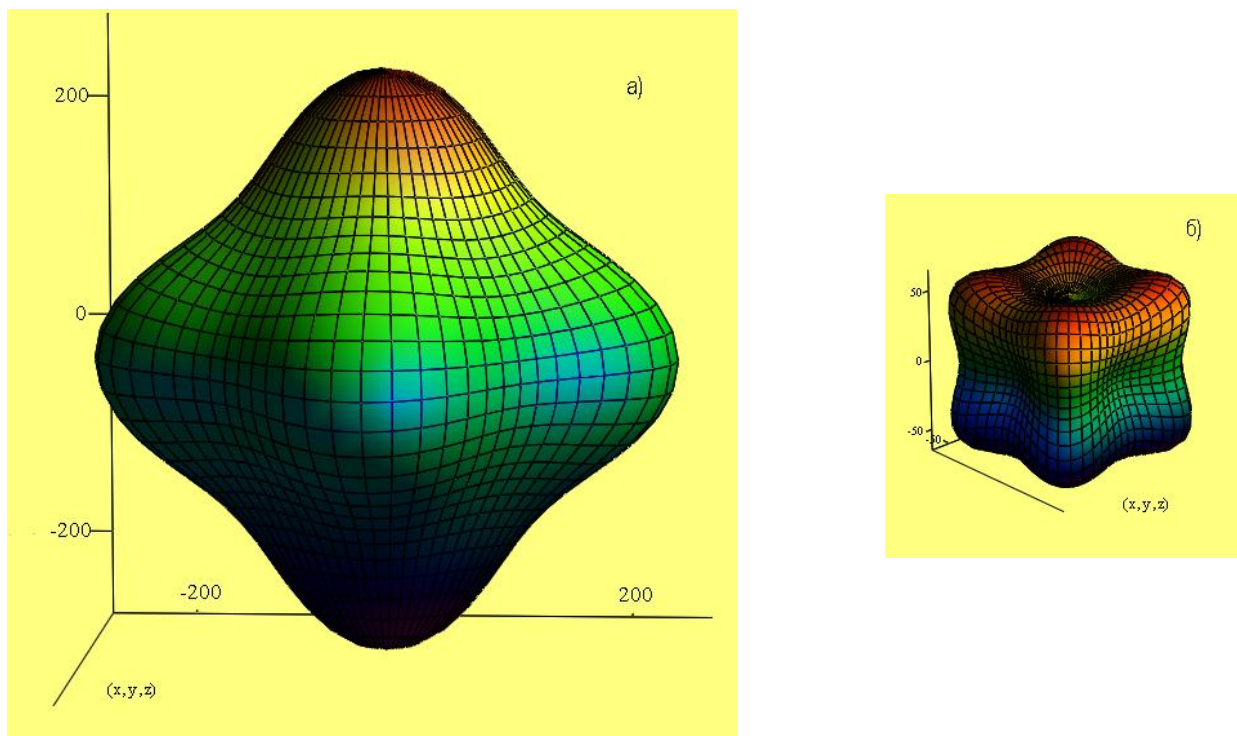


Рис. 1 – Поверхности модуля Юнга E TiFe (а) и TiNi (б) (построенные с помощью системы компьютерной алгебры Mathcad)

Обращает на себя внимание максимальное значение коэффициента Пуассона TiNi $\mu_{110,001}=0,73$. Как видно оно больше 0,5 и выходит за пределы 0-0,5 для “обычных” материалов. Однако это не противоречит данным, например [9], согласно которым для ряда кристаллов абсолютные экстремумы коэффициента Пуассона могут превышать стандартные значения, равные -1 для стандартного минимума, и $+2$ для стандартного максимума.

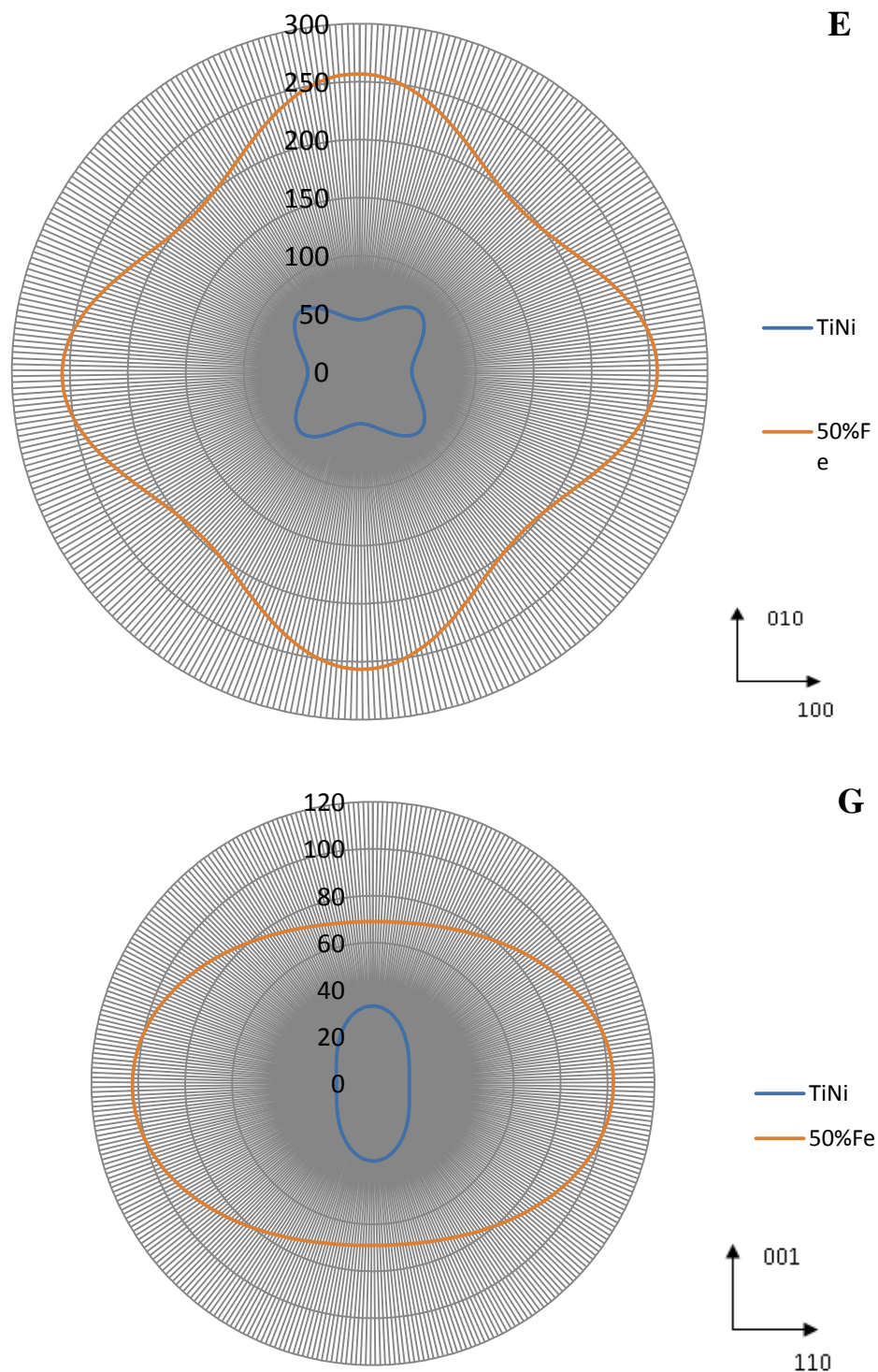
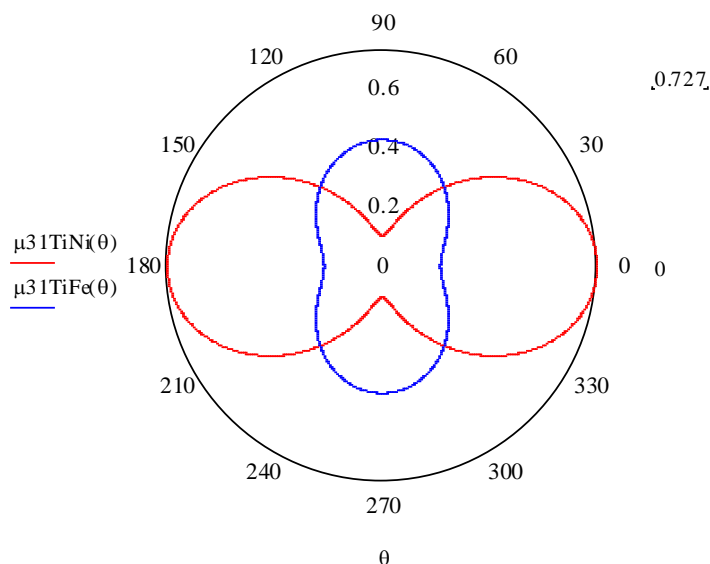


Рис. 2 – Центральные сечения указательных поверхностей модуля Юнга E (100) и сдвига G_{110} монокристаллов (ГПа) TiNi и TiFe

Упругие свойства кристаллов полностью нельзя представить одной поверхностью (рис. 1) и тем более её сечениями (рис. 2). Практически полезна поверхность, изображающая изменение модуля Юнга $E = (s'_{11})^{-1}$ с направлением растяжения-сжатия в пространстве. В этом случае указательная поверхность дает полное представление только об анизотропии модуля нормальной упругости Юнга и – модуля сдвига с направлением сдвига. В последнем случае необходимо фиксировать плоскость, которая сдвигается, например $\{110\}$. При построении указательной поверхности коэффициента Пуассона можно зафиксировать положение оси растяжения-сжатия, изменяя направление поперечной деформации или наоборот.

Рис. 3 – Коэффициент Пуассона μ_{31} TiNi и TiFe в сравнении

Были получены срезы изоповерхностей коэффициентов Пуассона кристаллов TiNi и TiFe. Экстремумы коэффициента Пуассона в кубических кристаллах могут проявляться при растяжении в направлениях [100], [110] и [111]. Ориентационную зависимость можно строить только для случая [110]. В двух других случаях коэффициент Пуассона будет постоянной величиной: в 1-м случае $\mu_{21} = \mu_{31} = -s_{12} / s_{11}$, в 3-м – $\mu_{21} = \mu_{31} = -(3s_{12} + \Delta) / (3s_{11} - 2\Delta)$. Сечения указательных поверхностей коэффициентов Пуассона интерметаллидов TiNi и TiFe имеют вид как на рис. 3. Коэффициенты Пуассона $\mu(\theta)$ вычислялись из соотношений:

$$\begin{aligned}\mu_{21} &= -(2s_{12} + \Delta \cos^2 \theta) / (2s_{11} - \Delta), \\ \mu_{31} &= -(2s_{12} + \Delta \sin^2 \theta) / (2s_{11} - \Delta)\end{aligned}\quad (6)$$

Как видно из приведенных таблиц вычислений и рисунков уровень упругих свойств TiNi и TiFe сплавов кардинально отличается друг от друга. Это же справедливо и для типа анизотропии интерметаллидов. Видно для TiNi в отличие от $\text{Ti}_{50}\text{Fe}_{50}$, модули Юнга вдоль высокосимметричных направлений подчиняются неравенству $E_{100} < E_{110} < E_{111}$. У $\text{Ti}_{50}\text{Fe}_{50}$ наоборот $E_{100} > E_{110} > E_{111}$ (отрицательная анизотропия). Кроме того параметр анизотропии Δ для $\text{Ti}_{50}\text{Fe}_{50}$ по знаку противоположен соответствующему параметру для монокристаллов никелида титана, что полностью соответствует графикам на рис. 1 и рис. 2 и также свидетельствует об отрицательной упругой анизотропии кристаллической структуры сплава Ti-50% Fe. Кристаллическая решетка в этом случае более податлива к сдвигу в базовой плоскости {100}, чем к “зинеровскому” сдвигу {110}<110>, играющему большую роль при мартенситной перестройке решетки в сплавах на основе никелида титана [10].

Полученные данные и установленные различия в уровне и характере упругих свойств соединений будут полезны для анализа механизмов и природы мартенситных превращений в сплавах никелида титана, лежащих в основе эффектов памяти формы и сверхэластичности в TiNi.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Муслов С.А. Предмартенситные состояния в монокристаллах сплавов TiNi-TiFe и TiNi-TiCu: (01.04.07): Дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук / Том. гос. ун-т им. В. В. Куйбышева, 1987. - 166 с.
2. Хачин В.Н. Никелид титана. Структура и свойства / Хачин В.Н., Пушин В.Г., Кондратьев В.В. // М.: Наука, 1992. – 160 с.
3. Муслов С.А. Применение материалов с эффектом памяти формы в науке, технике и медицине. – М.: Издательский дом "Фолиум", 2007. – 328 С.
4. Кузнецов А.В. Упругие постоянные TiNi вблизи мартенситных превращений / Кузнецов А.В., Муслов С.А., Лотков А.И. и др. // Известия вузов, сер. Физика. – 1987, № 7. – С. 98-99.
5. Муслов С.А. Аномалии упругих постоянных монокристаллов $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{48}\text{Fe}_2$ вблизи мартенситных превращений / Муслов С.А., Кузнецов А.В., Хачин В.Н. и др. // Известия вузов, сер. Физика. – 1987, № 8. – С. 104-105.
6. Пушин В.Г. Микроструктура и физические свойства сплавов системы $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50-x}\text{Fe}_x$ с эффектами памяти формы. Сообщение II. Упругие свойства / Пушин В.Г., Хачин В.Н., Юрченко Л.И. и др. // Физ. метал. и металловедение. – 1995. – Т. 79. Вып. 4. – С. 70-76.
7. Муслов С.А. Сплавы с памятью формы: свойства, получение и применение в технике и медицине / Муслов С.А., Шеляков А.В., Андреев В.А. // Москва, МГМСУ, 2018. В печати.
8. Duering T.W. Materials properties handbook: titanium alloys / Duering T.W., Pelton A.R. // Materials Park, OH: ASM

International, The Materials Information Society, 1994.

9. Епишин А.И. Экстремальные значения коэффициента Пуассона кубических кристаллов / А.И. Епишин, Д.С. Лисовенко. Журнал технической физики, 2016, том 86, вып. 10. - С. 74-82.

10. De Fontaine D. Mechanical instabilities in the b.c.c. lattice and the beta to omega phase transformation // Acta met. – 1970. – V. 18. – N 2. – P. 275-279.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Muslov S.A. Predmartensitnye sostoyaniya v monokristallakh splavov TiNi-TiFe i TiNi-TiCu: (01.04.07) [Pre-martensitic States in Single Crystals of TiNi-TiFe and TiNi-TiCu Alloys]: dis. ... of PhD in Physics and Mathematics / Tomsk State Un. named after V.V. Kuibyshev, 1987. - 166 p. [in Russian]

2. Hachin V.N. Nikelid titana. Struktura i svoistva. [Titanium Nickelide . Structure and Properties] / Hachin V.N., Pushin V.G., Kondratiev V.V. // M.: Nauka, 1992. – 160 p. [in Russian]

3. Muslov S.A. Primenenie materialov s efektom pamiati formy v nauke, tekhnike i mediysine [Application of Materials with Shape Memory Effect in Science, Technology and Medicine]. – M.: Publishing house “Folium,” 2007. - 328 p. [in Russian]

4. Kuznetsov A.V. Uprugie postoyannye TiNi vblizi martensitnykh prevrashhenii [Elastic Constants of TiNi near Martensitic Transformations] / Kuznetsov A.V., Muslov S.A., Lotkov A.I. and others // Trudy vysshikh uchebnykh zavedeniy, seriya fiziki [Proceedings of Higher Educational Institutions, Physics Series]. – 1987, No. 7. – P. 98-99. [in Russian]

5. Muslov S.A. Anomalii uprugikh postoyannykh monokristallov Ti50Ni48Fe2 vblizi martensitnykh prevrashhenii [Anomalies of Elastic Constants of Ti50Ni48Fe2 Single Crystals near Martensitic Transformations] / Muslov S.A., Kuznetsov A.V., Hachin V.N. and others // Trudy vysshikh uchebnykh zavedeniy, seriya fiziki [Proceedings of Higher Educational Institutions, Physics Series] – 1987, No. 8. – P. 104-105. [in Russian]

6. Pushin V.G. Mikrostruktura i fizicheskie svoistva splavov sistemy Ti50Ni50-xFex s effektami pamiati formy [Microstructure and Physical Properties of Ti50Ni50-xFex Alloys with Shape Memory Effects] Communication II. Elastic Properties. / Pushin V.G., Hachin V.N., Yurchenko L.I. and others // Fiz. metal. i metalurgiya [Phys. Metal. and Metallurgy].- 1995. – V. 79. Issue 4. – P. 70-76. [in Russian]

7. Muslov S.A. Splavy s pamiaty formy: svoistva, poluchenie i primeneniye v tekhnike i meditsine [Alloys with Shape Memory: Properties, Production and Use in Engineering and Medicine] / Muslov S.A., Sheliakov A.V., Andreev V.A. // Moscow, MSMSU, 2018. In Press. [in Russian]

8. Duering T.W. Materials properties handbook: titanium alloys. / Duering T.W., Pelton A.R. // Materials Park, OH: ASM International, The Materials Information Society, 1994.

9. Epishin A.I. Ekstremalnye znacheniya koeffitsienta Puassona kubicheskikh kristallov [Extremal Values of Poisson's Ratio of Cubic Crystals] / A.I. Epishin, D.S. Lisovenko // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Journal of Technical Physics], 2016, Vol. 86, Issue 10. – P. 74-82. [in Russian]

10. De Fontaine D. Mechanical instabilities in the b.c.c. lattice and the beta to omega phase transformation // Acta met. – 1970. – V. 18. – N 2. – P. 275-279.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.007>**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ФЛЮОРЕСЦЕНЦИИ РАЗЛИЧНЫХ СОРТОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ, РАСТВОРЕННЫХ В МОРСКОЙ ВОДЕ, ПРИ ДВУХЧАСТОТНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ ИМПУЛЬСАМИ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

Научная статья

Прошенко Д.Ю.¹, Майор А.Ю.^{2,*}, Голик С.С.³¹ ORCID: 0000-0001-8378-8208;² ORCID: 0000-0002-3562-3078;³ ORCID: 0000-0003-4199-4163,^{1,2,3} Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия;

* Корреспондирующий автор (mayor[at]iacp.dvo.ru)

Аннотация

Исследована временная динамика спектров лазерно-индуцированной флуоресценции различных сортов нефтепродуктов, растворенных в морской воде, при двухчастотном возбуждении на длинах волн 266 и 400 нм импульсами длительностью порядка 100 фс. Определены минимальные пределы обнаружения концентраций для растворов образцов флотского мазута MFO и газомоторного топлива TCM. Проведенные исследования показали, что используемый метод обладает хорошей чувствительностью и может применяться для анализа следов углеводородов в морской воде, как антропогенного, так и природного происхождения.

Ключевые слова: лазерно-индуцированная флуоресценция, фемтосекундные импульсы, нефтепродукты, минимальные пределы обнаружения.

INVESTIGATION OF LASER-INDUCED FLUORESCENCE SPECTRA OF DIFFERENT GRADES OF PETROLEUM PRODUCTS DISSOLVED IN SEA WATER WITH DOUBLE-FREQUENCY EXCITATION BY PULSES OF FEMTOSECOND LENGTH

Research article

Proshchenko D.Yu.¹, Major A.Yu.^{2,*}, Golik S.S.³¹ ORCID: 0000-0001-8378-8208;² ORCID: 0000-0002-3562-3078;³ ORCID: 0000-0003-4199-4163,^{1,2,3} Far Eastern Federal University, PhD in Physics and Mathematics, Vladivostok, Russia;

* Corresponding author [mayor[at]iacp.dvo.ru]

Abstract

The time dynamics of the laser-induced fluorescence spectra of various grades of petroleum products dissolved in seawater was studied for two-frequency excitation at wavelengths of 266 and 400 nm with pulses of duration about 100 fs. The minimum detection limits for concentrations of MFO fuel oil samples and TCM gas engine fuel were determined. The conducted studies showed that the method used has good sensitivity and can be used to analyze traces of hydrocarbons in seawater, both anthropogenic and natural origin.

Keywords: laser-induced fluorescence, femtosecond pulses, oil products, minimum detection limits.

Задача своевременного обнаружения следов утечки различных типов нефтепродуктов имеет приоритетное значение в вопросах обеспечения экологической безопасности морских экосистем. Это связано с тем обстоятельством, что нефтяные загрязнения приводят к нарушению естественных биологических процессов и взаимосвязей, существенно изменяют условия обитания всех видов живых организмов и имеют аккумулятивный эффект в морской флоре и фауне [1], [2], [3], [4]. В результате интенсивного перемешивания вод в зоне прибрежных нефтепродуктов быстро распределяются во всей толще воды и начинают оказывать пагубное влияние на морскую биоту. В прибрежной зоне весьма велика вероятность попадания нефтепродуктов в море в результате столкновений судов, посадок на мель и других аварий [5], приводящих к разрушению герметичных топливных резервуаров. Кроме того, здесь размещены порты со всей инфраструктурой, включающей стоянки судов, топливозаправочные пункты, судоремонтные предприятия. Все эти объекты являются потенциальными источниками загрязнения воды нефтепродуктами. В таких условиях необходим своевременный и эффективный мониторинг экологического состояния морских акваторий. В качестве чувствительного и оперативного дистанционного способа детектирования следов растворенных фракций и эмульсий углеводородов на поверхности и в толще воды, а также для оценки функционирования фотосинтетических систем клеток фитопланктона как индикаторов состояния морских экосистем, может выступать метод лазерной индуцированной флуоресценции (ЛИФ) [6], [7], [8], [9]. Также с помощью флуоресцентных методов возможна идентификация природных залежей нефтепродуктов и газогидратов [10].

В данной работе проведены лабораторные измерения по определению пределов минимально обнаружимых концентраций растворов различных сортов нефтепродуктов при двухчастотном возбуждении (266 и 400 нм) импульсами фемтосекундной длительности и исследована временная динамика спектров флуоресценции различных сортов нефтепродуктов.

В качестве исследуемых образцов были взяты растворы флотского мазута MFO и газомоторного топлива TCM. Для их получения в пробы морской воды, взятые в акватории Амурского залива, добавлялись однопроцентные по весу образцы нефтепродуктов. Далее в течение суток с помощью магнитной мешалки производилось их постоянное

перемешивание. После с помощью метода инфракрасной спектроскопии с Фурье преобразованием была определена процентная доля растворившихся сортов нефтепродуктов. Для получения проб с различной концентрацией было произведено последующее разведение получившейся пробы с исходным образцом морской воды.

В качестве источника лазерного излучения на длинах волн 266 и 400 нм использовался фемтосекундный лазерный комплекс Tsunami + Spitfire 40f-1k-5W, работающий на частоте 1 кГц с генератором второй и третьей гармоники Spectra Physics с длительностью лазерных импульсов порядка 100 фс. Транспортировка импульсов в кварцевую кювету с исследуемой пробой осуществлялось по атмосферной трассе с помощью оптической системы, состоящей из зеркал с коэффициентом отражения ~98% на длине волны 266 нм. Средняя суммарная мощность лазерных импульсов непосредственно перед кюветой с исследуемой пробой составляла порядка 25 мВт при соотношении энергий импульсов 1 ± 0.05 . Излучение заводилось сверху через открытую водную поверхность под углом 45° . Кювета устанавливалась на регулируемой платформе под углом 45° . В качестве регистратора спектров использовался широкодиапазонный спектрометр Maya 2000 Pro с 600 мкм световодом и коллиматором 74-UV (Ocean Optics) с рабочим спектральным диапазоном 200 – 1100 нм. Вход оптической приемной системы размещался на расстоянии порядка 1 см от источника индуцированного сигнала флуоресценции. Управление параметрами экспериментального комплекса осуществлялось с помощью персонального компьютера. Время экспозиции приемного спектрометра задавалось равным 3 секундам. Усреднение проводилось по трем спектрам. Время накопления и количество усреднений было выбрано с учетом оптимального времени, при котором удается регистрировать сигнал без существенного снижения общего уровня спектров флуоресценции вследствие “выгорания” растворенных нефтепродуктов под воздействием высокоинтенсивного лазерного ультрафиолетового излучения. Исследования проводились дважды с интервалом в двое суток. В результате были получены следующие спектральные характеристики флуоресценции исследуемых образцов. Спектры нормированы на максимум сигнала первой гармоники лазерного фемтосекундного комплекса на длине волны 800 нм. Из спектров исключены пики рассеянного излучения 400 нм методом линейной интерполяции с учетом формы спектра излучения.

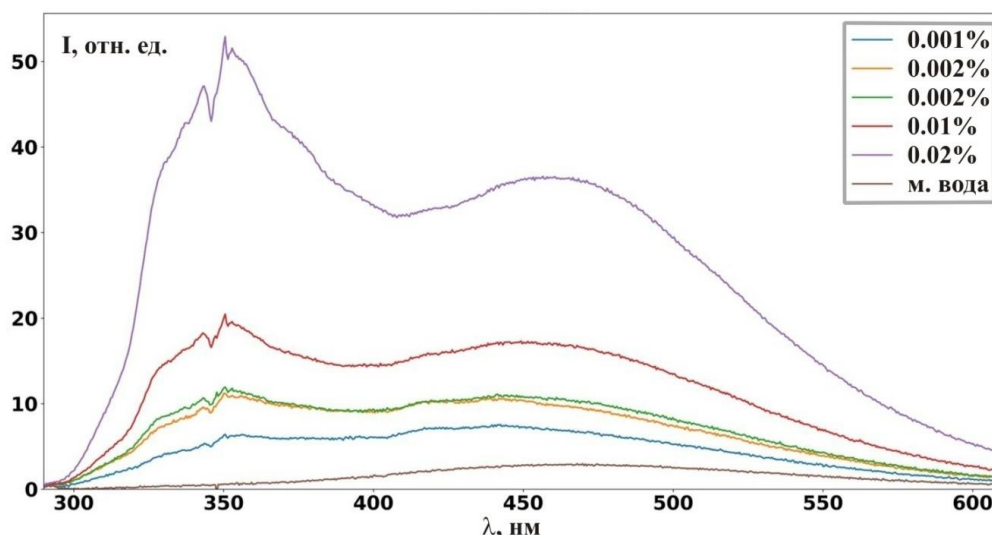


Рис. 1 – Спектры флуоресценции растворов ТСМ в морской воде при фемтосекундном двухчастотном возбуждении, полученные в первый день проведения эксперимента

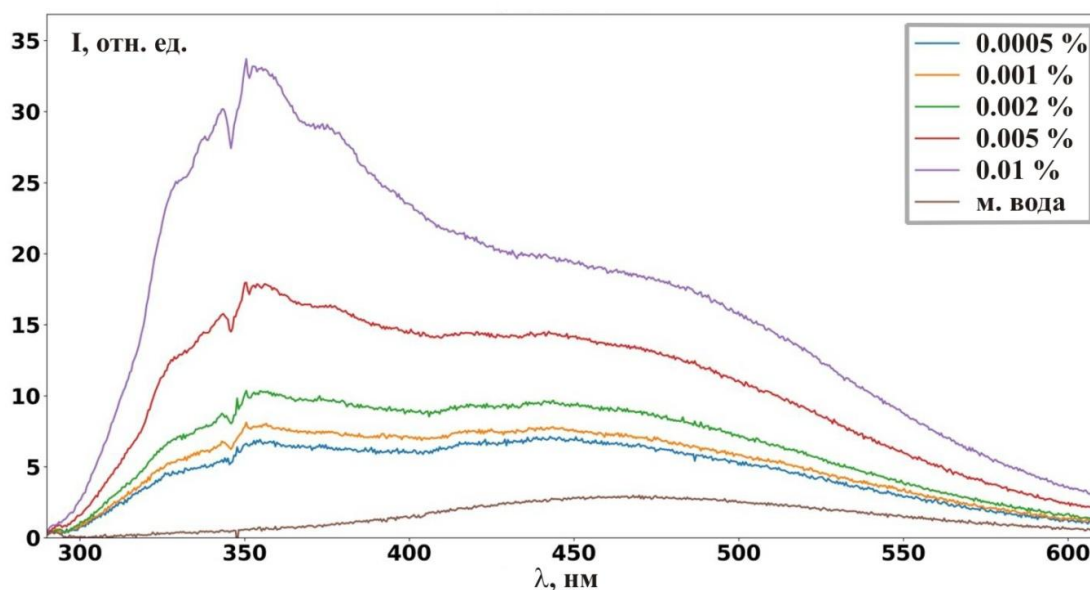


Рис. 2 – Спектры флуоресценции растворов МФО в морской воде при фемтосекундном двухчастотном возбуждении, полученные в первый день проведения эксперимента

Анализ результатов показывает, что структура спектров флуоресценции ТСМ при двухчастотном возбуждении импульсами фемтосекундной длительности более характерна для случая тяжелых сортов нефтепродуктов.

В качестве характеризующего параметра для построения калибровочных кривых была взята интегральная характеристика спектров флуоресценции в диапазоне 300-600 нм:

$$\alpha = \int_{300}^{600} (I(\lambda) - I_0(\lambda)) d\lambda \quad (1)$$

где $I(\lambda)$ – спектральная интенсивность сигнала флуоресценции растворенного нефтепродукта; $I_0(\lambda)$ – спектральная интенсивность сигнала флуоресценции чистой морской воды. Для определения пределов минимально обнаружимых концентраций по полученным интегральным параметрам строились калибровочные кривые (рис. 3, 4), у которых определялся коэффициент наклона кривой S . Минимально обнаружимые пределы концентрации рассчитывались по формуле $LOD = 3\sigma/S$, где σ – стандартное отклонение фонового сигнала, принятого за сигнал флуоресценции чистой морской воды.

В результате были получены следующие калибровочные кривые, на основании которых для обоих сортов нефтепродуктов было получено значение LOD, равное 0.0002%.

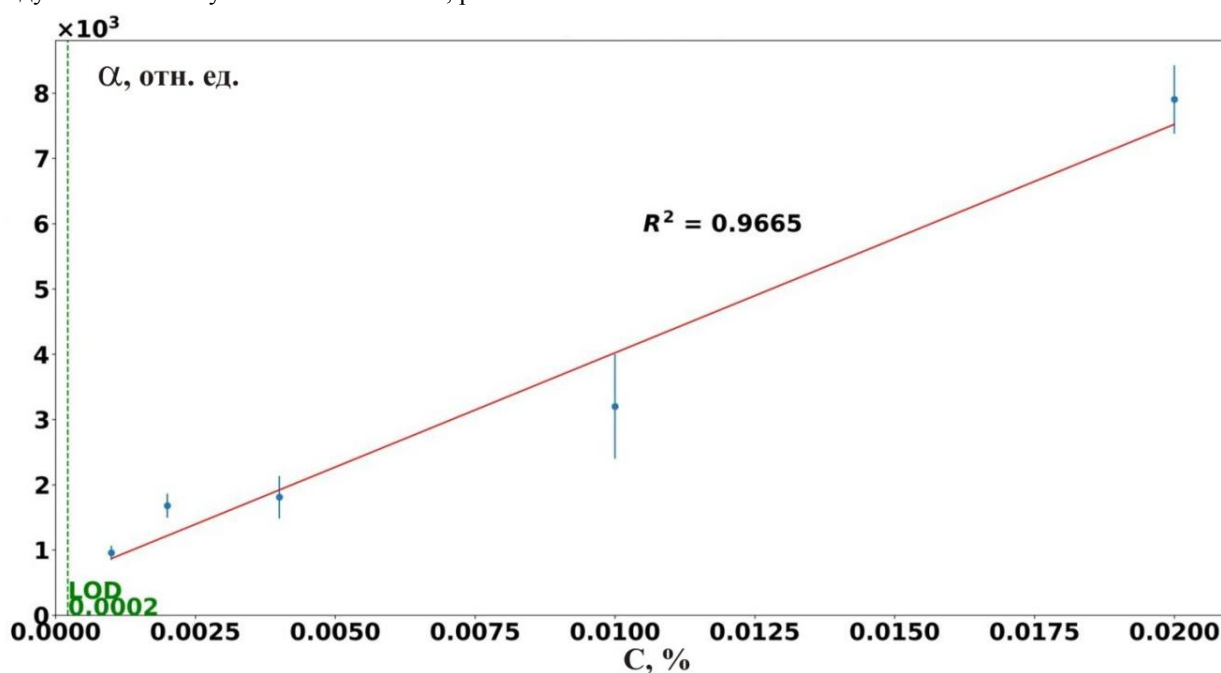


Рис. 3 – Калибровочная кривая для ТСМ в первый день проведения эксперимента

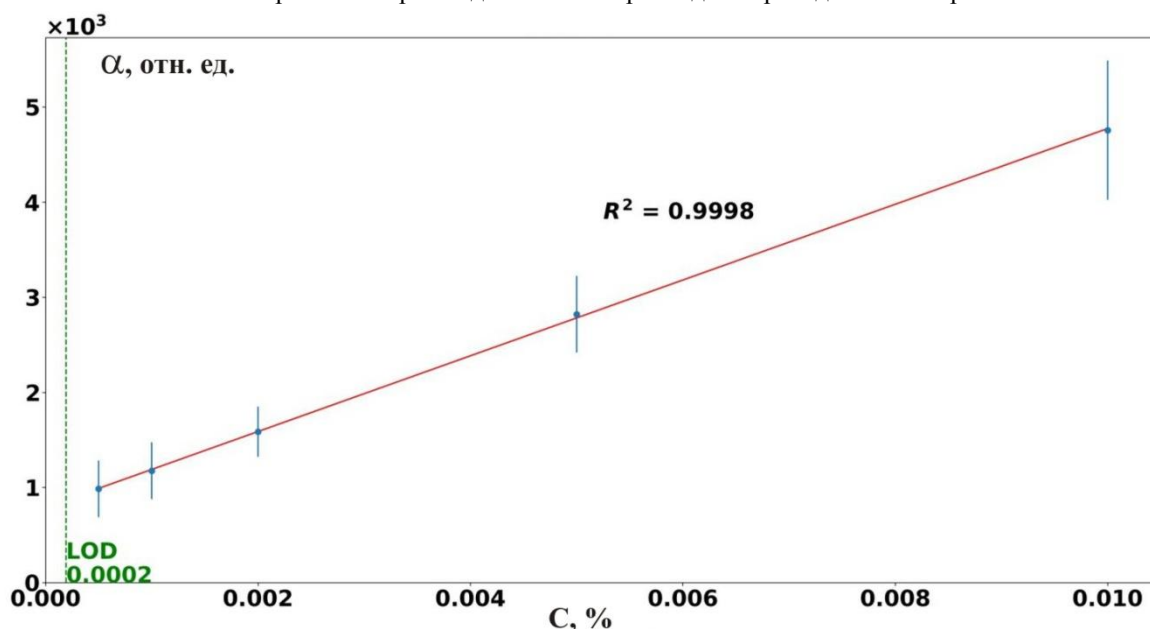


Рис. 4 – Калибровочная кривая для МФО в первый день проведения эксперимента

Была исследована динамика спектров флуоресценции в зависимости от времени воздействия лазерного излучения на раствор нефтепродукта. Полученные результаты представлены на рис. 5 и 6.

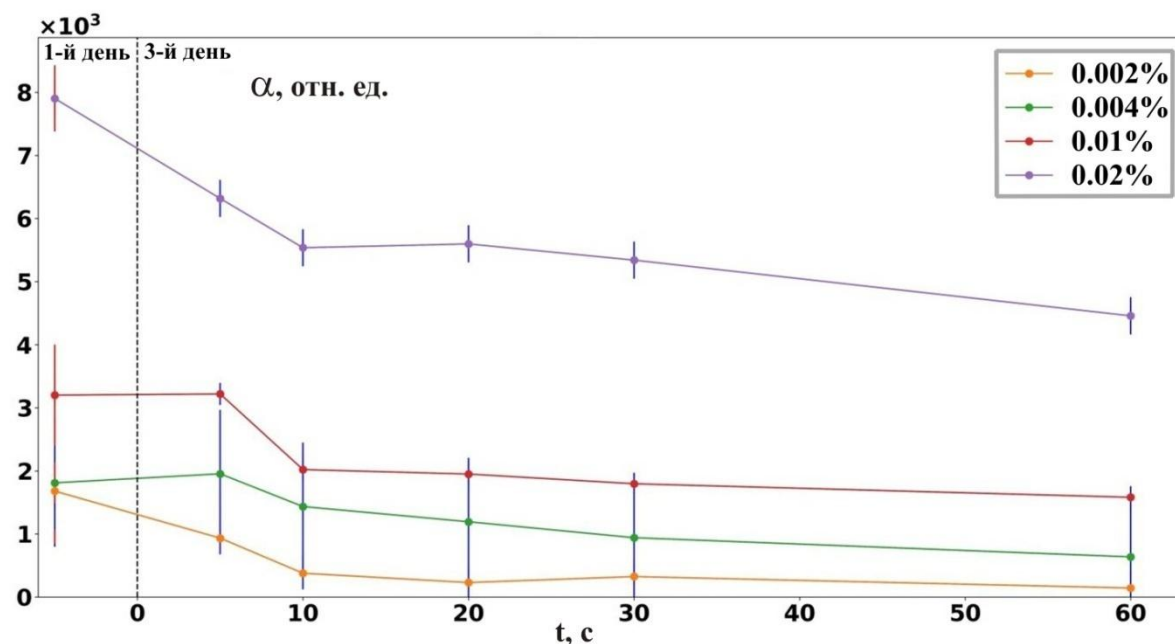


Рис. 5 – Динамика спектров флуоресценции раствора ТСМ в зависимости от времени воздействия фемтосекундного лазерного излучения

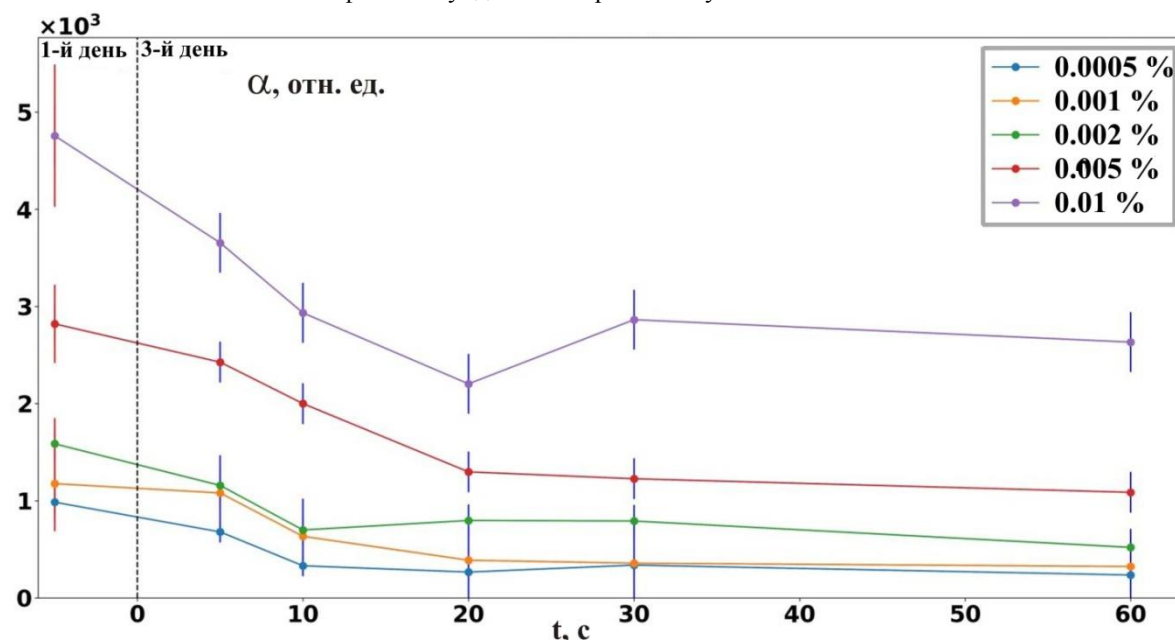


Рис. 6 – Динамика спектров флуоресценции раствора МФО в зависимости от времени воздействия фемтосекундного лазерного излучения

Согласно полученным результатам, спустя два дня наблюдается устойчивая тенденция снижения интегрального сигнала флуоресценции. В дальнейшем в первые 10-20 секунд (в зависимости от сорта и концентрации нефтепродукта) воздействия излучения наблюдается относительно резкое снижение уровня сигнала флуоресценции (порядка 10%) с последующим выходом на квазипостоянный уровень сигнала в последующие моменты времени.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (соглашение № 14-50-00034).

Funding

This work was supported by a grant from the RNF (agreement No. 14-50-00034).

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Handbook of oil spill Science and technology / Fingas M. (ed.). – Edmonton: John Wiley & Sons. – 2015. -728 p.
2. Немировская И.А. Нефть в океане. Загрязнение и природные потоки. / Немировская И.А. - М.: Научный мир, 2013. - 456 с.
3. Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа. / Патин С.А. - М.: Изд-во ВНИРО, 2001. - 247 с.

4. Нельсон-Смит А. Нефть и экология моря. / Нельсон-Смит А. - М.: Прогресс, 1977.- 304 с.
5. Матишов Г.Г. Воздействие на среду и биоту аварийного разлива нефтепродуктов в Керченском проливе в ноябре 2007 г. / Матишов Г.Г., Инжебейкин Ю.И., Савицкий Р.М. // Водные ресурсы. - 2013.- Т.40. - №3. - С.259–273
6. Puiu A. Submersible spectrofluorometer for real-time sensing of water quality / Puiu A., Fiorani, L., Menicucci and others // Sensors.- 2015.- v.15. – p. 14415-14434.
7. Hussein A. Characterization of petroleum crude oils using Laser Induced Fluorescence / Hussein A., Marzouk A. // J. Pet. Environ. Biotechnol. - 2015. – № 6. – p. 3-6.
8. Raymond M. Measures Laser Remote Sensing: fundamentals and application. / Raymond M. Measures. - Malabar, FL: Krieger Publishing. - 1992. – 510 p.
9. Bukin O.A. Continuous measurements of chlorophyll-a concentration in the pacific ocean by shipborne laser fluorometer and radiometer: comparison with sea wifs data. / Bukin O.A., Pavlov A.N., Permyakov M.S. and others // International Journal of Remote Sensing.- 2001. - 22(2-3) – p. 415-427.
10. Kolber Z. S. Measurements of variable chlorophyll fluorescence using fast repetition rate techniques: defining methodology and experimental protocols / Kolber Z. S., Prášil O., Falkowski P. G. // Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics. - 1998. - 1367. - p. 88-106.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Handbook of oil spill Science and technology / Fingas M. (ed.). – Edmonton: John Wiley & Sons. – 2015. -728 p.
2. Nemirovskaya I.A. [Oil in Ocean. Pollution and Natural Streams] / Nemirovskaya I.A. - Moscow: Nauchniy mir, 2013. – 456 p. [in Russian]
3. Patin S.A. [Oil and Ecology of Continental Shelf] / Patin S.A. – Moscow: VNIRO Publishing House, 2001. – 247 p. [in Russian]
4. Nelson-Smith A. [Oil and Ecology of Sea] / Nelson-Smith A. – М.: Progress, 1977. – 304 p. [in Russian]
5. Matishov G.G. [Impact on Environment and Biota of Oil Spills in Kerch Strait in November 2007] / Matishov G.G., Inzhebeykin Yu.I., Savitsky R.M. // Vodniye resursy [Water resources]. – 2013. – V.40. – No. 3. – P.259-273 [in Russian]
6. Puiu A. Submersible spectrofluorometer for real-time sensing of water quality / Puiu A., Fiorani, L., Menicucci and others // Sensors.- 2015.- v.15. – p. 14415-14434.
7. Hussein A. Characterization of petroleum crude oils using Laser Induced Fluorescence / Hussein A., Marzouk A. // J. Pet. Environ. Biotechnol. - 2015. – № 6. – p. 3-6.
8. Raymond M. Measures Laser Remote Sensing: fundamentals and application. / Raymond M. Measures. - Malabar, FL: Krieger Publishing. - 1992. – 510 p.
9. Bukin O.A. Continuous measurements of chlorophyll-a concentration in the pacific ocean by shipborne laser fluorometer and radiometer: comparison with sea wifs data. / Bukin O.A., Pavlov A.N., Permyakov M.S. and others // International Journal of Remote Sensing.- 2001. - 22(2-3) – p. 415-427.
10. Kolber Z. S. Measurements of variable chlorophyll fluorescence using fast repetition rate techniques: defining methodology and experimental protocols / Kolber Z. S., Prášil O., Falkowski P. G. // Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics. - 1998. - 1367. - p. 88-106.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.008>**СИНТЕЗ И ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ДОПИРОВАННЫХ МАРГАНЦЕМ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК СУЛЬФИДА ЦИНКА**

Научная статья

Сергеев А.А.^{1,*}, Сергеева К.А.², Леонов А.А.³¹ ORCID: 0000-0002-8294-865X;^{1, 2, 3} Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

* Корреспондирующий автор (aleksandrsergeev[at]inbox.ru)

Аннотация

Приведены результаты исследований оптических характеристик квантовых точек сульфида цинка и кадмия в различных органических оболочках. Продемонстрирована возможность управления основными характеристиками люминесценции различными подходами синтеза и процессом послесинтетической обработки. Определены соотношения компонентов реакционной смеси, обеспечивающие наибольшую интенсивность люминесценции. Установлено, что заключение квантовой точки в оболочку из глутатиона приводит к возникновению двух полос люминесценции с максимумами вблизи 420 и 590 нм. Для оболочки из меркаптоянтарной кислоты характерна одна полоса люминесценции вблизи 590 нм. В свою очередь, в случае оболочки из цистеина наблюдается один максимум люминесценции вблизи 500 нм.

Ключевые слова: квантовые точки, сульфид цинка, меркаптоянтарная кислота, цистеин, глутатион, ион-активатор, люминесценция.

SYNTHESIS AND LUMINESCENCE OF QUANTUM DOTS OF ZINC SULFIDE DOPED WITH MANGANESE

Research article

Sergeev A.A.^{1,*}, Sergeeva K.A.², Leonov A.A.³¹ ORCID: 0000-0002-8294-865X;^{1, 2, 3} Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

* Correspondent author (aleksandrsergeev[at]inbox.ru)

Abstract

The work presents the results of the optical characteristics study of quantum dots of zinc sulfide and cadmium in various organic shells. The possibility of controlling the main characteristics of luminescence by various synthetic approaches and post-synthetic processing is demonstrated. The ratios of the components of the reaction mixture ensuring the highest luminescence intensity are determined. It was found that the conclusion of a quantum dot in a glutathione shell leads to the emergence of two luminescence bands with maxima near 420 and 590 nm. For the shell of mercaptosuccinic acid, one luminescence band comprises 590 nm. In turn, a cysteine shell there is one luminescence maximum of 500 nm.

Keywords: quantum dots, zinc sulfide, mercaptosuccinic acid, cysteine, glutathione, ion-activator, luminescence.

Несмотря на большое количество методов получения фотоактивных структур на основе квантовых точек халькогенидов металлов, можно выделить некоторые ключевые аспекты, оказывающие первостепенное влияние на их оптические и люминесцентные характеристики. В первую очередь это квантоворазмерное ограничение, характерное для такого рода структур и приводящее к зависимости характеристик квантовых точек от их размеров [1, С. 2261]. Вторая особенность наноразмерных полупроводниковых частиц заключается в существенной зависимости их характеристик от поверхностных эффектов. Так, увеличение доли поверхностных атомов, возникающее при уменьшении размеров частицы, приводит к образованию большого числа некомпенсированных связей на поверхности частицы, открывая возможности для модификации оптических характеристик частицы за счет варьирования условий пассивации поверхности.

Таким образом, методы формирования оптически активных структур на основе квантовых точек должны обеспечивать возможность контроля и варьирования как размеров квантовых точек, так и состояния их поверхности. В этой связи способ получения квантовых точек путем химического осаждения коллоидных растворов халькогенидов представляется наиболее перспективным, поскольку он позволяет достаточно просто контролировать указанные параметры частиц путем подбора соответствующего молярного соотношения компонентов реакционной смеси [2, С. 241]. Среди халькогенидов – основными представителями которых являются соединения серы, селена и теллура – наибольшую перспективность представляют соединения серы, поскольку сульфиды, по сравнению с селенидами и теллуридами, обладают меньшей токсичностью [3, С. 165], что имеет большое значение при создании систем экологической безопасности. В области получения наноразмерных сульфидов металлов основное внимание сконцентрировано на поиске новых сульфидизаторов (материалов, являющихся источником ионов серы в реакционной смеси) и стабилизаторов (материалов оболочки квантовой точки). В работах [2, С. 243], [4, С. 1460], [5, С. 2911] показано, что природа сульфидизатора оказывает существенное влияние на размер получаемых частиц. Стабилизаторы, в свою очередь, существенно влияют на люминесцентные характеристики квантовых точек и степень их агрегации в растворе. Большое количество возможных вариантов стабилизаторов, а это фактически все органические соединения, имеющие способность связываться с поверхностными атомами металла или серы через тиольные, фосфиновые или SH-группы (такие как цистеин, хитозан, меркаптокислоты, белки и др.), делают актуальными исследования зависимости оптических и структурных характеристик получаемых квантовых точек от природы стабилизатора.

В данной работе представлены результаты исследования зависимости люминесцентных характеристик и стабильности квантовых точек сульфидов металлов от типов их органической оболочки и начального молярного соотношения компонентов реакционной смеси.

Для синтеза квантовых точек были приготовлены водные растворы: ацетата цинка с добавкой ацетата марганца, цистеина, меркаптоянтарной кислоты, глутатиона, гидроксида натрия и сульфида натрия. Смешение растворов проводилось в определенной последовательности при варьировании молярных соотношений и концентраций компонентов реакционной смеси. В раствор цистеина, меркаптоянтарной кислоты, или глутатиона, выступающих в качестве стабилизаторов квантовых точек, при интенсивном перемешивании на магнитной мешалке вводился раствор ацетата цинка с добавкой ацетата марганца. Данная смесь перемешивалась на магнитной мешалке, после чего добавлялся раствор NaOH. Затем смесь перемешивалась на водяной бане при 60 °C или 80 °C в течении 30 мин. После этого при перемешивании в смесь по каплям добавлялся раствор сульфида натрия в течении еще 30 мин. Полученная реакционная смесь нагревалась в термостате (Binder 53) при температуре 80 °C, 90 °C, 100 °C в течение часа. Соотношения компонентов реакционной смеси в исследованных образцах приведены в таблицах 1, 2 и 3 для квантовых точек в оболочках из глутатиона, меркаптоянтарной кислоты и цистеина, соответственно.

Таблица 1 – Молярные соотношения компонентов реакционной смеси для квантовых точек сульфида цинка, легированных марганцем, в оболочке из глутатиона

№ /дата	Концентрация моль/л				
	L-Glu	Zn/Mn	Na ₂ S	NaOH	
183z 28.09.16	0.035	0.01	0.01	0.0358	Вод. баня 80 °C. 1ч Догрев : 183(1) Термостат 80 °C 30 мин 183(2) Термостат 80 °C 1ч 183(3) Термостат 80 °C 2ч
185z 04.10.16	0.03	0.0101	0.01	0.034	Вод. баня 80 °C. 1ч Догрев : Вод. баня 80 °C. 2ч
186z 04.10.16	0.025	0.0101	0.01	0.037	
187z 04.10.16	0.0204	0.0102	0.01	0.0356	
190z (повтор 185) 11.10.16	0.03	0.0101	0.01	0.0355	Вод. баня 80 °C. 1ч Догрев : Вод. баня 80 °C. 2ч
191z (повтор 186) 11.10.16	0.025	0.01	0.01	0.0351	

Таблица 2 – Молярные соотношения компонентов реакционной смеси для квантовых точек сульфида цинка, легированных марганцем, в оболочке из меркаптоянтарной кислоты

№ /дата	Концентрация моль/л				
	МЯК	Zn/Mn	Na ₂ S	NaOH	
165z 24.05.16	0.035	0.01	0.01	0.0373	Вод. баня 60 °C. 1ч Догрев : 165(1) Термостат 90 °C 30 мин 165(4) Термостат 90 °C 2ч
166z 26.05.16	0.035	0.0101	0.01	0.0351	Вод. баня 80 °C. 1ч 166(1) Догрев: 166(2) Вод. баня 80 °C. 1ч 166(3) Вод. баня 80 °C. 2ч
167z 02.06.16	0.03	0.01	0.01	0.0363	Вод. баня 80 °C. 1ч
168z 02.06.16	0.035	0.0051	0.0050	0.0343	
169z 02.06.16	0.035	0.015	0.015	0.0354	
180z 28.09.16	0.035	0.01	0.01	0.036	Вод. баня 80 °C. 1ч Догрев : 180(1) термостат 80 °C. 30 мин 180(2) термостат 80 °C. 1ч 180(3) термостат 80 °C. 2ч

Таблица 3 – Молярные соотношения компонентов реакционной смеси для квантовых точек сульфида цинка, легированных марганцем, в оболочке из цистеина

№ п/п	Концентрация моль/л			
	L-Cystein	ацетат Zn/ ацетат Mn	NaOH	Na ₂ S
158z	0,024	0,01	0,035	0,01
159z	0,027	0,01	0,035	0,01
160z	0,03	0,01	0,035	0,01
161z	0,033	0,01	0,035	0,01
162z	0,036	0,01	0,035	0,01

Таким образом, полученный набор квантовых точек с различными вариантами исходных компонентов реакционной смеси позволяет оценить пределы изменения оптических характеристик, в зависимости от условий синтеза. Кроме того, для ряда квантовых точек в оболочке из меркаптоянтарной кислоты и глутатиона проводилась дополнительная послесинтетическая температурная обработка на водной бане или в термостате.

На рисунке 1 приведены спектральные характеристики квантовых точек сульфида цинка легированных марганцем в различных органических оболочках: глутатиона, меркаптоянтарной кислоты (МЯК) и цистеина. Можно видеть, что органическая оболочка оказывает существенное влияние на люминесцентные характеристики квантовых точек. Так, для оболочки из глутатиона характерны два пика люминесценции с максимумами вблизи 410 нм (3.024 эВ) и 590 нм (2.1 эВ). Широкая полоса с $\lambda_{\max} \approx 590$ нм является характерной для ZnS, легированного Mn. Она обусловлена различной локализацией примесных ионов Mn в кристаллической решетке ZnS, в том числе локализованными в подрешетке цинка в местах сильных нарушений решетки [6, С. 44595]. Полоса люминесценции с энергией 3.024 эВ является характерной для чистого сульфида цинка и связана с дефектами решетки, образованными либо вакансиями, либо междоузельным расположением ионов цинка и серы [7, С. 56].

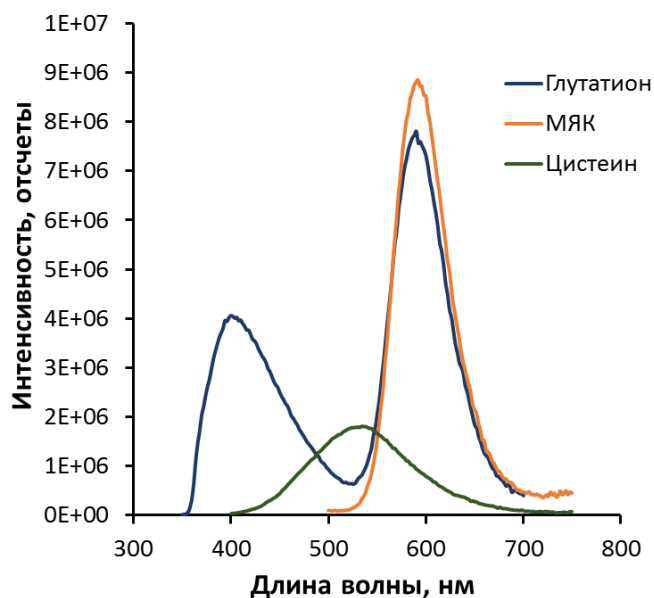
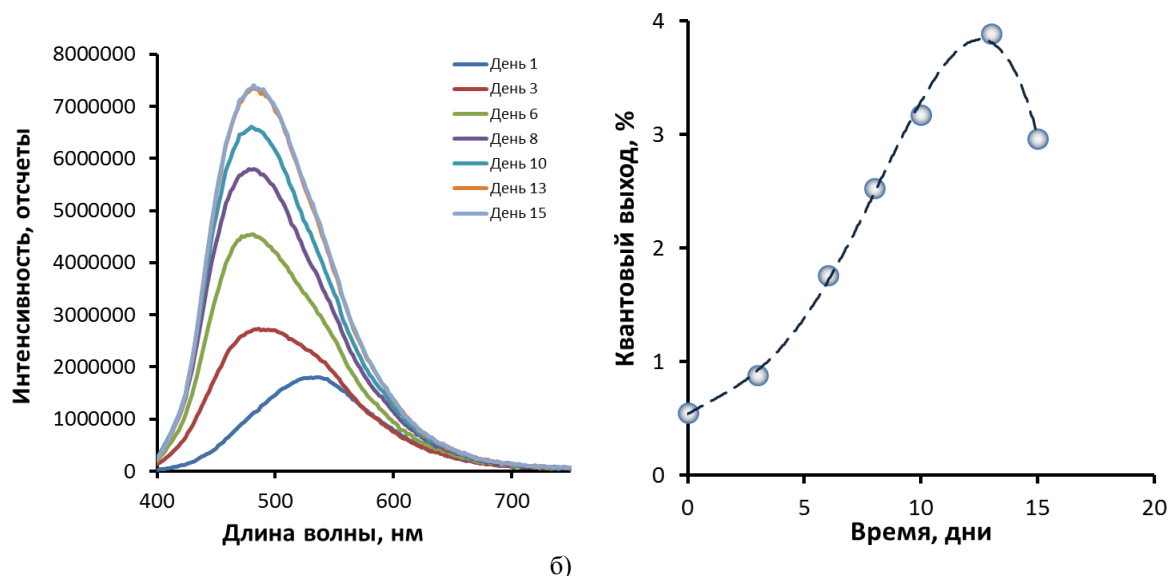


Рис. 1 – Сравнение люминесцентных характеристик квантовых точек сульфида цинка в различных оболочках

В случае же оболочки из МЯК наблюдается только максимум, обусловленный локализацией примесных ионов марганца в кристаллической решетке цинка. По всей видимости, МЯК обеспечивает наилучшие условия для встраивания иона марганца в кристаллическую решетку сульфида цинка, что приводит к возникновению максимального электронного трансфера через ион-активатор, блокируя собственную люминесценцию сульфида цинка [8, С. 6090]. Для квантовых точек в оболочке из цистеина характерен единственный пик с максимумом вблизи 500 нм (2.48 эВ), природа которого связана с излучением вакансий цинка или излучением иона марганца в тетраэдрической конфигурации [9, С. 106].

Значительные изменения спектра люминесценции квантовых точек от типа органической оболочки могут иметь несколько причин. Поскольку квантовые точки обладают существенной зависимостью люминесцентных характеристик от состояния поверхности, в первую очередь поверхностных вакансий серы, пассивация которых отрицательно заряженными ионообменными группами органической оболочки приводит к изменениям спектра люминесценции [10, С. 3041]. Другим эффектом, оказывающим влияние на люминесцентные характеристики, может служить различная степень встраивания ионов марганца в структуру сульфида цинка, приводящая к различному окружению ионов марганца ионами серы. В системе ZnS хорошо известны многочисленные политипные формы, образующиеся смешением структур сфалерита и вюртцита, которые в случае присутствия дефектов существенно изменяют спектр люминесценции квантовой точки [5, С. 44598].

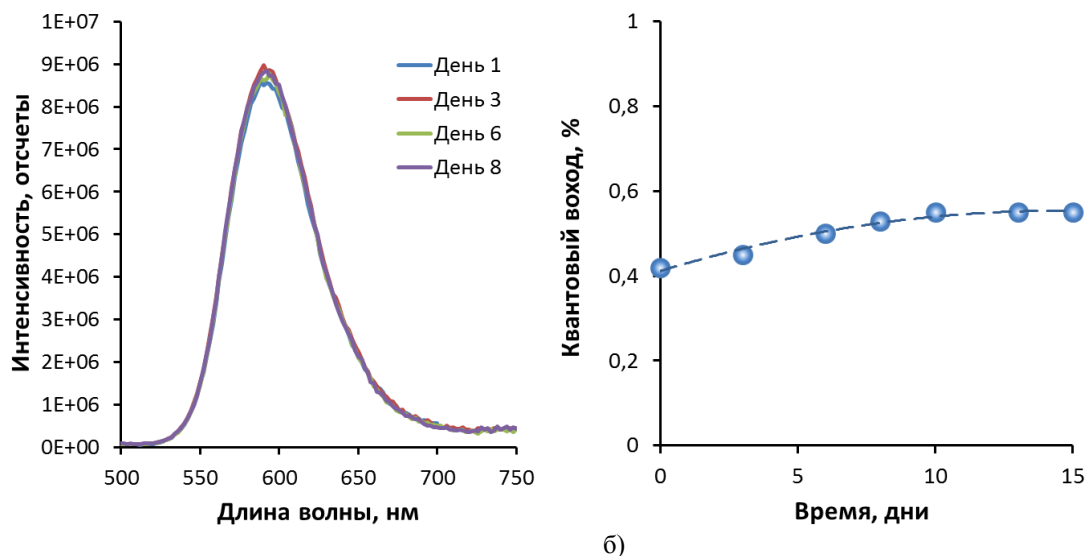
По всей видимости, находясь в водном растворе при нормальных условиях, квантовые точки продолжают изменять свою структуру, предположительно за счет непрореагировавших ионов реакционной смеси. Максимум люминесценции при этом смещается в коротковолновую область на величину порядка 100 нм (0.4 эВ) (образец №158, таблица 3, рисунок 1а).



а) б)
Рис. 2 – Изменение люминесцентных характеристик квантовых точек сульфида цинка в оболочке из цистеина с течением времени:
а) спектр люминесценции, б) квантовый выход люминесценции

Из рисунка 2а также можно видеть, что люминесценция квантовых точек на 13-й и 15-й день после синтеза практически совпадают, однако при этом квантовый выход люминесценции начинает уменьшаться, что свидетельствует об увеличении оптического поглощения на длинах волн, соответствующих полосам возбуждения и эмиссии квантовой точки.

В свою очередь, квантовые точки сульфида цинка в оболочке из меркаптоянтарной кислоты, демонстрируют большую стабильности, по сравнению с квантовыми точками в оболочке из цистеина. Из данных, приведенных на Рис. 3(а) видно, что с течением времени не происходит существенных изменений интенсивности люминесценции, ее спектральных особенностей и квантового выхода люминесценции. Последний демонстрирует незначительное увеличение в течение первой недели (Рис. 3б), после чего выходит на стабильное состояние.



а) б)
Рис. 3 – Люминесцентные характеристики квантовых точек сульфида цинка в оболочке из меркаптоянтарной кислоты:
а) спектр эмиссии, б) квантовый выход

Хорошая стабильность данных квантовых точек позволяет варьировать характеристики их люминесценции путем дополнительной послесинтетической обработки. Данные, приведенные в таблице 2 и на рисунке 4, демонстрируют, что варьированием времени догрева на водяной бане и термостатированием при температуре 80 °С в течение 1-3 часов можно управлять интенсивностью люминесценции полученных квантовых точек. При этом, наибольшее увеличение интенсивности люминесценции достигается при выдерживании образцов на водяной бане при температуре 80 °С в течение двух часов (образец №166(3), таблица 2, Рис. 4).

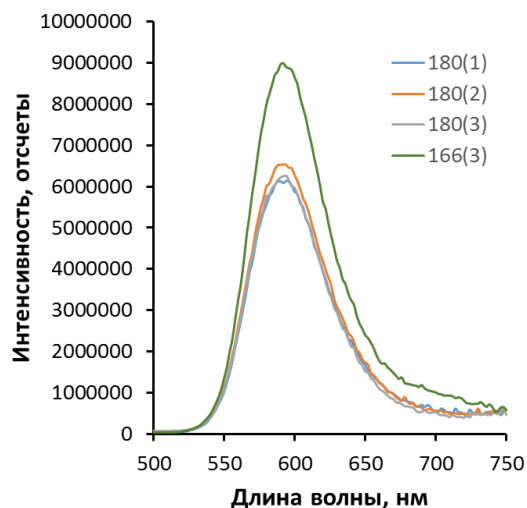


Рис. 4 – Зависимость люминесцентных характеристик квантовых точек сульфида цинка в оболочке из меркаптоянтарной кислоты от условий послесинтетической обработки

Примечание: номера образцов соответствуют номерам из таблицы 2

Для случая легированных марганцем квантовых точек сульфида цинка в оболочке из глутатиона, изменения люминесцентных характеристик, а именно, соотношения интенсивностей пиков люминесценции, соответствующих переходам в сульфиде цинка и марганце, можно добиться путем варьирования концентрации глутатиона в исходной реакционной смеси (Рис. 5, таблица 1). При этом, уменьшение концентрации глутатиона приводит к уменьшению интенсивности пика люминесценции, соответствующего различной локализации примесных ионов Mn в кристаллической решетке ZnS. В то же время, отношение пика, связанного с дефектами решетки на вакансиях цинка и серы к полосе люминесценции марганца увеличивается при уменьшении концентрации глутатиона.

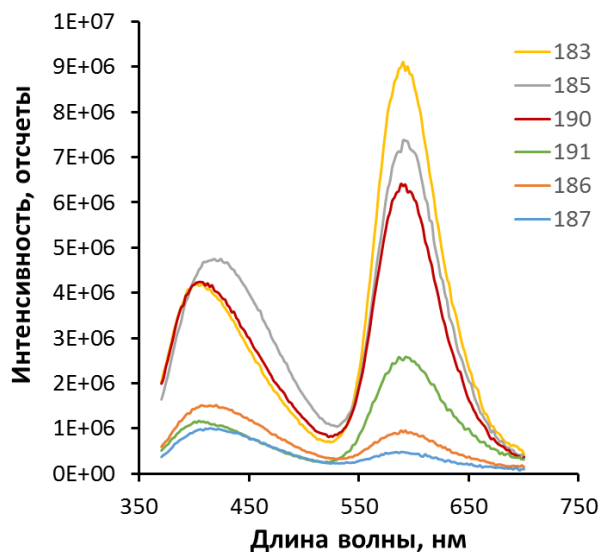


Рис. 5 – Зависимость люминесцентных характеристик квантовых точек сульфида цинка в оболочке из глутатиона от молярного соотношения компонентов реакционной смеси

Примечание: номера образцов соответствуют номерам из таблицы 1

Вне зависимости от концентрации глутатиона в реакционной смеси, данные квантовые точки демонстрируют наилучшую стабильность люминесцентных характеристик. В течение 15 дней после синтеза признаков изменения интенсивности люминесценции, квантового выхода или оптического поглощения обнаружено не было.

Таким образом, представленные результаты исследований зависимости оптических и люминесцентных характеристик квантовых точек сульфида цинка, легированных марганцем, от условий синтеза и послесинтетической обработки, демонстрируют возможность их варьирования в широком диапазоне, что делает данные квантовые точки перспективными для создания различного рода оптоэлектронных устройств.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант №14- 50-00034.

Конфликт интересов

Не указан.

Funding

The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 14-50-00034.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Bera D. Quantum dots and their multimodal applications: a review / D. Bera, L. Qian, T. K. Tseng and others // *Materials*. – 2010. – Т. 3. – №. 4. – С. 2260-2345.
2. Kozhevnikova N. S. Cadmium sulfide nanoparticles prepared by chemical bath deposition / N. S. Kozhevnikova, A. S. Vorokh, A. A. Urtskaya // *Russian Chemical Reviews*. – 2015. – V. 84. – №. 3. – P. 225-250.
3. Hardman R. A toxicologic review of quantum dots: toxicity depends on physicochemical and environmental factors / R. Hardman // *Environmental health perspectives*. – 2006. – Т. 114. – №. 2. – С. 165.
4. Kotkata M. F. Synthesis and structural characterization of CdS nanoparticles / M. F. Kotkata, A. E. Masoud, M. B. Mohamed and others // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. – 2009. – Т. 41. – №. 8. – С. 1457-1465.
5. Lesnyak V. Colloidal semiconductor nanocrystals: the aqueous approach / V. Lesnyak, N. Gaponik, A. Eychmüller // *Chemical Society Reviews*. – 2013. – Т. 42. – №. 7. – С. 2905-2929.
6. Joicy S. Mn^{2+} ion influenced optical and photocatalytic behaviour of Mn–ZnS quantum dots prepared by a microwave assisted technique / S. Joicy, R. Saravanan, D. Prabhu and others // *RSC Advances*. – 2014. – Т. 4. – №. 84. – С. 44592-44599.
7. Rajabi H. R. Effect of transition metal ion doping on the photocatalytic activity of ZnS quantum dots: Synthesis, characterization, and application for dye decolorization / H. R. Rajabi, M. Farsi // *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. – 2015. – Т. 399. – С. 53-61.
8. Borse P. H. Luminescence quenching in ZnS nanoparticles due to Fe and Ni doping / P.H. Borse, N. Deshmukh, R. F. Shinde, S. K. Date and others // *Journal of Materials Science*. – 1999. – Т. 34. – №. 24. – С. 6087-6093.
9. Koneswaran M. L-Cysteine-capped ZnS quantum dots based fluorescence sensor for Cu^{2+} ion / M. Koneswaran, R. Narayanaswamy // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2009. – Т. 139. – №. 1. – С. 104-109.
10. Hines D. A. Recent advances in quantum dot surface chemistry / D. A. Hines, P. V. Kamat // *ACS applied materials & interfaces*. – 2014. – Т. 6. – №. 5. – С. 3041-3057.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.009>

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И РАЗДАЧИ КОРМОВ НА СВИНОВОДЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Научная статья

Базыкин В.И.^{1,*}, Трифанов А.В.²

¹ ORCID: 0000-0001-6417-6433;

² ORCID: 0000-0002-3503-6148,

^{1,2} Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Санкт-Петербург, Россия

* Корреспондирующий автор (valentin-bazykin[at]mail.ru)

Аннотация

В статье представлена схема функционирования системы транспортировки, приготовления и раздачи кормов на свиноводческих предприятиях. На основании схемы функционирования, разработан алгоритм управления системой приготовления и раздачи кормов, который позволит оптимизировать процесс кормления свиней и производить его в полуавтоматическом режиме. Под оптимизацией режимов работы подразумевается дистанционное определение толщины шпика свиней с последующей автоматической корректировкой объема выдаваемого корма и его рецептуры в соответствии с полученными данными.

Ключевые слова: сельское хозяйство, животноводство, свиноводство, система функционирования, алгоритм управления, приготовление и раздача корма, толщина шпика.

MANAGEMENT ALGORITHM OF FEED PREPARATION AND DISTRIBUTION SYSTEM AT PIG-BREEDING ENTERPRISES

Research article

Bazykin V.I.^{1,*}, Tryfanov A.V.²

¹ ORCID: 0000-0001-6417-6433;

² ORCID: 0000-0002-3503-6148,

^{1,2} Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production, the branch of the Federal State Budget Scientific Institution, Federal Scientific Agricultural Engineering Center VIM, St. Petersburg, Russia

* Corresponding author (valentin-bazykin[at]mail.ru)

Abstract

The functioning scheme of the feed transportation, preparation and distribution system at pig-breeding enterprises is presented in the article. Based on the functioning scheme, the algorithm for managing of feed cooking and distribution system has been developed, which allows to optimize the process of pig feeding and produce it in a semi-automatic mode. Optimization of operating modes means the remote determination of the thickness of the lard of the pigs with the subsequent automatic adjustment of the volume of the feed and its formulation in accordance with the received data.

Keywords: agriculture, livestock, pig breeding, functioning system, control algorithm, feed preparation and distribution, the thickness of fat.

Комплексная механизация и автоматизация производственных процессов подготовки и раздачи кормов свиньям предполагает поточное выполнение ряда технологических операций взаимосвязанных системой машин [1, С. 24]. При поточной организации производственного процесса продукт, в результате работы предыдущей машины, является исходным материалом для последующей [2, С. 197]. В этом случае операции выполняются на рабочих местах в промежуток времени, равный или кратный ритму потока. Нарушение потока в одном из звеньев линии может привести к значительным задержкам в последующих звеньях и как следствие к увеличению затрат во всем производственном процессе [3, С. 48]. Схема функционирования системы транспортировки, приготовления и раздачи кормов на свиноводческих предприятиях представлена на рис.1.

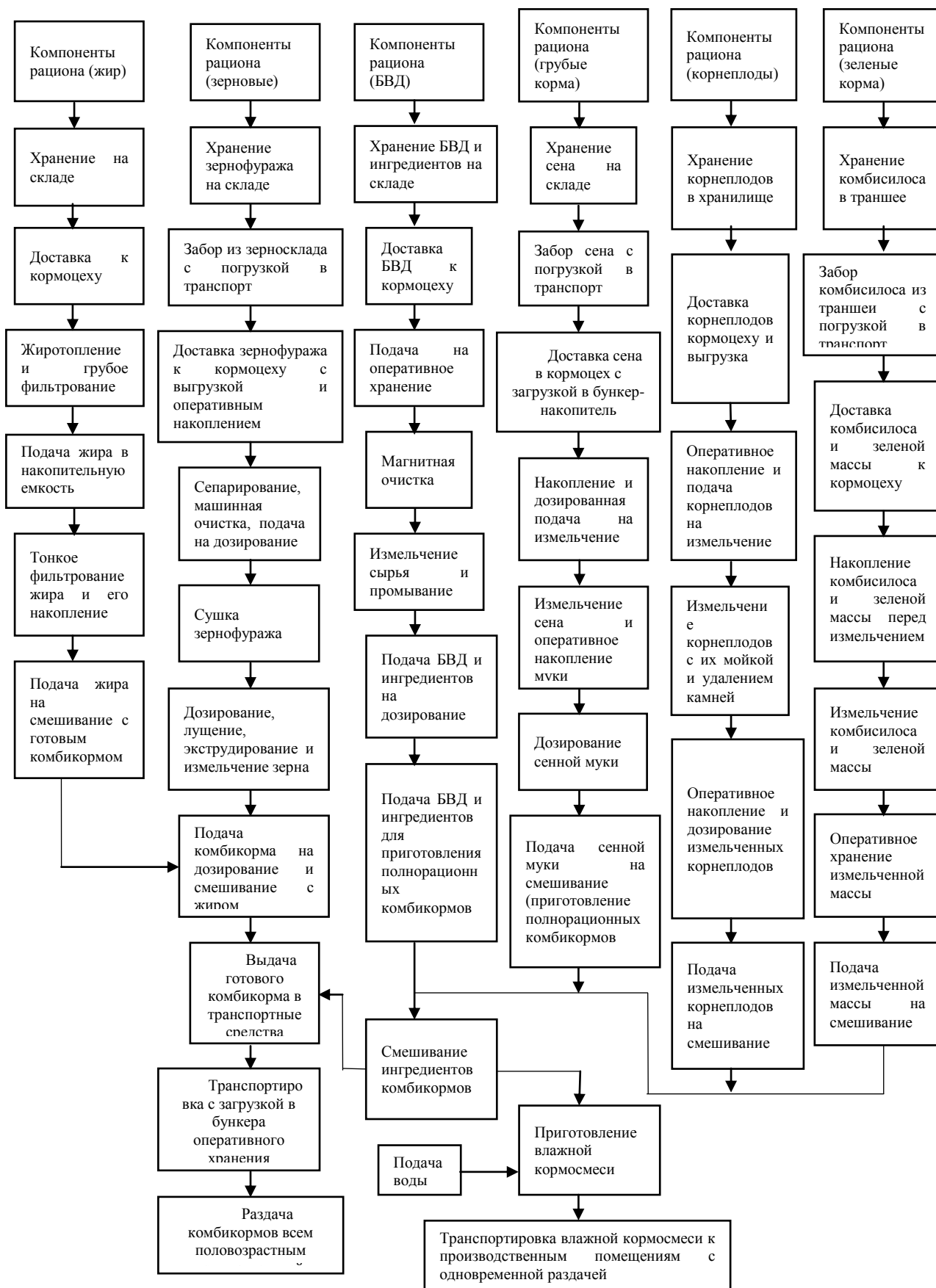


Рис. 1 – Схема функционирования системы транспортировки, приготовления и раздачи кормов на свиноводческих предприятиях

На представленной схеме указано какие технологические операции выполняются для каждого вида корма (жир, зерновые, белково-витаминные добавки, грубые корма, корнеплоды, зеленые корма) в процессе приготовления и раздачи животным готовой кормосмеси. Из основных технологических операций, применяемых к компонентам кормосмеси, можно выделить следующие: хранение и накопление компонентов; транспортировка к кормоцеху; подготовительные

операции (фильтрование, очистка, сепарирование, экструдирование, лушение, измельчение, дозирование); смешивание всех ингредиентов; приготовление кормосмеси; транспортировка и раздача кормосмеси животным.

Особо важное значение следует уделять технологическим требованиям в поточных технологических линиях. В частности, это относится к линии измельчения и дозированной подачи зеленых кормов (без предварительного накопления) на смешивание. Продолжительность измельчения и дозированной подачи не должна превышать продолжительности операции смешивания, то есть они взаимосвязаны. Для линии очистки, измельчения, дозированной выдачи, смешивания и раздачи длительность всего технологического цикла ограничена по допустимой длительности хранения самого скоропортящегося ингредиента.

Для того, чтобы технологический процесс приготовления, транспортировки и раздачи кормов на свинофермах функционировал должным образом необходима эффективная система управления.

Существующие системы управления процессом приготовления и раздачи кормов разнообразны и достаточно автоматизированы, однако они не оценивают биологическую эффективность поедания корма свиньями. В них не учитываются потери корма, которые возможны в случае выхода из строя элементов системы раздачи кормов и в результате игры свиней с кормом. В таком случае автоматизированная система делает вывод, что свиньи слишком быстро съели порцию корма и при следующем кормлении норма выдачи будет ошибочно увеличена. Это приведет к повышенному расходу корма и соответственно к увеличению себестоимости продукции.

В разрабатываемом алгоритме управления системой приготовления и раздачи кормов, авторами предлагается учесть этот аспект, путем использования технического средства для дистанционного измерения толщины шпика, которое позволит оперативно оценивать эффективность кормления. Параллельно с работой автоматизированной системы приготовления и раздачи кормов будет производиться измерение толщины шпика. Данные будут сопоставляться, и технолог будет принимать решение исходя из влияния двух факторов.

Разработанный алгоритм управления системой приготовления и раздачи кормов свиньям подразумевает выполнение ряда последовательных операций (рис.2) [4, С. 17].

Перед запуском работы системы, в автоматическом режиме проводится проверка линий связи, работоспособности датчиков и исполнительных механизмов. При положительном результате проверки систематически осуществляется контроль количества корма в кормушках с помощью датчиков уровня. В противном случае оператор получает сигнал, свидетельствующий о неисправности или некорректной работе проверяемых объектов и необходимости наладки системы.

При уровне корма в кормушках выше минимального (на котором расположены датчики уровня) система управления с определенной периодичностью продолжает опрашивать датчики уровня на предмет опорожнения кормушки.

Для этого над дном кормушки размещается прутки из нержавеющей стали с датчиком. Данный датчик проверяет наличие проводящего соединения между прутком и кормушкой. При отсутствии такого соединения датчик посылает компьютеру сигнал о том, что кормушка пуста.

При получении сигнала с датчиков об опорожнении кормушек до необходимого уровня оптимизируются режимы работы системы. Если время опорожнения кормушек от корма отклоняется от графика кормления животных, то необходимо вносить корректировки. При быстром опустошении кормушки следующая порция корма автоматически увеличивается. При медленном опорожнении кормушки, следующая порция корма автоматически сокращается.

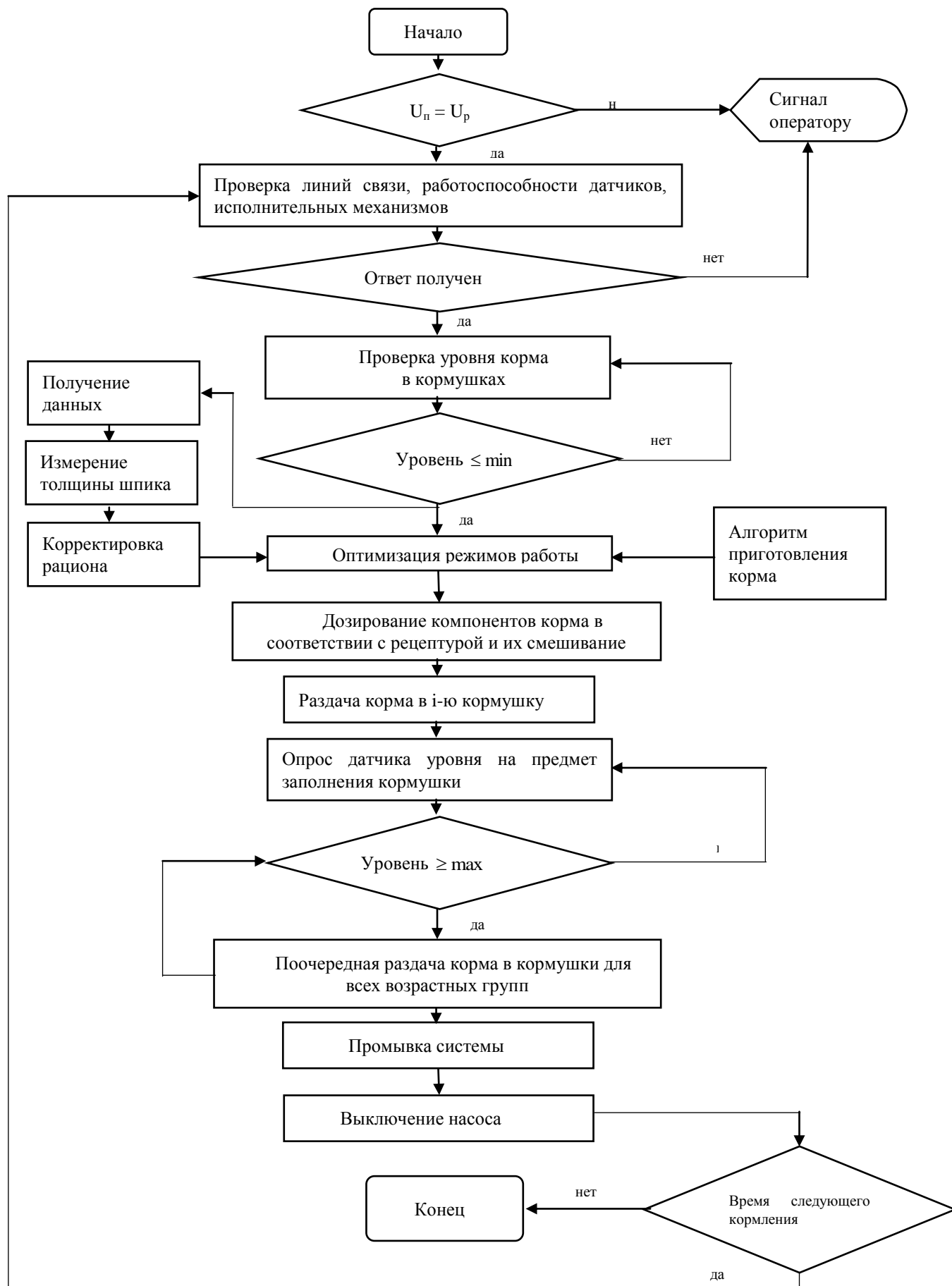


Рис. 2 – Алгоритм управления системой приготовления и раздачи кормов

Повышенный аппетит животных может указывать на их засаленность, что отрицательно скажется на расходе кормов и качестве мяса. В свою очередь, пониженный аппетит животных может свидетельствовать о необходимости оперативного ветеринарного вмешательства.

Таким образом под оптимизацией режимов работы системы подразумевается дистанционное измерение толщины шпика свиней с помощью разрабатываемого устройства, с последующей автоматической корректировкой объема выдаваемого корма и его рецептуры в соответствии с полученными данными. Описание конструкции устройства не приводится с целью защиты интеллектуальной собственности.

Затем с учетом полученных данных и внесенных корректировок, если они необходимы, осуществляется дозирование компонентов корма в соответствии с измененной рецептурой и их смешивание. По окончании смешивания осуществляется поочередная адресная транспортировка и раздача корма в кормушки изолированных секций для содержания всех половозрастных групп свиней. Подача корма осуществляется посредством кормового насоса и при помощи сжатого воздуха. В каждой кормушке установлены датчики уровня, которые сигнализируют о минимальном и максимальном уровнях корма. При срабатывании датчика верхнего уровня, подача корма в кормушку прекращается, и раздача осуществляется в следующие кормушки в соответствии с показаниями датчиков.

Промывка кормопровода осуществляется по окончании кормления. Вся установка, включая кормовые клапаны, опуски, кормовые линии, а также бак-смеситель, бак с технической водой, могут быть промыты чистой водой. При этом трубопровод остается заполненным чистой водой в перерывах между кормлениями. С началом кормления данная вода подается в бак-смеситель и используется для замеса кормовой рецептуры.

После завершения промывки, если не поступает сигнал с датчиков свидетельствующий о низком уровне корма в *i*-ой кормушке, насос выключается. В противном случае осуществляется приготовление и раздача очередной порции корма [5, С. 141].

Применение технических средств для дистанционного измерения толщины шпика возможно также при кормлении свиней сухими комбикормами. Это особенно перспективно в синтезе с применением бесстрессовых технологий воспроизводства, выращивания и откорма свиней [6, С. 142], [7, С. 83], [8, С. 104].

Оператор должен будет лишь дистанционно передать технологу предприятия информацию, полученную с помощью датчиков уровня и показания измерения толщины шпика. В свою очередь, технолог, на основании полученных данных должен внести корректировку в рецептуру корма и скорректировать норму выдачи для полноценной реализации генетического потенциала всех половозрастных групп свиней. Дистанционное определение толщины шпика свиней может быть реализовано как на малых свинофермах, так и на свинокомплексах [9, С. 197], [10, С. 207].

Выводы

1. Разработанный алгоритм позволит оптимизировать процесс кормления свиней и производить его в полуавтоматическом режиме.
2. Устройство для дистанционного измерения толщины шпика позволит оценивать биологическую эффективность поедания корма и необходимость оперативного ветеринарного вмешательства.
3. Применение предложенного алгоритма управления системой приготовления и раздачи кормов максимально снизит или исключит вероятность ошибки технолога при изменении рецептуры корма и нормы выдачи, за счет чего будут исключены возможные потери корма и снижена себестоимость производства продукции.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Трифанов А.В. Принципы функционирования предприятия по производству свинины / Трифанов А.В., Калюга В.В., Базыкин В.И. // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. - 2017. - № 4. - С. 22-27.
2. Базыкин В.И. Автоматизированное проектирование свиноводческих предприятий / Базыкин В.И., Трифанов А.В. // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. - 2015. - № 4 (20). - С. 195-199.
3. Федоренко В.Ф. Технологические процессы и оборудование, применяемые при интенсивном разведении свиней / Федоренко В.Ф., Мишуров Н.П., Кузьмина Т.Н. и др. // Научный аналитический обзор / Москва - 2016.
4. Базыкин В.И. Алгоритм построения инновационной технологии производства свинины / Базыкин В.И., Трифанов А.В. // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. - 2015. - № 3. - С. 16-20.
5. Плаксин И.Е. Совершенствование технологий производства свинины / Плаксин И.Е., Трифанов А.В., Базыкин В.И. // Инновации в сельском хозяйстве. - 2014. - № 5 (10). - С. 138-142.
6. Базыкин В.И. Малые свиноводческие фермы с бесстрессовым способом содержания свиней / Базыкин В.И., Трифанов А.В. // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. - 2016. - № 89. - С. 137-146.
7. Калюга В.В. Модернизированная технология воспроизводства, выращивания и откорма свиней с элементами бесстрессового содержания для средних по мощности свиноферм / Калюга В.В., Базыкин В.И., Тихонов Е.А. // Resources and Technology. - 2015. - Т. 12. - № 2. - С. 77-88.
8. Калюга В.В. Результаты исследования пятифазной бесстрессовой технологии воспроизводства, выращивания и откорма свиней / Калюга В.В., Базыкин В.И. // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. - 2014. - № 85. - С. 100-108.
9. Калюга В.В. Сравнение двухфазного и трехфазного бесстрессовых способов содержания свиней на стадии концептуального проектирования малых свиноферм / Калюга В.В., Базыкин В.И., Трифанов А.В. // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. - 2018. - № 2 (95). - С. 188-198.
10. Калюга В.В. Сравнение четырехфазного и пятифазного бесстрессовых способов содержания свиней на стадии концептуального проектирования малых свиноферм / Калюга В.В., Базыкин В.И., Трифанов А.В. // Технологии и

технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. - 2018. - № 2 (95). - С. 198-208.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Trifanov A.V. Principy funkcionirovaniya predpriyatiya po proizvodstvu svininy [Principles of the functioning of the pork production enterprise] / Trifanov A.V., Kalyuga V.V., Bazykin V.I. // Izvestiya Velikolukskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii [Proceedings of the Velikie Luki State Agricultural Academy]. - 2017. - № 4. - P. 22-27. [in Russian]
2. Bazykin V.I. Avtomatizirovannoe proektirovanie svinovodcheskih predpriyatij [Automated design of pig-breeding enterprises] / Bazykin V.I., Trifanov A.V. // Vestnik Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizacii zhivotnovodstva [Bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Mechanization of Animal Husbandry]. - No. 4 (20). - P. 195-199. [in Russian]
3. Fedorenko V.F. Tekhnologicheskie processy i oborudovanie, primenyaemye pri intensivnom razvedenii svinej [Technological processes and equipment used for intensive breeding of pigs] / Fedorenko V.F., Mishurov N.P., Kuzmina T.N. and others // Nauchnyj analiticheskij obzor [Scientific Analytical Review] / Moscow, - 2016. [in Russian]
4. Bazykin V.I. Algoritm postroeniya innovacionnoj tekhnologii proizvodstva svininy [Algorithm for constructing innovative technology for pork production] / Bazykin V.I., Trifanov A.V. // Izvestiya Velikolukskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii [Proceedings of the Velikie Luki State Agricultural Academy]. - 2015. - № 3. - P. 16-20. [in Russian]
5. Plaksin I.E. Sovershenstvovanie tekhnologij proizvodstva svininy [Perfection of pork production technologies] / Plaksin I.E., Trifanov A.V., Bazykin V.I. // Innovacii v sel'skom hozyajstve [Innovations in agriculture]. - 2014. - No. 5 (10). - P. 138-142. [in Russian]
6. Bazykin V.I. Malye svinovodcheskie fermy s besstressovym sposobom soderzhaniya svinej [Small pig-breeding farms with a stress-free method of keeping pigs] / Bazykin V.I., Trifanov A.V. // Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkci rastenievodstva i zhivotnovodstva [Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products]. - 2016. - No. 89. - P. 137-146. [in Russian]
7. Kalyuga V.V. Modernizirovannaya tekhnologiya vosproizvodstva, vyrashchivaniya i otkorma svinej s ehlementami besstressovogo soderzhaniya dlya srednih po moshchnosti svinoferm [Modernized technology for the reproduction, rearing and fattening of pigs with elements of stress-free content for medium-sized pig farms] / Kalyuga V.V., Bazykin V.I., Tikhonov E.A. // Resources and Technology. - 2015. - T. 12. № 2. - P. 77-88. [in Russian]
8. Kalyuga V.V. Rezul'taty issledovaniya pyatifaznoj besstressovoj tekhnologii vosproizvodstva, vyrashchivaniya i otkorma svinej [Results of research of five-phase, stress-free technology of reproduction, rearing and fattening of pigs] / Kalyuga V.V., Bazykin V.I. // Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkci rastenievodstva i zhivotnovodstva [Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products]. - 2014. - No. 85. - P. 100-108. [in Russian]
9. Kalyuga V.V. Sravnenie dvuhfaznogo i trekhfaznogo besstressovyh sposobov soderzhaniya svinej na stadii konceptual'nogo proektirovaniya malyh svinoferm [Comparison of two-phase and three-phase stress-free ways of keeping pigs at the stage of conceptual design of small pig farms] / Kalyuga V.V., Bazykin V.I., Trifanov A.V. // Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkci rastenievodstva i zhivotnovodstva [Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products]. - 2018. - № 2 (95). - P. 188-198. [in Russian]
10. Kalyuga V.V. Sravnenie chetyrehfaznogo i pyatifaznogo besstressovyh sposobov soderzhaniya svinej na stadii konceptual'nogo proektirovaniya malyh svinoferm [Comparison of four-phase and five-phase stress-free ways of keeping pigs at the stage of conceptual design of small pig farms] / Kalyuga V.V., Bazykin V.I., Trifanov A.V. // Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkci rastenievodstva i zhivotnovodstva [Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products]. - 2018. - № 2 (95). - P. 198-208. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.010>**НЕОБХОДИМОСТЬ АВТОМАТИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ НА ПРОИЗВОДСТВЕ**

Научная статья

Корастылева А.В.*

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

* Корреспондирующий автор (jullisseja[at]mail.ru)

Аннотация

Основные задачи любого руководителя предприятия – стать конкурентоспособной компанией, быть лидером на рынке, создать и внедрить работающую структуру управления, обеспечить высокую эффективность работы персонала. Каждый отдел предприятия нуждается в абсолютной организации, которая обеспечивает предоставление актуальной и всесторонней информации, для управления процессами на производстве. Следовательно, предприятие нуждается во внедрении программ в процессы управления, обеспечивающих повышение скорости обработки и достоверности информации, документации и данных для принятия решений. Однако сегодня еще далеко не все организации автоматизировали выполнения производственных задач, связанных со спецификой их деятельности. Наличие этих и других вопросов обуславливает актуальность темы исследования.

Ключевые слова: информация, информационный поток, автоматизация производства, экономическая эффективность.

NECESSITY OF INFORMATION FLOWS AUTOMATION IN THE WORKPLACE

Research article

Korastyleva A. V.*

Moscow State Technological University “STANKIN”

* Corresponding author (jullisseja[at]mail.ru)

Abstract

The main tasks for any manager of an enterprise include: making the company competitive, being the market leader, creating and implementing an operational management structure, ensuring high efficiency of staff. Each department of the enterprise requires good organization, which ensures the provision of up-to-date and comprehensive information for the management of production processes. Consequently, the enterprise needs to implement programs in the management processes that ensure the speed of processing and the reliability of information, documentation, and data for decision-making. However, today, not all organizations have automated the performance of production tasks related to the specifics of their activities. The presence of these and other issues determines the relevance of the research topic.

Keywords: information, information flow, production automation, economic efficiency.

Сегодня главе организации необходимо непрерывно контролировать и регулировать все стороны производственной деятельности, находясь в обстановке рискованности и неопределенности. Для ведения такой деятельности приходится оперировать большими объемами документов, в которых содержится информация различных видов и аспектов. Правильно собранная, систематизированная и классифицированная производственная информация является залогом эффективности управления организацией. К ошибочному управленческому решению и, таким образом к большим убыткам организации может привести к дефициту правдивых и достоверных данных. Без релевантной, точной, оперативной информации и ее анализа система управления не будет работать. [2, С. 133]. Система расчетно-аналитического обеспечения управления организацией играет важную роль в правильной работе структуры управления самим производством, обеспечивая взаимодействие различных структурных подразделений и отвечает «действием» на изменения его внутренней и внешней среды [1, С. 2].

Информационная структура – это большая система управления производственным процессом, которая напрямую влияет на получение и сохранение информации, так же на способ обмена документами и информацией в ходе управления организацией. Состоит из комплекса средств и методов, направленных на управление информацией: создание, сбор, обработка, трансфер, хранение. Информационная структура начинает свое эволюцию и работу еще при создании организации, так как на всех стадиях ее развития необходимо управление. Цель информационной структуры заключается в производстве необходимой для предприятия информации, которая будет использоваться в целях эффективного управления всеми ресурсами организации, а также для создания информационной и технической среды [5, С. 341].

Сейчас информационные структуры управления организацией используются с применением ЭВМ, что обуславливается экономической необходимостью. Каждая информационная структура, предназначенная для управления процессами на производстве должна решать следующие задачи:

1. оценка ситуации;
2. документирование и описание процесса (ситуации);
3. принятие решения [3, С. 41].

Информационная автоматизированная структура управления организацией состоит из совокупности взаимосвязанных данных, программного обеспечения, оснащения (оборудование), штат служащих, стандартных процедур. Все они служат в целях получения, анализа, обработки, распространения, распределения, хранения, передачи данных по требованию и реализуют задачи организации [4, С. 99].

На сегодняшний день каждая информационная структура управления организации должна применять современные технологические инновации, разнообразие которых с каждым годом растет. Так же, исходя из функциональной цели выделяют такие системы:

- управляющие;
- диагностические;
- проектирующие;
- моделирующие;
- системы по подготовке принятия решения [6, С. 287].

Основными факторами, влияющими на процесс внедрения систем управления производством, выступают потребности предприятий и пользователей, а также наличие соответствующих средств по их формированию. Причины, которые побудили производственные предприятия внедрить информационную систему, с одной стороны, вызваны стремлением к увеличению производительности повседневных работ или избежания их повторного проведения, а с другой - желанием повышения эффективности управления производственной деятельностью предприятия. Первая причина является довольно прозрачной и для ее реализации всего лишь достаточно осуществить внедрение стандартизированных систем по обработке производственной информации.

Основными направлениями по автоматизации производственной деятельности предприятия являются: автоматизация обработки технической документации с внедрением системы по обработке текста и автоматизация обмена производственной информацией посредством различных видов коммуникаций [7, С. 178].

Организации в условиях современного развития технологий зачастую используют высокоэффективные информационные структуры управления предприятием, работающие на основе применения передовых технологий по управлению информацией, например, применение единой внутренней (локальной) компьютерной сети. Информация в организации, в особенности ее полная автоматизированная обработка, так же остается главной причиной для увеличения эффективности деятельности любой производственной организации. Для эффективного использования производственной информации важны:

- методы накопления, запись, обработка и передача;
- систематизированное хранение информации и ее передача в нужной форме;
- получение новой числовой, графической и прочей информации.

Эффективность применения информационных структур управления производством повышает сквозная структура и совместимость информационных систем, которые способны устранять дублирование и обеспечивают многократное использование информации, формируют интеграционные связи, ограничивают количество показателей, снижают размер информационных потоков, повышают уровень использования производственной информации. Информационная система в производстве должна поддерживать такие функции, как предоставление информации и формирование благоприятных условий для ее распространения [8, С. 127].

Современная информационная производственная структура должна позволить гарантировать решение таких задач:

- направленное и точное получение доступа к информационному продукту;
- действенного распределения всей деятельности предприятия и незамедлительного распространения производственных данных;
- предоставление необходимого времени для получения работниками всех уровней информации в полном объеме по важнейшим видам деятельности на предприятии, таким как результат контроля, анализа и решениям полученных при устранении деятельности не влияющих на положительный результат;
- внедрение на предприятие более качественных и технологически усовершенствованных систем для анализа, контроля и разработка оперативного управления всеми отделами и связями в организации [9, С. 33].

Сложное состояние с внедрением информационных структур в производство на предприятиях в нашей стране обусловлено следующими причинами:

- тяжелым экономическим положением, отсутствие достаточных средств на их разработку;
- плохим финансированием, которое не может способствовать первичным отечественным разработкам;
- применением устаревших ИС, что в основном показывало их неэффективность.

В итоге, совершенствование информационных структур управления производствами повысит эффективность с наименьшими затратами. И главное, информационная структура управления должна быть способна в полном объеме обеспечивать и поддерживать информационные потоки и процессов управления организацией, а так же остальные процессы, направленные на поддержание специализированной работы: маркетинговой, финансовой, инженерной, управление кадрами, производство, инжиниринг, бухгалтерия, внешние информационные связи и отношения.

Основной и важнейшей задачей по разработке информационных структур и систем управления является предоставление полного комплексного направленного автоматизированного осуществления проектных, числовых и контрольно информационных работ, формирующиеся в функциональные и организационные структуры организации. [1, С. 13].

Выводы

Цель автоматизации информационных потоков складывается из увеличения показателей и результатов финансовой хозяйственной деятельности организации в связи с получением своевременной и качественной информации, направленная на принятие верного и точного управленческого решения. На сегодняшний день при уровне и развитии современных технологий связанных с информационными потоками и управлением для предприятий перспективно внедрять в свою деятельность вычислительную технику и информационные системы нового поколения, которые обеспечивают точную и обширную обработку данных с автоматизированных рабочих мест, локальных сетей и профессиональных структур поддержки для принятия решения.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Али-Заде А. А. Научный менеджмент - стратегический фактор инновационного развития: моногр. / А.А. Али-Заде, В.Н. Логин. - М.: ИНИОН РАН, 2017.
2. Андрейчиков А. В. Системный анализ и синтез стратегических решений в инноватике. Основы стратегического инновационного менеджмента и маркетинга / А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. - М.: Libroком, 2017.
3. Велеско Е. И. Стратегический менеджмент / Е.И. Велеско, А.А. Неправский. - М.: БГЭУ, 2016.
4. Исаев Д. В. Корпоративное управление и стратегический менеджмент. Информационный аспект / Д.В. Исаев. - М.: Высшая Школа Экономики (Государственный Университет), 2016.
5. Панов А. И. Стратегический менеджмент / А.И. Панов, И.О. Коробейников. - М.: Юнити-Дана, 2016.
6. Пашенцев Е. Н. Коммуникационный менеджмент и стратегическая коммуникация. Современные технологии глобального влияния и управления / Е.Н. Пашенцев. - М.: Международный центр социально-политических исследований и консалтинга, Сам Полиграфист, 2016.
7. Попов С. А. Концепция актуального стратегического менеджмента для современных российских компаний / С.А. Попов. - М.: Юрайт, 2016.
8. Харченко В. Л. Стратегический менеджмент / В.Л. Харченко. - М.: Московская Финансово-Промышленная Академия, 2016.
9. Ходкинсон Джерард Компетентная организация. Психологический анализ стратегического менеджмента / Джерард Ходкинсон, Пол Сперроу. - М.: Гуманитарный центр, 2016.
10. Шифрин М. Б. Стратегический менеджмент / М.Б. Шифрин. - М.: Питер, 2017.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ali-Zadeh A. A. Nauchnyi menedzhment - strategicheskii faktor innovatsionnogo razvitiya: monogr. [Scientific Management - Strategic Factor of Innovative Development: Thesis Abstract] / A.A. Ali-Zadeh, V.N. Login. - M.: INION RAS, 2017. [in Russian]
2. Andreichikov A. V. Sistemnyi analiz i sintez strategicheskikh reshenii v innovatike. Osnovy strategicheskogo innovatsionnogo menedzhmenta i marketinga [System Analysis and Synthesis of Strategic Solutions in Innovation. Fundamentals of Strategic Innovation Management and Marketing] / A.V. Andreichikov, O.N. Andreichikova. - M.: Librocom, 2017. [in Russian]
3. Velesko E. I. Strategicheskii menedzhment [Strategic Management] / E.I. Velesko, A.A. Nepravsiy. - M.: BSEU, 2016. [in Russian]
4. Isaev D. V. Korporativnoe upravlenie i strategicheskii menedzhment. Informatsionnyi aspekt [Corporate Governance and Strategic Management. Informational Aspect] / D.V. Isaev. - M.: Higher School of Economics (State University), 2016. [in Russian]
5. Panov A. I. Strategicheskii menedzhment [Strategic Management] / A.I. Panov, I.O. Korobeinikov. - M.: Unity-Dana, 2016. [in Russian]
6. Pashentsev E. N. Kommunikatsionnyi menedzhment i strategicheskaya kommunikatsiya. Sovremennye tekhnologii globalnogo vliyaniya i upravleniya [Communication Management and Strategic Communication. Modern Technologies of Global Influence and Management] / E.N. Pashentsev. - M.: International Center for Socio-Political Research and Consulting, Sam Poligrafist, 2016. [in Russian]
7. Popov S. A. Kontseptsiya aktualnogo strategicheskogo menedzhmenta dlia sovremennykh rossiiskikh kompanii [Concept of Topical Strategic Management for Modern Russian Companies] / S.A. Popov. - M.: Yurayt, 2016. [in Russian]
8. Kharchenko V. L. Strategicheskii menedzhment [Strategic Management] / V.L. Kharchenko. - M.: Moscow Financial-Industrial Academy, 2016. [in Russian]
9. Hodkinson Dzherard Kompetentnaya organizatsiya. Psikhologicheskii analiz strategicheskogo menedzhmenta [Competent Organization. Psychological Analysis of Strategic Management] / Gerard Hodkinson, Paul Sparrow. - M.: Humanitarian Center, 2016. [in Russian]
10. Shifrin M. B. Strategicheskii menedzhment [Strategic Management] / M.B. Shifrin. - M.: Piter, 2017. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.011>

DATA MINING ПОДХОД К ВОПРОСУ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Научная статья

Овечкин М.В.*

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

* Корреспондирующий автор (maxov-1[at]mail.ru)

Аннотация

В статье описан анализ эффективности методов автоматизированного неразрушающего контроля в рамках задачи кластеризации данных по применению коротковолнового электромагнитного излучения при дефектоскопии. Методы исследования: самоорганизующиеся карты Кохонена в рамках Data Mining подхода. Актуальность работы заключается в том, что в связи с повышением требования к качеству и надежности выпускаемых изделий все большее значение приобретают физические методы автоматизированного контроля металлов и изделий из них, не требующие вырезки образцов или разрушения готовых изделий. Автор отметил общие черты методов коротковолнового электромагнитного контроля изделий. В статье обоснована эффективность подхода Data Mining к подходу построения гипотезы о взаимосвязях групп данных по неразрушающему контролю изделий. В качестве инструмента выбран метод самоорганизующихся карт Кохонена. Приведен пример части обучающих данных и параметры настройки нейронной сети, выполняющей задачу визуализации и кластеризации. Изображены полученные в результате обработки сети матрица расстояний и карта кластеров, приведены дальнейшие направления исследований, заключающиеся в разработке методов компьютерной обработки изображений в рамках автоматизированных систем неразрушающего контроля.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, электромагнитное излучение, Кохонен.

DATA MINING APPROACH TO EFFECTIVENESS ANALYSIS ISSUE OF AUTOMATED NON-DESTRUCTIVE CONTROL METHODS

Research article

Ovechkin M.V.*

Orenburg State University, Orenburg, Russia

* Corresponding author (maxov-1[at]mail.ru)

Abstract

The article describes the analysis of the effectiveness of automated non-destructive testing methods within the framework of the problem of clustering data on the application of short-wave electromagnetic radiation in flaw detection. Research methods are as follows: Kohonen self-organizing maps within the Data Mining approach. The relevance of the work lies in the fact that in connection with increasing requirement for quality and reliability of manufactured products, physical methods of automated control of metals and products from them, which do not require cutting out samples or destroying finished products, become increasingly important. The author noted the general features of the methods of short-wave electromagnetic control of products. The article substantiates the effectiveness of the Data Mining approach to the approach of constructing a hypothesis on the interrelationships of data groups for non-destructive testing of products. As a tool, the method of self-organizing Kohonen maps was chosen. An example of a part of training data and neural network configuration parameters performing the task of visualization and clustering is given. The resulting matrix of distances and a map of clusters are shown, further directions of research are presented, which consist in the development of methods for computer image processing within the framework of automated nondestructive testing systems.

Keywords: non-destructive testing, electromagnetic radiation, Kohonen.

В связи с повышением требования к качеству и надежности выпускаемых изделий все большее значение приобретают физические методы автоматизированного контроля металлов и изделий из них, не требующие вырезки образцов или разрушения готовых изделий.

Таким образом, системы управления технологическими процессами по результатам диагностики технических объектов широко распространены в различных областях промышленности. В частности, к ним относятся системы оптического контроля и диагностики сварных соединений, а также неразрушающего контроля (НК) и диагностики деталей и конструкций [1]. Применение НК обеспечивает необходимый фактический запас прочности и надежности машин и механизмов при одновременном снижении количества материалов и массы. НК позволяет перейти к полной автоматизации производства, освободить контролеров от утомительной и однообразной работы [2].

Согласно исследованиям российского ученого Н.П. Алешина [3], составлена оценка выявляемости дефектов различными видами НК (рис. 1). На основании исследований, можно сделать вывод, что, лидерами по эффективности являются следующие методы: акустический, радиационный, оптический и вихретоковый.

Оценка эффективности дефектоскопии неразрушающими методами контроля

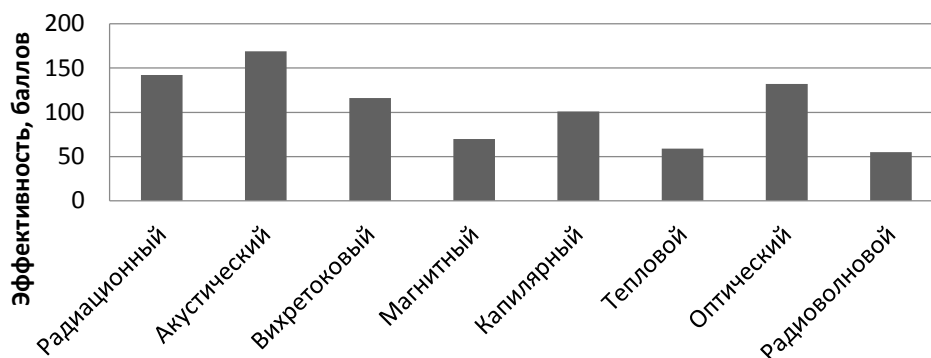


Рис. 1 – Диаграмма оценки эффективности дефектоскопии неразрушающими методами контроля (по результатам исследования Н.П. Алешина[2])

Известно, что значение энергии на спектрограмма электромагнитного излучения возрастает с увеличением частоты волны [4], вследствие чего, к коротковолновым методам, помимо электромагнитного и радиационного, можно отнести капиллярный (при использовании ультрафиолетового просвечивания), поскольку все эти методы имеют общую природу как механизма контроля, так и принципов анализ полученных результатов.

Проанализируем актуальность методов при помощи самоорганизующихся карт Кохонена. Данная технология относится к области анализа Data Mining. Традиционные методы анализа данных (статистические методы) и OLAP в основном ориентированы на проверку заранее сформулированных гипотез (verification-driven data mining) и на «грубый», разведочный анализ, составляющий основу оперативной аналитической обработки данных (OnLine Analytical Processing, OLAP), в то время как одно из основных положений Data Mining - поиск неочевидных закономерностей. Инструменты Data Mining могут находить такие закономерности самостоятельно и также самостоятельно строить гипотезы о взаимосвязях. Поскольку именно формулировка гипотезы относительно зависимостей является самой сложной задачей, преимущество Data Mining по сравнению с другими методами анализа является очевидным. Большинство статистических методов для выявления взаимосвязей в данных используют концепцию усреднения по выборке, приводящую к операциям над несуществующими величинами, тогда как Data Mining оперирует реальными значениями [5].

Самоорганизующаяся карта Кохонена (англ. Self-organizing map — SOM) — нейронная сеть с обучением без учителя, выполняющая задачу визуализации и кластеризации. Идея сети предложена финским учёным Т. Кохоненом [7]. Является методом проецирования многомерного пространства в пространство с более низкой размерностью (чаще всего, двумерное), применяется также для решения задач моделирования, прогнозирования, выявления наборов независимых признаков, поиска закономерностей в больших массивах данных, разработке компьютерных игр, квантизации цветов к их ограниченному числу индексов в цветовой палитре: при печати на принтере и ранее на ПК или же на приставках с дисплеем с пониженным числом цветов, для архиваторов (общего назначения) или видео-кодеков. Является одной из версий нейронных сетей Кохонена [6]. Общая схема работы сети представлена на рисунке 2 [8]. Для анализа данных и построения SOM использована программа Deductor Academic.

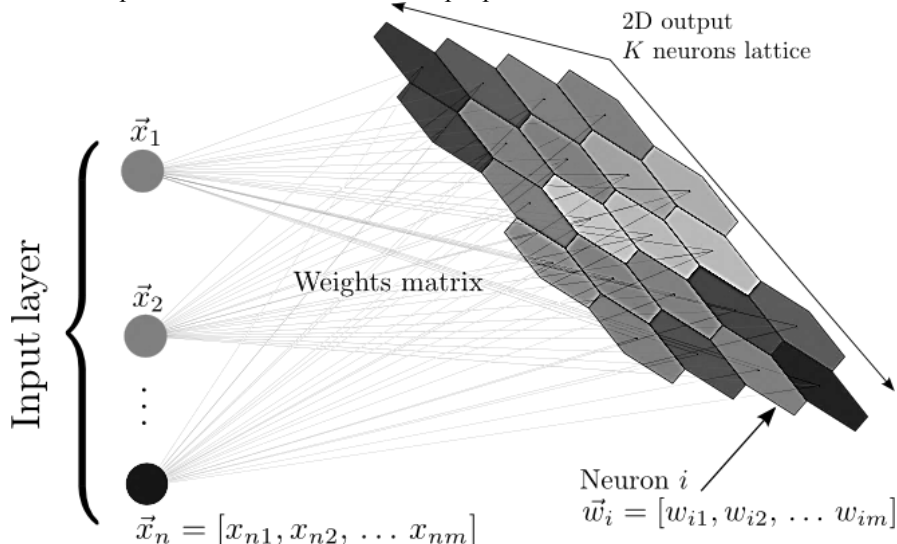


Рис. 2 – Общая схема работы сети Кохонена

В наборе данных Input Layer участвовали данные по оценке эффективности методов контроля, рынку продукции дефектоскопов и рынку предложения услуг по неразрушающему контролю: Input Layer = [Метод (X1), Предложение по оборудованию (X2), Предложение по услугам (X3), Бальная эффективность (X4)]

Группа входных значений по бальной эффективности представлены на основании свертки данных из таблицы 1.

Таблица 1 – Данные для входных значений по бальной эффективности

Объект контроля	Вид НМК						
	Электро-магнитный (радиационный, оптический)	Капилляр-ный	Токовых-ревой	Магнит-ный	Акустичес-кий	Тепловой	Радиоволно-вой
Неферромагнитные материалы							
Проволока, в диапазоне диаметром							
1-14 мм	4	0	5	0	5	0	0
0,01-1 мм	4	0	5	0	5	3	0
Прутки, в диапазоне диаметром							
156-1000 мм	5	0	5	0	5	0	0
30-100 мм	5	0	5	0	5	0	0
3-40 мм	5	0	5	0	5	0	0
Листы, плиты толщиной							
4-10 и более мм	5	4	5	0	5	0	0
0,1-3,9 мм	5	4	5	0	5	0	0
0,1-1 мм	4	4	5	0	5	3	3
Сортовой прокат	5	4	4	0	5	0	0
Отливки	5	5	0	0	4	3	0
Сварные соединения	3	4	3	3	5	3	0
Клеевые соединения	4	4	0	0	5	4	5
Паяные соединения	3	3	3	0	5	3	0
Резьбовые соединения	0	4	3	5	0	0	0
Ферромагнитные материалы							
Проволока	4	0	5	5	5	3	0
Прутки с диаметром в диапазоне							
30-10 мм	5	0	5	5	5	0	0
3-4 мм	5	0	5	5	5	0	0
Трубы сварные с диаметром в диапазоне							
150-1000 мм	4	4	5	5	5	0	0
50-150 мм	4	4	5	5	5	0	0
30-40 мм	4	4	5	5	5	0	0
Листы, плиты толщиной							
4-10 и более мм	4	4	4	4	5	0	0
0,1-3,9 мм	4	4	5	5	5	0	0
0,1-1 мм	4	4	5	5	5	3	3
Сортовой прокат	4	4	3	3	5	0	0
Отливки	4	4	3	3	4	0	0
Суммарная оценка	103	68	103	58	118	25	6

Оценка проведена в виде системы: «5» - «отлично», «4» - хорошо, «3» - удовлетворительно, «1» - «не используется».

Группа входных значений по бальной эффективности представлены на основании свертки значений по бальной эффективности применения методов.

Разделение множества между обучающим и тестовым - 95 и 5% . Группам кластеров назначена равноценная значимость.

В качестве входной сети была произведена кластеризация на 6 регионов по следующим группам методов неразрушающего контроля (рисунок 3). Изображены кластеры (слева направо): ультразвуковой контроль; тепловизионный контроль; магнитопорошковый контроль; методы коротковолнового электромагнитного контроля; вихрековые методы; визуальный контроль.

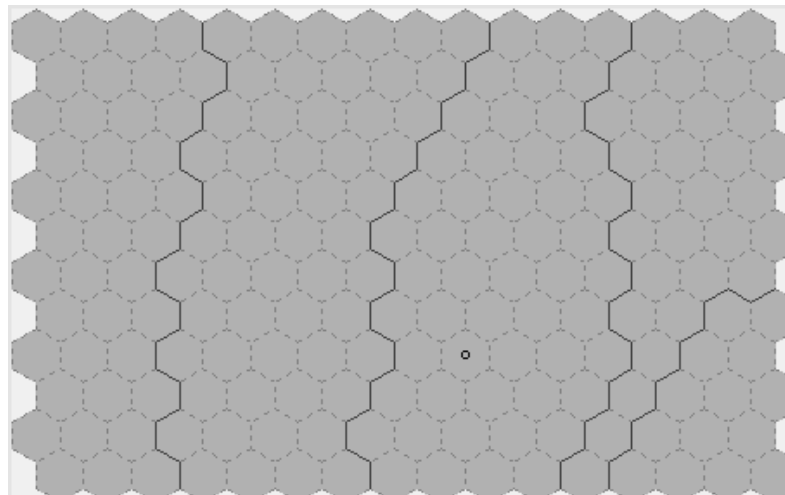


Рис. 3 – Кластеризация входных данных по группам методов неразрушающего контроля

Входные данные по рынкам товаров и услуг объединены в следующие кластеры (рис. 4):

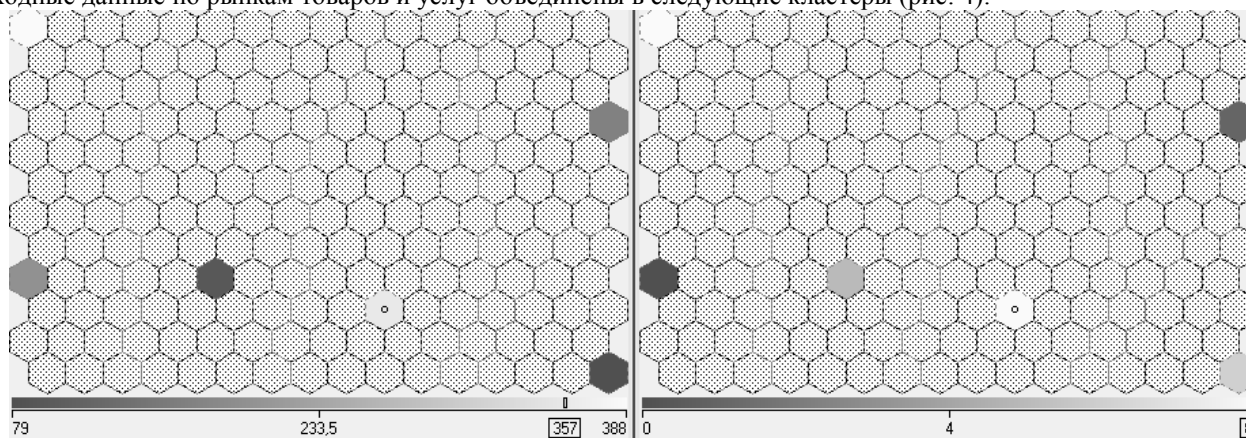


Рис. 4 – Кластеризация данных по рынкам товаров и услуг НК. Слева - предложения по оборудованию; справа - предложения по услугам.

Полученная в результате обработки сети матрица расстояний[9], содержащая в качестве элементов расстояния между объектами в метрическом пространстве и карта кластеров (по 6 сегментам) представлены на рисунке 5:

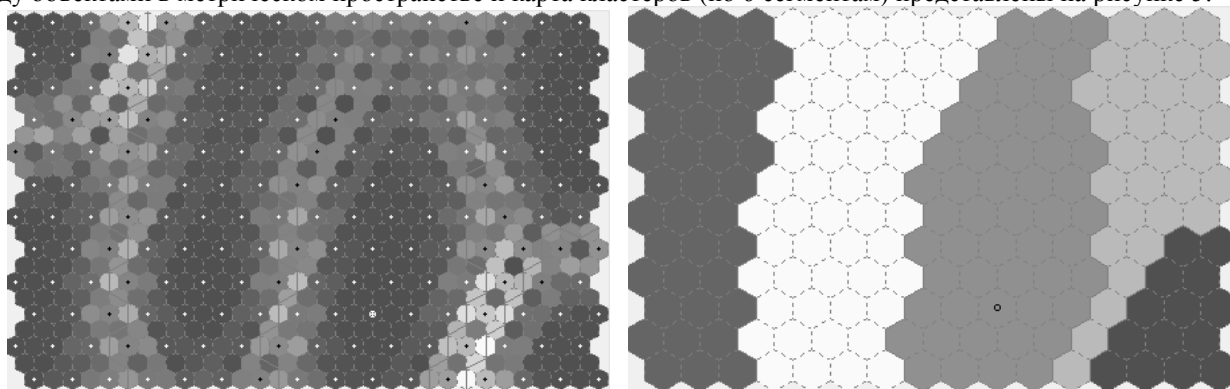


Рис. 5 – Результаты обработки входных данных. Слева - матрица расстояний; справа - карта кластеров

В результате кластерного анализа сформирована следующая диаграмма (рис. 6):

Результат кластерного анализа

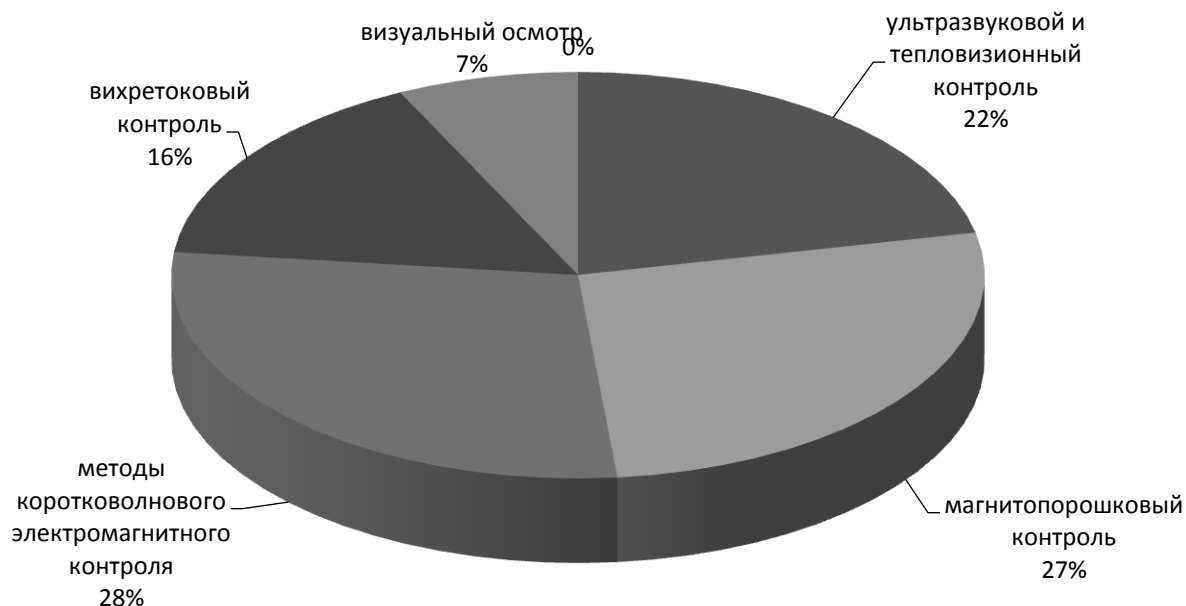


Рис. 6 – Диаграмма результатов кластерного анализа

Таким образом, можно сделать вывод о лидерстве именно электромагнитных методов для автоматизированного контроля сложных изделий на производстве. Основным недостатком метода электромагнитного контроля является то, что рассеянное излучение в зависимости от энергии первичного излучения изменяет качество визуального результата контроля, снижает контрастность и четкость изображения [10], а, следовательно, и чувствительность самого метода; вследствие этого явления дефекты малого размера тяжело различить без применения средств автоматизации.

Дальнейшие направления исследований заключаются в том, что применение коротковолновых электромагнитных методов неразрушающего дефектоскопии базируется на методах обработки и распознавания изображений, полученных в результате проведения технологического процесса контроля. Это делает актуальным разработку методов компьютерной обработки изображений в рамках автоматизированных систем неразрушающего контроля.

Финансирование

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при государственной финансовой поддержке проекта по гранту президента № МК – 5451.2018.8.

Funding

The article is based on the results of work carried out with the state financial support of the project under the President's Grant No. MK-5451.2018.8.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Овечкин М. В. Автоматизация управления обслуживающими аппаратами на основе распознавания графических данных / М. В. Овечкин, Н. З. Султанов, Е. В. Костина // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2015. – № 2. – С. 65–69.
2. Проскурин Д. А. Получение идентификационных моделей дефектов поверхности прямошовных сварных труб / Д. А. Проскурин // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии» – Оренбург: ИП Осиночкин Я. В., 2011. – С. 263–271.
3. Алешин Н.П. Радиационная и магнитная дефектоскопия металлоизделий / Н.П. Алешин, В.Г. Щербинский // М.: Высшая школа. – 1991. – 271 с.
4. Electromagnetic Radiation and Radio Waves [Электронный ресурс] URL: <http://www.mpoweruk.com/radio.htm> (дата обращения: 14.08.2018).
5. Чубукова И.А. Data Mining / И.А. Чубукова – М: Бином, – 2008. – 324 с.
6. Kohonen T. Self-Organizing Maps (Third Extended Edition) / T. Kohonen. – New York, 2001. – 501 p.
7. Самоорганизующаяся карта Кохонена – Википедия [Электронный ресурс] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Самоорганизующаяся_карта_Кохонена (дата обращения: 14.08.2018).
8. SOMz: Self Organizing Maps and random atlas [Электронный ресурс] URL: <http://matias-ck.com/mlz/somz.html> (дата обращения: 14.08.2018).
9. Kohonen, T. Self-Organizing Maps (Third Extended Edition) / T. Kohonen. – New York, 2001. – 501 p.

10. Chen, C.H. Handbook of pattern recognition and computer vision / C.H. Chen, L.F. Rau // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1995. - 984 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ovechkin M. V. Avtomatizaciya upravleniya obsluzhivayushchimi apparatami na osnove raspoznavaniya graficheskikh dannyh [Automation of control of service devices on the basis of recognition of graphic data] / M. V. Ovechkin, N. Z. Sultanov, E. V. Kostina // Intellect. Innovacii. Investicii [Intelligence. Innovations. Investment.]. – 2015. – № 2. – P. 65–69. [in Russian]
2. Proskurin D. A. Poluchenie identifikacionnyh modelej defektov poverhnosti pryamoshovnyh svarnyh trub [Obtaining identification models of surface defects of straight-seam welded pipes] / D. A. Proskurin // Materialy V Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Komp'yuternaya integraciya proizvodstva i IPI-tehnologii» [Materials of the V all-Russian scientific-practical conference «Computer integration of production and IPI-technologies»] – Orenburg: IP Osinochkin YA. V., 2011. – P. 263–271 [in Russian]
3. Aleshin N. P. Radiacionnaya i magnitnaya defektoskopiya metalloizdelij [Radiacionnaya i magnitnaya defektoskopiya metalloizdelij] / N. P. Aleshin, V. G. SHCHerbinskij // M.: Vysshaya shkola. – 1991. – 271 p. [in Russian]
4. Electromagnetic Radiation and Radio Waves [Electronic resource] URL: <http://www.mpoweruk.com/radio.htm> (accessed: 14.08.2018).
5. CHubukova I.A. Data Mining / I.A. CHubukova – M: Binom, – 2008. – 324 p. [in Russian]
6. Kohonen T. Self-Organizing Maps (Third Extended Edition) / T. Kohonen. – New York, 2001. – 501 p.
7. Самоорганизующаяся карта Кохонена – Википедия [Self-organizing Kohonen map - Wikipedia] [Electronic resource] URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Самоорганизующаяся_карта_Кохонена (accessed: 14.08.2018). [in Russian]
8. SOMz: Self Organizing Maps and random atlas [Electronic resource] URL: <http://matias-ck.com/mlz/somz.html> (accessed: 14.08.2018).
9. Kohonen, T. Self-Organizing Maps (Third Extended Edition) / T. Kohonen. – New York, 2001. – 501 p.
10. Chen, C.H. Handbook of pattern recognition and computer vision / C.H. Chen, L.F. Rau ; World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1995. - 984 с.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.012>

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИСТЕМЫ «IWIZARD-E»

Научная статья

Пальмов С.В.^{1,*}, Мифтахова А.А.²

^{1,2} Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, Россия

* Корреспондирующий автор (psv[at]psuti.ru)

Аннотация

Исследованы прогностические возможности «iWizard-E» – интеллектуальной системы поддержки принятия решений, предназначенной для оказания помощи абитуриентам в выборе направления подготовки. Проведена серия экспериментов, в которых системой производилась обработка различных выборок, содержащих индивидуальные характеристики студентов и информацию об окончании ими вуза, с последующим генерированием рекомендаций относительно выбора предпочтительного направления подготовки. После этого было выполнено сравнение реальных данных с предложенными системой. В качестве критерия использовалась F-мера. Установлено, что «iWizard-E» позволяет формировать эффективные прогнозы.

Ключевые слова: искусственный интеллект, интеллектуальная система поддержки принятия решений, интеллектуальный анализ данных, Orange.

STUDY OF PROGNOSTIC OPPORTUNITIES OF THE IWIZARD-E SYSTEM

Research article

Palmov S.V.^{1,*}, Miftakhova A.A.²

^{1,2} Volga State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia

* Corresponding author (psv[at]psuti.ru)

Abstract

The article considers prognostic capabilities of iWizard-E, an intelligent decision support system designed to help entrants choose their future career. A series of experiments was performed; various samples containing individual characteristics of students and information about their graduation from the university were processed followed by recommendations for choosing a preferred direction. After that, the real data were compared with the option proposed by the system. The F-measure was used as the criterion. It is established that “iWizard-E” allows creating effective forecasts.

Keywords: artificial intelligence, intelligent decision support system, data mining, Orange.

Введение

Одна из самых острых проблем вузов в настоящее время – успеваемость. Это вызвано все возрастающими требованиями к студентам. Как следствие, возникла ситуация, требующая осуществления некоторых мероприятий, направленных на повышение успеваемости студентов. Традиционные способы уже не оказывают должного эффекта.

Поэтому в последние годы в сфере образования наметилась отчетливая тенденция использования разнообразных информационных технологий для повышения успеваемости студентов.

На вероятность успешного окончания студентом вуза, а значит, и на его успеваемость, сильное влияние оказывает то, насколько «правильно» было выбрано направление подготовки. Одним из способов снижения вероятности ошибки выбора является выявление скрытых закономерностей между индивидуальными характеристиками студента (абитуриента) и результатом окончания вуза с последующим использованием полученной информации для помощи абитуриенту при выборе направления подготовки на этапе подачи документов в приемную комиссию. На взгляд авторов, наиболее эффективный способ автоматизации процесса оказания помощи абитуриенту в вышеуказанном вопросе – это использование интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР), разработанной с использованием технологии интеллектуального анализа данных (ИАД). Такая ИСППР использует модель предметной области (прогностическая модель), которая на основе неких знаний (закономерностей) вырабатывает прогнозы (рекомендации). [5, С. 7].

Описание экспериментов

ИСППР упомянутого типа разработана, зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ (свидетельство №2018616979, ИСППР «iWizard-E»), а ее основные особенности описаны и протестированы в [5, С. 8-10]. Однако было решено провести дополнительное исследование возможностей iWizard-E, используя для этого F-меру (F1), поскольку она позволяет эффективнее оценить качество формируемых системой прогнозов. F-мера рассчитывается по формуле: $F1 = 2 * ((P * R) / (P + R))$ [6].

Исследование состояло из 11 экспериментов. В каждом из них, кроме первого, использовалось по пять выборок определенного типа (стратифицированная, bootstrap и с возвращением), созданных средствами системы Orange [7, С. 95] на основе исходного набора данных (2618 записей) из [5, С. 8-9]. В указанный исходный набор данных было внесено единственное изменение – целевой показатель «сведения об окончании вуза» принимает только два значения: закончил вуз \ не закончил вуз. Таким образом, в ходе серии экспериментов оценивалась способность ИСППР «iWizard-E» формировать достоверные прогнозы относительно вероятности успешного окончания студентом вуза для выбранного направления подготовки.

Кратко опишем использованные типы выборок:

Стратифицированная выборка формируется в два этапа, в результате чего генеральная совокупность делится на слои (страты). Страты должны взаимно исключать и взаимно дополнять друг друга, чтобы каждый элемент совокупности относился к одному и только одному слою, и ни один элемент не был упущен. Далее, из каждого слоя случайным образом выбираются элементы, при этом обычно используется метод простой случайной выборки [8].

Bootstrap-выборка – метод формирования нескольких выборок данных того же размера, что и исходная генеральная совокупность, но с разными распределениями интересующей величины [2].

Выборка с возвращением (replacement) – на вероятность появления элемента в выборке прочие элементы генеральной совокупности не влияют [10].

Эксперименты можно разделить на два вида. В первом из них для каждого критерия разбиения (Gini [4], Entropy [3], Information Gain [1] и Gain Ratio [9]) при помощи исходного набора обучалась прогностическая модель, которая затем проверялась на пяти выборках конкретного типа (эксперименты со второго по шестой; в первом эксперименте для проверки использовался исходный набор).

Эксперименты второго вида проводились по следующей схеме: 1) в результатах экспериментов со второго по шестой выбирались два множества, при проверках по которым iWizard-E показала лучший и худший результаты соответственно (буквы «л» и «х» в табл. 7-11); 2) на основании каждой пары выборок последовательно строились прогностические модели; 3) при помощи исходного набора выполнялась проверка построенных моделей.

Результаты экспериментов

Эксперимент №1 (тестирование на обучающем наборе данных)

Таблица 1 – Результаты эксперимента №1

Критерий разбиения	Gini	Entropy	Information Gain	Gain Ratio
F1	0,8846	0,8700	0,8671	0,8700

Эксперимент №2 (тестирование на стратифицированной выборке)

Размер обучающего множества – 2618 записей (исходный набор), размер тестовой выборки – 90% от обучающего множества.

Таблица 2 – Результаты эксперимента №2

Критерий разбиения	Gini	Entropy	Information Gain	Gain Ratio
F1 (выборка 1)	0,7779	0,7819	0,7807	0,7763
F1 (выборка 2)	0,7328	0,7240	0,7386	0,7240
F1 (выборка 3)	0,7379	0,7306	0,7255	0,7410
F1 (выборка 4)	0,7329	0,7219	0,7229	0,7238
F1 (выборка 5)	0,7368	0,7435	0,7444	0,7267

Эксперимент №3 (тестирование на стратифицированной выборке)

Размер обучающего множества – 2618 записей (исходный набор), размер тестовой выборки – 80% от обучающего множества.

Таблица 3 – Результаты эксперимента №3

Критерий разбиения	Gini	Entropy	Information Gain	Gain Ratio
F1 (выборка 1)	0,7422	0,7452	0,7464	0,7315
F1 (выборка 2)	0,7385	0,7386	0,7392	0,7257
F1 (выборка 3)	0,7366	0,7209	0,7221	0,7221
F1 (выборка 4)	0,7398	0,7469	0,7457	0,7331
F1 (выборка 5)	0,7428	0,7280	0,7462	0,7288

Эксперимент №4 (тестирование на стратифицированной выборке)

Размер обучающего множества – 2618 записей (исходный набор), размер тестовой выборки – 70% от обучающего множества.

Таблица 4 – Результаты эксперимента №4

Критерий разбиения	Gini	Entropy	Information Gain	Gain Ratio
F1 (выборка 1)	0,7358	0,7440	0,7457	0,7405
F1 (выборка 2)	0,7412	0,7279	0,7256	0,7432
F1 (выборка 3)	0,7392	0,7453	0,7451	0,7298
F1 (выборка 4)	0,7343	0,7283	0,7256	0,7419
F1 (выборка 5)	0,7438	0,7319	0,7431	0,7346

Эксперимент №5 (тестирование на bootstrap-выборке)

Размер обучающего множества – 2618 записей (исходный набор), размер тестовой выборки – 2618 записей.

Таблица 5 – Результаты эксперимента №5

Критерий разбиения	Gini	Entropy	Information Gain	Gain Ratio
F1 (выборка 1)	0,7393	0,7426	0,7321	0,7218
F1 (выборка 2)	0,7555	0,7537	0,7537	0,7382
F1 (выборка 3)	0,7210	0,7114	0,7140	0,7308
F1 (выборка 4)	0,7396	0,7383	0,7352	0,7176
F1 (выборка 5)	0,7154	0,7225	0,7091	0,7250

Эксперимент №6 (тестирование на выборке с возвращением)

Размер обучающего множества – 2618 записей (исходный набор), размер тестовой выборки – 2618 записей.

Таблица 6 – Результаты эксперимента №6

Критерий разбиения	Gini	Entropy	Information Gain	Gain Ratio
F1 (выборка 1)	0,7402	0,7348	0,7339	0,7286
F1 (выборка 2)	0,7476	0,7308	0,7324	0,7357
F1 (выборка 3)	0,7495	0,7390	0,7337	0,7397
F1 (выборка 4)	0,7258	0,7323	0,7332	0,7342
F1 (выборка 5)	0,7382	0,7333	0,7279	0,7479

Эксперимент №7 (тестирование на исходном наборе)

Размер обучающего множества – 90% записей от исходного набора, размер тестовой выборки – 2618 записей (исходный набор).

Таблица 7 – Результаты эксперимента №7

Критерий разбиения	Gini	Entropy	Information Gain	Gain Ratio
F1 (выборка 1)	0,7727 л	0,8229 л	0,7705 л	0,7737 л
F1 (выборка 2)	0,7413 х	–	–	–
F1 (выборка 4)	–	0,7516 х	0,7577 х	0,7510 х

Эксперимент №8 (тестирование на исходном наборе)

Размер обучающего множества – 80% записей от исходного набора, размер тестовой выборки – 2618 записей (исходный набор).

Таблица 8 – Результаты эксперимента №8

Критерий разбиения	Gini	Entropy	Information Gain	Gain Ratio
F1 (выборка 1)	–	–	0,7391 л	–
F1 (выборка 3)	0,7348 х	0,7101 х	0,7128 х	0,7134 х
F1 (выборка 4)	–	0,7233 л	–	0,7233 л
F1 (выборка 5)	0,7134 л	–	–	–

Эксперимент №9 (тестирование на исходном наборе)

Размер обучающего множества – 70% записей от исходного набора, размер тестовой выборки – 2618 записей (исходный набор).

Таблица 9 – Результаты эксперимента №9

Критерий разбиения	Gini	Entropy	Information Gain	Gain Ratio
F1 (выборка 1)	–	–	0,7345 л	–
F1 (выборка 2)	–	0,7422 х	0,7422 х	0,7352 л
F1 (выборка 3)	–	0,7372 л	–	0,7371 х
F1 (выборка 4)	0,7290 х	–	–	–
F1 (выборка 5)	0,7336 л	–	–	–

Эксперимент №10 (тестирование на исходном наборе)

Размер обучающего множества – 2618 записей (bootstrap-выборка), размер тестовой выборки – 2618 записей (исходный набор).

Таблица 10 – Результаты эксперимента №10

Критерий разбиения	Gini	Entropy	Information Gain	Gain Ratio
F1 (выборка 2)	0,7307 л	0,7337 л	0,7318 л	0,7337 л
F1 (выборка 3)	–	0,7219 х	–	–
F1 (выборка 4)	–	–	–	0,7172 х
F1 (выборка 5)	0,7195 х	–	0,7325 х	–

Эксперимент №11 (тестирование на исходном наборе)

Размер обучающего множества – 2618 записей (выборка с возвращением), размер тестовой выборки – 2618 записей (исходный набор).

Таблица 11 – Результаты эксперимента №10

Критерий разбиения	Gini	Entropy	Information Gain	Gain Ratio
F1 (выборка 1)	–	–	0,6974 л	0,7256 х
F1 (выборка 2)	–	0,7115 х	–	–
F1 (выборка 3)	0,7480 л	0,7288 л	–	–
F1 (выборка 4)	0,7406 х	–	–	–
F1 (выборка 5)	–	–	0,7063 х	0,7031 л

Для полученных результатов были рассчитаны следующие характеристики: среднее, стандартное отклонение (СКО) и дисперсия.

Таблица 12 – Среднее, СКО, дисперсия для F1

Номера экспериментов	Среднее	СКО	Дисперсия
2-6	0,73627	0,01288	0,00017
7-11	0,73460	0,02286	0,00052
2-11	0,73580	0,01629	0,00027
без учета минимального и максимального значений F1			
2-6	0,73608	0,01184	0,00014
7-11	0,73330	0,01734	0,00030
2-11	0,73540	0,01424	0,00020

Данные эксперимента №1 в расчете характеристик не использовались. Причина указана в выводе №1 (см. далее).

Таблица 13 – Среднее, СКО, дисперсия для F1 (Gini)

Номера экспериментов	Среднее	СКО	Дисперсия
2-6	0,73938	0,01154	0,00013
7-11	0,73636	0,01635	0,00027
2-11	0,73852	0,01291	0,00017
без учета минимального и максимального значений F1			
2-6	0,73778	0,00847	0,00007
7-11	0,73891	0,01508	0,00023
2-11	0,73809	0,01043	0,00011

Таблица 14 – Среднее, СКО, дисперсия для F1 (Entropy)

Номера экспериментов	Среднее	СКО	Дисперсия
2-6	0,73590	0,01375	0,00019
7-11	0,73832	0,03244	0,00105
2-11	0,73659	0,02033	0,00041
без учета минимального и максимального значений F1			
2-6	0,73590	0,01375	0,00019
7-11	0,73128	0,01266	0,00016
2-11	0,73478	0,01345	0,00018

Таблица 15 – Среднее, СКО, дисперсия для F1 (Information Gain)

Номера экспериментов	Среднее	СКО	Дисперсия
2-6	0,73608	0,01435	0,00021
7-11	0,73248	0,02243	0,00050
2-11	0,73505	0,01677	0,00028
без учета минимального и максимального значений F1			
2-6	0,73422	0,01117	0,00012
7-11	0,73638	0,01988	0,00040
2-11	0,73481	0,01376	0,00019

Таблица 16 – Среднее, СКО, дисперсия для F1 (Gain Ratio)

Номера экспериментов	Среднее	СКО	Дисперсия
2-6	0,73370	0,01178	0,00014
7-11	0,73133	0,02014	0,00041
2-11	0,73302	0,01437	0,00021
без учета минимального и максимального значений F1			
2-6	0,73193	0,00791	0,00006
7-11	0,73447	0,01859	0,00035
2-11	0,73262	0,01152	0,00013

Изучив представленные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. iWizard-E продемонстрировала наибольшую эффективность при использовании в качестве тестового множества итогового набора, то есть данных, которые применялись для обучения проверяемых прогностических моделей в первом эксперименте. Однако такой подход, как правило, демонстрирует завышенные значения показателей качества. Следовательно, эти результаты в дальнейшем учитываться не будут для повышения достоверности оценки работы системы.
2. Наилучший результат ($F1 = 0,8229$) был достигнут при: тип выборки = «стратифицированная», размер обучающей выборки = «90% от исходного набора», размер тестовой выборки = «2618 записей». Наихудший результат ($F1 = 0,6974$) был достигнут при: тип выборки = «с возвращением», размер обучающей выборки = «2618 записей», размер тестовой выборки = «исходный набор».
3. iWizard-E продемонстрировала наиболее стабильные результаты при использовании в качестве обучающего множества исходного набора (самые низкие значения СКО и дисперсии при наивысших средних значениях; см. строки 2 и 6 в табл. 12).
4. iWizard-E продемонстрировала наиболее стабильные результаты (см. табл. 13-16) при использовании критерия разбиения Gain Ratio (наименьшие значения СКО и дисперсии).

Таким образом, iWizard-E продемонстрировала достаточно высокие результаты при обработке различных наборов данных. Следовательно, можно утверждать, что ИСППР позволяет формировать эффективные прогнозы.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Бинарные деревья решений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://analytics.github.io/data-mining/052-Binary-Decision-Trees.html>. (08.08.2018).
2. Бутстрэп [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://basegroup.ru/community/glossary/bootstrap>. (08.08.2018).
3. Информационная энтропия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: http://ru.math.wikia.com/wiki/Информационная_энтропия. (08.08.2018).
4. Коэффициент Джини [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.economicportal.ru/ponyatiya-all/koefficient-dzhini.html>. (08.08.2018).
5. Мифтахова, А. А. Использование методов искусственного интеллекта для повышения успеваемости студентов вузов / А. А. Мифтахова // Наука и бизнес: пути развития. – 2017. – № 5(71). – С. 7-12.
6. Оценка классификатора (точность, полнота, F-мера) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://bazhenov.me/blog/2012/07/21/classification-performance-evaluation.html>. (08.08.2018).
7. Пальмов, С. В. Реализация деревьев решений в различных аналитических системах / С. В. Пальмов, А. А. Мифтахова // Перспективы науки. – 2015. – № 1(64). – С. 93-98.

8. Стратифицированная выборка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.market-journal.com/marketingoveissledovaniya/113.html>. (08.08.2018).
9. Information gain ratio [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Information_gain_ratio. (08.08.2018).
10. Sampling With Replacement / Sampling Without Replacement [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.statisticshowto.com/sampling-with-replacement-without/>. (08.08.2018).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Binarnyye derev'ya resheniy [Binary decision trees] [Electronic resource]. – URL: <https://analytics.github.io/data-mining/052-Binary-Decision-Trees.html>. (accessed: 08.08.2018). [in Russian]
2. Butstrep [Bootstrap] [Electronic resource]. – URL: <https://basegroup.ru/community/glossary/bootstrap>. (accessed: 08.08.2018). [in Russian]
3. Informatsionnaya entropiya [Information entropy] [Electronic resource]. – URL: http://ru.math.wikia.com/wiki/Информационная_энтропия. (accessed: 08.08.2018). [in Russian]
4. Koeffitsiyent Dzhini [Gini coefficient] [Electronic resource]. – URL: <http://www.economicportal.ru/ponyatiya-all/koefficient-dzhini.html>. (accessed: 08.08.2018). [in Russian]
5. Miftakhova, A. A. Ispol'zovaniye metodov iskusstvennogo intellekta dlya povysheniya uspevayemosti studentov vuzov [Artificial Intelligence for Improving Students' Performance] / A. A. Miftakhova // Nauka i biznes: puti razvitiya [Science and business: development ways]. – 2017. – № 5(71). – P. 7-12. [in Russian]
6. Otsenka klassifikatora (tochnost', polnota, F-mera) [Classifier estimation (precision, recall, F-score)] [Electronic resource]. – URL: <http://bazhenov.me/blog/2012/07/21/classification-performance-evaluation.html>. (accessed: 08.08.2018). [in Russian]
7. Palmov, S. V. Realizatsiya derev'yev resheniy v razlichnykh analiticheskikh sistemakh [Realization of Decision Trees in Different Analytical Systems] / S. V. Palmov, A. A. Miftakhova // Perspektivy nauki [Science Prospects]. – 2015. – № 1(64). – P. 93-98.
8. Stratifitsirovannaya vyborka [Stratified sampling] [Electronic resource]. – URL: <http://www.market-journal.com/marketingoveissledovaniya/113.html>. (accessed: 08.08.2018). [in Russian]
9. Information gain ratio [Electronic resource]. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Information_gain_ratio. (accessed: 08.08.2018).
10. Sampling With Replacement / Sampling Without Replacement [Electronic resource]. – URL: <http://www.statisticshowto.com/sampling-with-replacement-without/>. (accessed: 08.08.2018).

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.013>

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА КОЛЛЕКТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ МУРАВЬЁВ

Научная статья

Свистова С.Ф.*

Российский Технологический Университет, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (svistova.s[at]mail.ru)

Аннотация

Известно, что колонии насекомых, особенно муравьи, действуют и решают различные задачи очень распределённым образом, сохраняя высокий уровень надежности. Алгоритмы колоний насекомых, основанные на поведении насекомых, получили большое внимание в различных приложениях, таких как распределение задач, поиск дома для жизни и т. д., демонстрируя очень хорошие результаты в решении конкретных проблем NP-сложности. В этой статье мы анализируем вариант алгоритма кормления, основывающегося на поведении колонии муравьёв. Мы находим, как теоретически, так и с помощью численных симуляций, такие условия, которые ведут к известную самоуничтожающему поведению, называемому “муравьиная спираль смерти”.

Ключевые слова: распределённые алгоритмы, случайное блуждание моделирование, численная симуляция.

THEORETICAL AND NUMERICAL EVALUATION OF COLLECTIVE ANT BEHAVIOUR

Research article

Svistova S.F.*

Russian Technological University, Moscow, Russia

* Corresponding author (svistova.s[at]mail.ru)

Abstract

It is known that insect colonies, especially ants, act and solve various necessary tasks in a very distributed manner, keeping high level of robustness. Insect colony algorithms, based on the insects' behaviour, have received large attention in various applications such as task allocation, house hunting, etc., showing very good results in solving particular NP-Hard problems. In this paper we analyse a variation of foraging algorithm that originates from the ant colonies behaviour. We discover theoretically and using the numerical simulations the conditions, which lead to a known self-destructive behaviour, also referred as the Ant Spiral of Death.

Keywords: distributed algorithms, random walk, modelling, numerical simulation.

Introduction

Basic ant colony foraging problem on the grid can be described as the problem of finding target cells (sources of food) given starting cell (anthill) and number of independent agents (ants) with limited resources [2, P. 575]. Some species of ants may have very limited amount of short-term memory and extensively rely on the pheromones for navigation. I.e. each walked path is marked with some amount of pheromone, which tells other ants whether path is walked already and/or source of food is found. Each ant that walks "food" path adds it's own pheromones to existing amount to increase attractiveness of the path and pull more ants into the process. Pheromones are tended to dissipate and diffuse, thus, decreasing influence over time [10, P. 123].

One of the algorithms that models and solves foraging problem is called Pheromones Algorithm. It imposes no obstacles, no dissipation, no direct communication and centralised starting point. Group of ants starts from given cell and randomly explore surroundings, avoiding already marked cells. More complicated foraging model may include obstacles and rely on more probabilistic navigation, for instance, whenever ant tries to find an anthill it will more probable to move in the direction with larger pheromones density, but it can still perform random walks. This problem is experimentally covered in [3, P. 56] with discussion on the different parameters that leads to convergence.

We, in turn, want to discuss modification of the pheromone algorithm in no-food environment in order to simulate phenomenon of Ant Spiral of Death. It is observed, that some warrior colonies of ants, with bad eye-vision, can form a moving spiral "flock" (size can vary up to 1200 feet), and if it is not broken down somehow, then, whole colony can die because of exhaustion. It is, usually, explained by the looped pheromone paths which are followed by the blind ants that do not have other methods for orientation. It can be easily reproduced in handicraft conditions by placing sufficient amount of ants into bounded space. In the following sections we will describe the model of ants behaviour, derive some theoretical results and prove them experimentally.

Model

Informally, ant behaviour in our model can be described as following:

1. N ants start randomly in a bounded grid space and act synchronously.
2. Each ant places portion of pheromones ϕ_0 at its starting point.
3. Environment does not contain food cells.
4. At each round:
 - a. If ant stands at non-marked with pheromone cell, then it places there amount of pheromone equal to the maximum amount from the neighbourhood (cells that can be reached within one round) of this cell, multiplied by the uncertainty factor $u \leq 1$. If cell is marked (i.e. ant previously moved to, probably, other's ant path), then it adds $\Delta\phi$ to the existing amount (increases attention to the path).
 - b. Ant randomly chooses whether to perform chaotic move with some fixed probability p or to move to the cell with larger amount of pheromones (with respect to distance):

- ant can move in 8 directions by one cell during one round;
 - tie-breaking is done randomly;
 - each ant has limited memory and can remember up to m last cells it visited;
 - ant prefers not to visit cells that are in the neighbourhood of the last visited (tries to explore broader).
- c. Pheromone ϕ evaporate over time with rate ϵ , i.e. $\phi_k = \phi_0 \cdot \epsilon^k$

Theory

Given the model description we can do some theoretical suggestions regarding the possibility of the Spiral of Death formation. For ease, let consider the above model with number of ants $N = 1$.

Assumption 1. For small chaotic move probability p an ant, starting from the closed trail of pheromones is more likely to stay on it.

Proof. Since ants have 8 degrees of freedom, then, probability to chaotically move from the trail at the step 0 is $\frac{6}{8}p$. WLOG at the step 1, there are only 3 ways to move strictly out from the trail, thus, the probability is $\frac{3}{8}p$. At the step 3, assuming trail is not in the neighbourhood anymore, ant will choose direction randomly and uniformly. Thus, 1D random-walk can be applied in order to find probability that ant will not chaotically come back to the trail. From the theory it is known that this probability is proportional to $(1 - n^{-1/2})$, where n is the number of steps. Total probability, that an ant leaves the trail is

$$\sim \frac{6}{8}p \frac{3}{8}p(1 - n^{-1/2}) \propto p^2(1 - n^{-1/2})$$

For a sufficiently small p and large n this probability is small.

Assumption 2. For ant memory $m \gg 1$ and number of steps $n \gg m$, following equations give conditions on parameters n , m , u and ϵ that, if satisfied, lead to creation of "Spiral of Death".

$$(n - m)[\log(n - m) - 1] + \log(n - m) \sim 1$$

$$\phi_{n^*}^i = \phi_0 \cdot \epsilon^i u^{n^* - i} \geq \delta, i = 1, \dots, n, \quad (1), (2)$$

where n^* is solution to 1, δ - some threshold, may considered as machine precision.

Proof

To prove this assumption we need to find probability that path of the ant have intersections after n steps. First, we consider easier problem of finding probability that ant returns to it's starting point. We can consider creation of such closed loop as 2D random-walk with return. However, finite ant memory m and respective behaviour imply following restriction: random-walk started at step i can not return at steps less than $i + m$. From the theory it is known, that for 2D case probability of return in k steps is proportional to $\frac{1}{k}$. Then, mathematical expectation of the number of returns after s steps is [1]

$$\mathbb{E}_s(rets) = \sum_{k=1}^s \frac{1}{k} = H_s \stackrel{n \gg 1}{\approx} \log s + \gamma + \frac{1}{2s} - \frac{1}{12s^2} + \dots$$

where H_s - s^{th} harmonic number.

Thus, ant returns to it's starting point after n steps $\mathbb{E}_n(rets)$ times. However, to solve original problem, we also need to consider intersections with each following point of random-walk $2 \dots n$. Hopefully, intersection with point i can be considered as the return after $n - i$ steps of the random-walk started at i , because random-walk is, essentially a Markov Process. Thus, number of intersections is

$$I = \sum_{k=1}^n \mathbb{E}_k(rets),$$

adding memory restriction:

$$\begin{aligned} I &= \sum_{k=1}^{n-m} \mathbb{E}_k(rets) \stackrel{n \gg 1}{\approx} \sum_{k=1}^{n-m} \left(\log k + \frac{1}{k} \right) = \\ &= \log[1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot (n - m)] + H_{n-m} \\ &\stackrel{m \gg 1}{\approx} \log(n - m)! + \log(n - m) \approx \\ &\approx |\text{Stirling's factorial approximation}| \approx \\ &\stackrel{n \gg m}{\approx} (n - m) \log(n - m) - (n - m) + \log(n - m). \end{aligned}$$

Finally, closed loop creation, or, equivalently having at least one intersection in a random-walk is given by setting number of intersections $I \sim 1$, from which (1) immediately follows. This is qualitative estimate that describes the relations between the model parameters. To obtain particular solution n^* given some m , one should numerically solve the particular equation.

If, after n steps, trail completely dissipated, then, random-walk would not intersect the trail whatsoever. Therefore, we need to require the pheromone not to dissipate completely at any trail point i before the closed-loop is created. From 1 for fixed m , particular n^* steps, that are needed for closed-loop creation can be obtained. Thus, using evaporation and uncertainty laws, we see, that for each trail point i after n steps

$$\phi_n^i = \phi_0 \cdot \epsilon^i u^{n-i}, i = 1, \dots, n \text{ olds.}$$

Immediately follows (2).

In this section we provided some theoretical results showing how different parameters of our model must be set with respect to each other in order to create or avoid "Spiral of Death" in the case of $N = 1$. Extension to $N > 1$ does not seem trivial for general case, but can be roughly done using the results on multiple random-walk intersections.

Experiments

In this section we provide some experimental results obtained from the simulation of the described model. For implementation, we used Multiagent Simulation Toolkit MASON, which provides easy way to model synchronous systems

using Java programming language. As well, it has in-built screen-capture tools, which allows to record and take snapshots of the simulation.

We conducted several experiments on the bounded square grid of size 50×50 cells. Starting points of ants were placed uniformly. We varied model parameters N , m , ϵ , p to see how they affect the results. For all experiments we put $u = 0.8$, $\Delta\phi = 0.1$, $\phi_0 = 1.0$.

First, we decided to reproduce theoretical results for $N = 1$ and see if our assumptions are reasonable. For large chaotic movement probability p we have got expectable results, that ant can not create stable loop, hence, we set $p = 1\%$ for the experiments described below:

- Small memory $m = 5$, moderate evaporation $\epsilon = 0.8$ lead to small loop size as expected. See FIG. 1 a).
- Small memory $m = 5$, intensive evaporation $\epsilon = 0.3$ lead to loop impossibility as random-walk can't end before $\phi = 0.002$ already. See FIG. 1 b).
- Very large memory $m = 100$, moderate evaporation $\epsilon = 0.8$ lead to loop impossibility, as ant is very unlikely to return to the trail. See FIG. 1 c).
- Large memory $m = 50$, slow evaporation $\epsilon = 0.99$ lead to large loops as expected. See FIG. 1 d).

Second, we observed behaviour patterns for $N > 1$. Now, we varied p , fixing memory to moderate value $m = 20$.

- $N = 100$, tiny probability $p = 10^{-3}\%$, fast evaporation $\epsilon = 0.6$ lead to small/medium loops. See FIG. 1 f).
- $N = 100$, large probability $p = 10\%$, moderate evaporation $\epsilon = 0.8$ lead to no loops, mostly chaotic movement. See FIG. 1 e).
- $N = 100$, tiny probability $p = 10^{-3}\%$, moderate evaporation $\epsilon = 0.8$ lead to large loop. See FIG. 1 g).

Summary

In this paper we showed the behaviour of an ant colony in specific environment, which could lead to an interesting natural glitch/phenomenon known as "Ant Spiral of Death". We described simple model with several parameters that could be varied. After that, for simple case of unit size ant colony we derived theoretical predictions on the relations between parameters that lead to larger possibility of "spiral behaviour". Further, we implemented our model using multi-agent simulation toolkit and conducted experiments that, overall, were consensual with theoretical results. Finally, we empirically picked up suitable parameters and verified, that "Ant Spiral of Death" can be produced in our model with colony of larger size $N > 1$.

FIG. 1: $N = 1$, $m = 5$, $\epsilon = 0.8$, $p = 1\%$

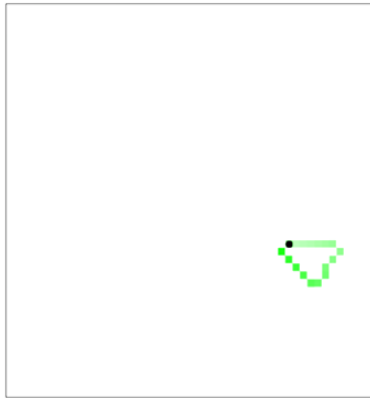


FIG. 2: $N = 1$, $m = 5$, $\epsilon = 0.8$, $p = 1\%$



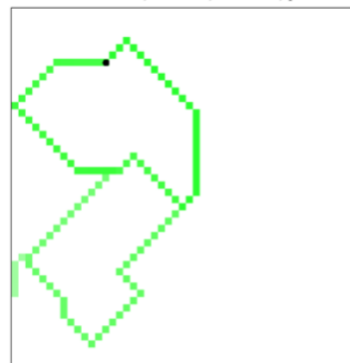
Small memory, moderate evaporation

FIG. 3: $N = 1$, $m = 100$, $\epsilon = 0.8$, $p = 1\%$



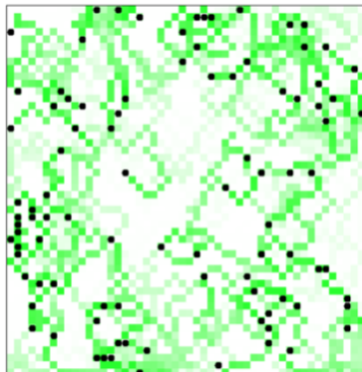
Small memory, intensive evaporation

FIG. 4: $N = 1$, $m = 50$, $\epsilon = 0.99$, $p = 1\%$



Large memory, moderate evaporation

FIG. 5: $N = 100$, $m = 20$, $\epsilon = 0.8$, $p = 10\%$



Large memory, slow evaporation

FIG. 6: $N = 100$, $m = 20$, $\epsilon = 0.6$, $p = 10^{-3}\%$



Large probability, moderate evaporation

FIG. 7: $N = 100$, $m = 20$, $\epsilon = 0.8$, $p = 10^{-3}\%$



Tiny probability, fast evaporation

Tiny probability, moderate evaporation

Fig. 1 – Obtained results

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Van den Berg M. Exit and return of a simple random walk // Potential Analysis. – 2005. – Т. 23. – №. 1. – P. 45-53.
2. Panait L. A. Learning ant foraging behaviours / Panait L. A., Luke S. // Artificial Life XI Ninth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems. – 2004. – P. 575-580.
3. Panait L. Ant foraging revisited / Panait L., Luke S. // proceedings of the Ninth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems (ALIFE9). – 2004. – P. 14-37.
4. Afek Y. Optimal pheromone utilization / Afek Y., Kecher R., Sulamy M. // 2nd Workshop on Biological Distributed Algorithms (BDA), Austin, Texas, USA. – 2014. – P. 13-27.
5. Afek Y. Idle Ants Have a Role / Afek Y., Gordon D. M., Sulamy M. // arXiv preprint arXiv:1506.07118. – 2015. – P. 1-20.
6. Afek Y. Optimal and Resilient Pheromone Utilization in Ant Foraging / Afek Y., Kecher R., Sulamy M. //arXiv preprint arXiv:1507.00772. – 2015. – P. 10-23.
7. Chircop J. A multiple pheromone ant clustering algorithm / Chircop J., Buckingham C. D. // Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NISCO 2013). – Springer, Cham, 2014. – P. 13-27.
8. Chircop J. A multiple pheromone algorithm for cluster analysis / Chircop J., Buckingham C. D. // International Conference on Swarm Intelligence (ICSI), Cergy, France. – 2011. – P. 1-14.
9. Chircop J. The Multiple Pheromone Ant Clustering Algorithm and its application to real world domains / Chircop J., Buckingham C. D. // Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 2013 Federated Conference on. – IEEE, 2013. – P. 1-22.
10. Hoff N. R. Two foraging algorithms for robot swarms using only local communication // Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2010 IEEE International Conference on. – IEEE, 2010. – P. 123-130.

МОНИТОРИНГ СОПРЯЖЕННЫХ СИСТЕМ ПРИБРЕЖНОГО РЕГИОНА

Научная статья

Павлова С.А.^{1,*}, Павлов И. Е.², Поляхов А. С.³, Поляхов И. А.⁴^{1,2} Российская Академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Москва, Россия;^{3,4} Общества с ограниченной ответственностью "Союз консалт", Севастополь, Россия

* Корреспондирующий автор (s_pavlova[at]mail.ru)

Аннотация

Мониторинг морского прибрежного региона важное направление научно-практической деятельности. Он включается в общую систему глобального мониторинга. Существуют отдельные методики мониторинга для отдельных сред. Но целостной системы мониторинга для прибрежных регионов пока нет. В статье предлагается обратить внимание на необходимость комплексного подхода для изучения особенностей прибрежных регионов с целью эффективного управления ситуацией. Результат длительного изучения морских акваторий, урбанизированных систем, располагающихся в прибрежной зоне, особенностей организации территории под рекреационные нужды, привел авторов к необходимости зонирования территории и разработки системы мониторинга в соответствии с типом зон. В статье приводятся несколько зон, которые были выделены в результате изучения особенностей морского прибрежного региона Севастополя.

Ключевые слова: мониторинг, экосистема, природные ресурсы, управление.

MONITORING OF CONJUGATED SYSTEMS OF COASTAL REGION

Research article

Pavlova S.A.^{1,*}, Pavlov I.E.², Polyakhov A.S.³, Polyakhov I.A.⁴^{1,2} Russian Academy of National Economy and Public Service under the President of the Russian Federation, Moscow, Russia;^{3,4} Limited Liability Company "Soyuz Consult," Sevastopol, Russia

* Correspondent author (s_pavlova@mail.ru)

Abstract

Monitoring of the coastal seaside region is an important area of scientific and practical activity. It is included in the overall system of global monitoring. There are separate monitoring methods for individual environments. However, there is as yet no integrated monitoring system for the coastal region. To effectively manage the situation, the article suggests paying attention to the necessity of an integrated approach to the study of coastal regions. The result of the long-term study of marine areas, urbanized systems located in the coastal zone, the main features of arranging the territory for recreational purposes made the authors conclude that zoning of the territory and developing a monitoring system by the type of zones is necessary. The article lists several zones identified after the study of the characteristics of the coastal seaside region of Sevastopol.

Keywords: monitoring, ecosystem, natural resources, management.

Мониторинг – это система наблюдения и контроля окружающей среды. Понятие экологический мониторинг введено Стокгольмской конференцией в 1972 году и означает, что это наблюдение, оценка, анализ состояния изменения окружающей природной среды. Мониторинг окружающей человека среды – это слежение за состоянием природной среды и предупреждение о создающихся критических ситуациях, вредных или опасных для здоровья людей и других живых организмов.

Мониторингом называется система наблюдений, оценки и прогноза состояния окружающей природной среды, позволяющая выделить изменения состояния биосферы на естественном фоне под влиянием человеческой деятельности. Экологический мониторинг – комплексная система наблюдений за состоянием окружающей среды, оценка и прогноз изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов. Основное предназначение мониторинга для системы управления – это получение результатов по системному слежению, экспериментальному и прогнозному моделированию и разработка рекомендаций по управлению состоянием окружающей природной среды.

Виды мониторинга при учете основных показателей:

1. Качественный или количественный – количественная и (или) качественная оценка состояния воздуха, поверхностных вод, климатических изменений, почвенного покрова, флоры и фауны, выбросов, стоков, сбросов с промышленных предприятий и с агропромышленного комплекса и т.д. Осуществляется с помощью системы наблюдений технологических и (или) визуальных методов, в зависимости от цели и задач.

2. Прогнозный – использование методов прогноза, в том числе и статистических методов, за состоянием объектов природной среды или экологической ситуацией окружающей среды.

3. Информационный – сбор, обработка, анализ и передача информации об изменениях в окружающей среде и (или) технологических циклах.

Основные функции мониторинга – контроль качества отдельных компонент окружающей среды и определение основных источников загрязнения.

Виды мониторинга по степени емкости наблюдений за процессами в биосфере:

1. Глобальный:

- слежение за мировыми процессами и явлениями в биосфере, включая все экологические компоненты;
- предупреждение о возникающих экстремальных ситуациях;
- осуществление прогноза возможных изменений в биосфере Земли.

2. Региональный – охватывает слежение за процессами и явлениями в пределах отдельного региона, где они могут отличаться по природному характеру и антропогенным воздействиям от базового фона, характерного для экосистемы или всей биосферы.

3. Импактный – проводится особо в опасных зонах, непосредственно примыкающих к загрязняющим среду источникам.

4. Базовый – мониторинг на конкретном объекте, с учетом особенностей региональных и локальных антропогенно-техногенных воздействий в особо опасных зонах и местах. Его можно применять для изучения особо охраняемых природных территорий – заповедников, заказников. Следует разрабатывать методы базового мониторинга для рекреационных зон.

Морской прибрежный регион имеет свои особенности в зависимости от географического расположения. Севастопольский морской прибрежный регион, например, отличается от всех прибрежных регионов Крыма. Он исторически развивался как техногенный военно-промышленный комплекс, как сельскохозяйственная ресурсная база. На его территории сопряжены все типы природных и антропогенно-техногенных систем. Через него проходят атмосферные фронты, циркулируют черноморские течения. Морская акватория связана и с речным стоком [5], [6]. Климатические условия таковы, что они являются курортологическими факторами, действие которых активно пропагандировались с целью развития прибрежных курортов Крыма. Атмосферные переносы способствуют заносу загрязняющих веществ из развитых техногенных регионов и их оседанию. Жители города находятся под постоянным воздействием самых разнообразных факторов среды: метеорологических; климатических (курортологических); антропогенно-техногенных. Морская прибрежная зона – это зона сопряжения и систем управления, она важна в контексте развития интересов будущего региона [10].

Для проведения мониторинга морского прибрежного региона необходимо первоначально определить его целевое развитие. Затем выделить систему для наблюдения, определить основные компоненты, влияющие на ситуацию, сформулировать задачи, подобрать методы сбора и обработки информации.

Существует несколько контактных или сопряженных зон в морском прибрежном регионе города, в соответствии с действующими на них факторами среды можно выделить основные характеристики, которые в дальнейшем необходимо учитывать в процессе мониторинга [7], [8], [9].

1. Прибрежные сопряженные районы – «сопряженная система: море – суша»:

1) Первый территориальный пояс контакта. Пример: частный сектор.

Мониторинг этой зоны следует вести с учетом основных компонент, например, в системе «пляж – рекреационная зона»:

а) Частный сектор.

Контроль: центральные коммуникации; выгребные ямы.

Экологический медицинский риск:

- причина – нарушение санитарно-эпидемиологических норм,

- последствия: развитие пищевых интоксикаций, гельминтное заражение.

- прогноз – возможно поступление в морскую среду патогенной микрофлоры и развитие кишечных и вирусных инфекций.

б) Отдыхающие – замусоривание территории.

Прогноз соответствует предыдущему пункту.

2) Второй территориальный пояс контакта.

Предприятия и жилые массивы на берегу моря. Пример источника опасности: Цементный завод; предприятия общепита; предприятия досуга.

Три субъекта – жители, частный предприниматель сферы питания и досуга, администрация завода.

Различия отмечаются: в системе управления; типу и интенсивности воздействия загрязняющих источников; особенностям, интенсивности загрязнения.

3) Третий территориальный пояс контакта.

Импактный район с насыщенной разнообразной сферой воздействия. Пример: Севастопольская бухта. Регистрировались и ожидаемы все типы негативного воздействия и напряженность экологической ситуации.

Несколько субъектов воздействия на природный объект.

Воздействия разнообразные. Последствия диагностируемы, но диагностировать причину трудно вследствие сочетанного действия факторов, но напряженность ситуации ожидаема.

4) Четвертый территориальный пояс контакта.

Интенсивное воздействие техногенной деятельности на сопряженную зону. Пример: Камышовая бухта – морской торговый и рыболовецкий порт. Аналогично третьему поясу, но отмечается специфика по типам воздействия. Она характеризуется явно выраженной доминантой или приоритетом действия несколько сочетано действующих факторов среды.

В севастопольском морском прибрежном регионе, как и для любого аналогичного района в сопряженной системе «суша – море», выделяется несколько типов бухт по степени загрязнения. Характеристики загрязняющих источников могут различаться, но напряженность экологической ситуации будет обосновываться степенью тяжести экологической ситуации.

1) Относительно чистая бухта. Интенсивность субъектов деятельности, в том числе рекреационной, непостоянная. Несколько загрязнителей периодически сбрасывают загрязняющие вещества в акваторию. Степень самоочищения морской прибрежной системы выше фонового антропогенного загрязнения [7], [8].

2) Грязная бухта. Несколько субъектов постоянно загрязняют акваторию. Степень загрязнения превышает степень самоочищения бухты. Загрязняющие вещества депонируются. Эпизодически или постоянно происходит вторичное загрязнение. В экосистеме наблюдаются стойкие изменения видового разнообразия, нарушены биотические связи. Могут наблюдаться быстрые смены экосистемных стадий [7].

3) Бухта чрезвычайной экологической ситуации (ЧЭС). Эта ситуация может возникнуть в результате разрыва коллектора, дампинга, разлива нефтепродуктов и т.п. Эффекты в соответствии с типом и интенсивностью негативно воздействующего фактора. При диагностике превышения нормативов воздействия ответственность несет виновный субъект в соответствии с типом тяжести складывающейся ситуации.

2. Сопряженные урбанизированные системы.

Они характеризуются разнообразием связанных и взаимообусловленных систем в пределах системы компонент природной среды. Компоненты природной среды и антропогенно-техногенные системы прочно связаны. Высок риск техногенных аварий с разнообразными негативными последствиями.

Сопряженные урбанизированные структуры имеют специфические характеристики по регионам города. Степень их сопряжения минимальна в зоне пляжей и прибрежных зонах отдыха, максимально - в импактных зонах.

1) Первый территориальный пояс контакта.

Это зона сопряжения жилых корпусов и технологических (промышленных) объектов с учетом их территориальной расположенности. Распространение загрязнителя диагностируется по радиусу от источника выброса. Субъект расположен в зоне (в центре) контакта. Необходимо проводить мониторинг местности с выделением зоны распространения и воздействия веществ загрязнителей с учетом климатических особенностей, учитывая сезон года, рельефа и ландшафта, застроенности территории и т.д., особенностей распространения загрязнения, его трансформации и эффектов воздействия на компоненты природной среды и человека.

2) Второй территориальный пояс контакта.

Зона, удаленная от источника загрязнения. Сфера распространения загрязнения ограничивается климатической (микроклиматической) спецификой, ландшафтными особенностями, характеристиками загрязнителя и степенью вероятного контакта компонент природной среды и человека. Необходимо учитывать особенности постоянно и периодически действующих факторов, выявляя сочетанные воздействия и возможные варианты откликов на воздействие. Приоритет отдается биохимическим методам.

3) Третий территориальный пояс контакта.

Это район, удаленный от сферы влияния источника загрязнения. Воздействие на компоненты природной среды и человека может быть диффузным или временным, и связано с природными явлениями (атмосферными переносами), особенностями трансформации веществ загрязнителей, временем воздействия. Эффекты воздействия незначительны, но в случае длительного воздействия и депонирования, могут проявляться со временем – отдаленные последствия и отмечаются сочетанные или комбинаторные эффекты. Особое значение имеют биохимические методы мониторинга.

4) Зона заповедная. Воздействие антропогенно-техногенных факторов должно быть минимально, но трансграничные эпизодические воздействия отмечаются. На территории севастопольского региона существует несколько заповедных зон с разным типом заповедного режима. Херсонес – пример историко-культурного заповедника, расположен в центре современного города. Антропогенные воздействия должны быть минимизированы, но это импактная зона. Освоение территории происходит с учетом археологической ценности. Необходимо минимизировать воздействия посредством разработки программы защиты территории от трансграничных загрязнителей с учетом климатической и ландшафтной специфики.

5) Зона, удаленная от техногенно-антропогенных контактов. Это, например, глубоководная зона, которая с одной стороны сопряжена с сильно эксплуатируемым шельфом и связана различными типами природных связей – миграция рыбных косяков на нерест и кормежку, и техногенными воздействиями - мореходная трасса. За счет гидродинамических процессов водообмен в Черном море связывает несколько морей в единую систему, происходит обмен водными массами, которые переносят питательные вещества, кислород и загрязнители. За счет подъема глубоководных вод – явления апвевинга, наблюдается подъем фосфор и азот содержащих веществ, которые способствуют повышению первичной продуктивности. В летний период прогрева воды на шельфе отмечаются явления сгона и понижение температуры.

Разделение территории морского прибрежного севастопольского региона на сопряженные зоны может быть условным, т.к. не смотря на инфраструктурную насыщенность отдельных зон, выделяется рельефная неоднородность. Специфика ее такова, что горы и балки имеют микроциркуляторные атмосферные особенности, которые способствуют образованию микроклиматических районов. В системе архитектурного планирования нет экологически обоснованной программы застройки региона. В большинстве случаев нарушаются санитарно-эпидемиологические нормы (зональное широтно-долготное расположение жилых домов; строительство коммуникаций и систем жизнеобеспечения и т.д.). Это создание условий для возникновения чрезвычайной экологической ситуации в региональном масштабе. На уровне региональных чрезвычайных ситуаций источник ЧЭС: увеличение автомобильного транспорта на центральных улицах города, в связи с отсутствием альтернативных трасс; создание стихийных рынков и предприятий общепита, а так же застройка территории и техногенное опустынивание. Система нормативов застройки с учетом ландшафтных особенностей и эколого-экономической ценности регионов в городской системе управления должна соблюдаться. С этой целью необходимо провести комплекс исследований и разработать целевую программу строительства с учетом контроля за сохранением природных геоландшафтных, рельефных, геоэкологических, микроклиматических и экономических особенностей территории.

Для анализа и обработки данных мониторинга, разрабатываются и практически внедряются компьютерные информационные программы. Задачи по оценке влияния факторов на компоненты окружающей среды можно решать с помощью математического моделирования [1], [2], [3].

В Экологической доктрине Российской Федерации, которая одобрена распоряжением Правительства РФ от 31 августа 2002 г. N 1225-р, отмечено, что к числу основных факторов деградации природной среды на мировом уровне относятся [11]:

- рост потребления природных ресурсов при сокращении их запасов;
- увеличение численности населения планеты при сокращении территорий, пригодных для проживания людей;
- деградация основных компонентов биосферы, включая сокращение биологического разнообразия, связанное с этим снижение способности природы к саморегуляции и как следствие - невозможность существования человеческой цивилизации;
- возможные изменения климата и истощение озонового слоя Земли;
- возрастание экологического ущерба от стихийных бедствий и техногенных катастроф;
- недостаточный для перехода к устойчивому развитию человеческой цивилизации уровень координации действий мирового сообщества в области решения экологических проблем и регулирования процессов глобализации;
- продолжающиеся военные конфликты и террористическая деятельность.

В соответствии с доктриной, определяются основные направления мониторинга в глобальном масштабе. Существует несколько международных экологических программ и соответственно направлений научно-практических исследований по развитию мониторинга. Мониторинг в рамках программы ООН по окружающей среде (ЮНЕП) подразделяется на виды: мониторинг климатических условий; мониторинг трансграничного переноса (течениями, воздушными потоками) и осаждения загрязняющих веществ: мониторинг для целей здравоохранения; мониторинг возобновляемых природных ресурсов; мониторинг океана [4].

Некоторые задачи структурных звеньев мониторинга:

1. Оперативный контроль экологического, социального, медико-биологического состояния среды на различных уровнях.
2. Сбор и хранение объективной информации о состоянии окружающей среды, компонент биосферы, здоровья населения.
3. Формирование текущей картины состояния окружающей среды – ситуационный мониторинг.
4. Выявление факторов экологического неблагополучия региона.
5. Подготовка информации, необходимой для принятия управленческих решений, соответствующей экологической обстановке.
6. Выработка управляющего воздействия, направленного на улучшение состояния окружающей среды.

На основании данных мониторинга принимаются решения по улучшению и управлению экологической ситуацией. Система мониторинга развивается вместе с инструментальной системой измерений. Новые методы диагностики показателей и определения эффектов воздействия позволяют расширить спектр регистрации факторов и веществ, влияющих на экосистемные процессы. Они позволяют и более точно определить концентрации загрязняющих веществ в среде, ранее находившиеся в зоне – «ниже метода определения». Математические методы позволяют более точно рассчитать концентрации загрязняющих веществ и выявить зависимости. Методы математического моделирования позволяют смоделировать ситуацию и сделать прогноз. Область применения данных мониторинга расширяется. В настоящее время термин – мониторинг применяется во всех областях научной и практической деятельности.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Беляев В.И. Моделирование морских систем Киев : Наукова думка, 1987. – 204 с.
2. Беляев В.И. Математическое моделирование экологических систем шельфа / Беляев В.И., Кондуфорова Н.В. // Киев: Наукова думка, 1990. - 238 с.
3. Беляев В.И. Основы логико-информационного моделирования сложных геосистем / Беляев В.И., Худошина М.Ю. // Киев: Наукова думка, 1989. - 160 с.
4. Использование водных ресурсов и борьба с загрязнением вод: Тенденции, политика, перспективы. Европейская экономическая комиссия. ООН, Нью-Йорк, 1989. - 54с.
5. Итоги 10-летних санитарно-гидробиологических исследований Севастопольских бухт. ИнБЮМ, Севастополь, 1983. - 146 с.
6. Молисмология Черного моря. Под ред. Поликарпова Г.Г. Киев: Наукова думка, 1992. - 304 с.
7. Павлова С.А. Антропогенные загрязнения морской среды. НПЦ ЭКОСИ -Гидрофизика. Санкт-Петербургский гуманитарный ун-т профсоюзов. Севастопольский филиал, 2002. - 119с.
8. Павлова С.А. Введение в морскую экологию. НПЦ ЭКОСИ - Гидрофизика. Санкт-Петербургский гуманитарный ун-т профсоюзов Севастопольский филиал, 2002. - 300 с.
9. Павлова С.А. Динамические факторы. Некоторые общие методы исследования динамики показателей морских экосистем различного уровня сложности. Симферополь: Издательский центр КГМУ, 2000. - 240 с.
10. Поляхов А.С. «Способ мелиорации прибрежных экосистем» Патент на изобретение № 2541444. Москва:2014», 2014. - 5 с.
11. Экологическая доктрина Российской Федерации (одобрена распоряжением Правительства РФ от 31 августа 2002 г. N 1225-р) [Электронный ресурс] URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_92097/

Список литературы на английском языке / References in English

1. Belyaev V.I. Modelirovanie morskikh sistem [Modeling of Marine Systems] Kyiv: Naukova Dumka, 1987. – 204 p. [in Russian]
2. Belyaev V.I. Matematicheskoe modelirovanie ekologicheskikh sistem shelfa. [Mathematical Modeling of Ecological Shelf Systems] / Belyaev V.I., Konduforova N.V. // Kyiv: Naukova Dumka, 1990. - 238 p. [in Russian]
3. Belyaev V.I. Osnovy logiko-informatsionnogo modelirovaniya slozhnykh geosistem. [Fundamentals of Logical Information Modeling of Complex Geosystems] / Belyaev V.I., Khudoshina M.Yu. // Kyiv: Naukova Dumka, 1989. - 160 p. [in Russian]
4. Ispolzovanie vodnykh resursov i borba s zagriazneniem vod: Tendentsii, politika, perspektivy. [Use of Water Resources and Water Pollution Control: Trends, Policy, Prospects.] Economic Commission for Europe. UN, New York, 1989. - 54 p. [in Russian]
5. Itogi 10-letnikh sanitarno-gidrobiologicheskikh issledovaniy Sevastopolskikh bukht. [Results of 10-year Sanitary and Hydrobiological Research of Sevastopol Bays.] Institute of Marine Biological Research, Sevastopol, 1983. - 146 p. [in Russian]
6. Molismologiya Chernogo moria. [Molismology of the Black Sea.] Ed. by Polikarpova G.G. Kyiv: Naukova Dumka, 1992. - 304 p. [in Russian]
7. Pavlova S.A. Antropogennye zagriazneniya morskoi sredy. [Anthropogenic Pollution of Marine Environment.] Scientific Production Centre ECOSY - Hydrophysics. St. Petersburg Humanitarian University of Trade Unions. Sevastopol branch, 2002. - 119 p. [in Russian]
8. Pavlova S.A. Vvedenie v morskuyu ekologiyu. [Introduction to Marine Ecology.] Scientific Production Centre ECOSY - Hydrophysics. St. Petersburg Humanitarian University of Trade Unions. Sevastopol branch, 2002. - 300 p. [in Russian]
9. Pavlova S.A. Dinamicheskie faktory. [Dynamic Factors.] General Methods for Studying the Dynamics of Marine Ecosystems Indicators of Different Complexity Levels. Simferopol: Publishing Center of KSMU, 2000. - 240 p. [in Russian]
10. Polyakhov A.S. "Sposob melioratsii pribrezhnykh ekosistem" Patent na izobretenie № 2541444. [Method for Melioration of Coastal Ecosystems" Patent for invention No. 2541444] Moscow: 2014, 2014. - 5 p. [in Russian]
11. Ekologicheskaya doktrina Rossiiskoi Federatsii (odobrena rasporyazheniem Pravitelstva RF ot 31 avgusta 2002 g. N 1225-r) [Ecological Doctrine of the Russian Federation (approved by the order of the Government of the Russian Federation of August 31, 2002 No. 1225-r)] [Electronic resource] URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_92097/ [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.015>**АНАЛИЗ ЛИТОЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА И КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД ПЛАСТОВ АЧИМОВСКОГО ГОРИЗОНТА (АЧ₁, АЧ₂, АЧ₃) АЛЕХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ХМАО-ЮГРЫ**

Научная статья

Гамидуллаева А.З.¹, Романова Т.И.^{2,*}^{1,2} Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия

* Корреспондирующий автор (s_pavlova[at]mail.ru)

Аннотация

Изучены условия формирования отложений ачимовского горизонта неокома. Рассмотрены особенности изменения физических свойств (проницаемость, пористость) ачимовских отложений с глубиной в пределах Алехинского месторождения. Проведен анализ изменений фильтрационно-емкостных свойств нефтегазоносных отложений ачимовской свиты на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Установлено, что представленные мелкозернистыми песчаниками и крупнозернистыми алевролитами породы ачимовской толщи обладают неравномерными изменениями фильтрационно-емкостных свойств, обусловленными сложными геологическими условиями образования отложений.

Ключевые слова: залежь, нефть, породы-коллекторы, фильтрационно-емкостные свойства, пористость, проницаемость.

ANALYSIS OF LITHOLOGICAL COMPOSITION AND COLLECTIVE PROPERTIES OF BREEDS OF ACHIMOVSKY HORIZON ROCK BEDS (ACh₁, ACh₂, ACh₃) OF ALEKHINSKY PRODUCTION FIELD OF KHAMAO-UGRA

Research article

Gamidullaeva A.Z.¹, Romanova T.I.^{2,*}^{1,2} Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

* Corresponding author (s_pavlova[at]mail.ru)

Abstract

The conditions of the formation of deposits of the Achimov Neocomian horizon are studied in the article. Specific features of the change in physical properties (permeability, porosity) of Achimov deposits that come with the change of depth within the Alekhinsky deposit are considered. The analysis of changes in the formation reservoir properties of the oil and gas bearing deposits of the Achimov suite in the territory of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug, Yugra, is carried out. It is established that the rocks of the Achimov rock bed represented by compacted sand and coarse-grained siltstones exhibit uneven changes in the formation reservoir properties due to the complex geological conditions of the deposits formation.

Keywords: deposit, oil, reservoir rock, formation reservoir properties, porosity, permeability.

В настоящее время одной из основных задач нефтегазового комплекса является воспроизводство минерально-сырьевой базы углеводородного сырья, повышение эффективности разведки, разработки и добычи нефти и газа. При этом большое внимание уделяется освоению глубоко залегающих горизонтов, которые относятся к трудноизвлекаемым запасам и, как правило, характеризуются сложным геологическим строением и низкими коллекторскими свойствами. К таким сложным объектам относятся отложения ачимовской свиты нижнемелового возраста, расположенные на территории Ханты-Мансийского автономного округа - Югра в Западной Сибири.

Ачимовский нефтегазоносный комплекс, залегающий в основании разреза неокома, является объектом геолого-геофизического изучения на протяжении длительного времени [1, С. 4], [9, С. 71], [10, С. 228]. В ачимовских пластах в настоящее время открыто более 100 залежей нефти, газа и конденсата, многие из них относятся к крупным [11, С. 196].

На Алехинском месторождении в пределах ачимовского горизонта выделено 3 продуктивных пласта: АЧ₁, АЧ₂, АЧ₃, отложения которых охарактеризованы керном в 14 скважинах.

На территории большей части Западно-Сибирской плиты формированию ачимовской толщи в течение нескольких миллионов лет предшествовала глубоководная морская обстановка [7, С. 12]: в условиях некомпенсированного седиментогенеза отлагались глауконитовые и битуминозные глины георгиевской, баженовской свит. В дальнейшем, как показали исследования [1, С. 17-37], [7, С. 14-15], [9, С. 77], осадконакопление происходило либо в условиях морского мелководья, либо песчано-алевритовые пласты ачимовской толщи формировались при боковом заполнении некомпенсированного морского бассейна.

В пределах Алехинского месторождения породы ачимовского горизонта представлены чередованием песчано-алевритовых, карбонатных и глинистых прослоев, разделяющих отложения на серию продуктивных пластов АЧ₁-АЧ₃. Пласты сформировались в относительно глубоководной части морского бассейна и представляют собой подводные конусы выноса на переднем склоне дельтовой платформы [8, С. 147]. Каждый из пластов состоит из нескольких отдельных линз или конусов выноса, отлагавшихся с некоторым смещением относительно друг друга. Образование конусов выноса происходило при периодически возникающих сбросах накапливаемого на кромке дельтовой платформы терригенного материала. Глинистые отложения представлены в основном отложениями мутьевых потоков и нормальными гемипелагическими осадками. Поступление терригенного материала в течение всего времени формирования ачимовской толщи происходило с северо-востока. В целом осадконакопление всей толщи, включая

породы-коллектора и глинистые разности, происходило в сходных условиях, что обусловило близость всех пластов по своим литологическим и петрофизическим свойствам [8, С. 198-201].

Проницаемые прослои ачимовского комплекса представлены песчаниками мелкозернистыми и алевролитами крупнозернистыми, реже мелко-крупнозернистыми. Преобладающим размером обломков в песчаниках являются фракции в пределах 0,10-0,14 мм, в алевролитах – 0,06-0,09 мм. Степень сортированности обломочного материала меняется от средней до хорошей, но отмечаются прослои с плохой сортировкой зерен. Породы светло-серые и серые, нефтенасыщенные разности с буроватым оттенком, чаще с карбонатно-глинистым, реже глинисто-карбонатным и глинистым цементом. Отмечены разнообразные типы слоистости: горизонтально-слоистые, линзовидно-слоистые, градиционные. Слоистость обусловлена изменением зернистости, наличием линзочек более мелкозернистого материала, подчеркивается намывами слюдистого материала. Характерны текстуры оползания и смятия осадка. Песчаники и алевролиты нередко содержат неокатанные или слабо окатанные обломки аргиллитов. Содержание цемента в породах-коллекторах изменяется от 5-7% до 10-12%. Наиболее распространены пленочно-поровый и порово-пленочный типы цемента, локально имеет место кварцевый конформно-регенерационный тип. По составу цемент глинистый хлоритово-каолинистый с примесью карбонатного материала. Для ачимовских пород характерным является замещение пелитоморфным сидеритом биогитовых чешуек, при этом чешуйки слюды деформируются, разбухают и частично выполняют прилегающее поровое пространство. Количество аутигенного сидерита достигает в отдельных прослоях 16-17%.

Месторождения углеводородов локализуются в породах, которые отличаются от других повышенным объемом порового, трещинного или карстового пространства. Их физические параметры зависят от таких факторов как литологический состав пород, пористость, проницаемость, температура, давление и др. [6, С. 104], [11, С. 197].

Одними из главных фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов являются пористость и проницаемость, так как пористость горной породы – это наличие в ней пустот (пор, каверн, трещин), не заполненных твердым веществом, а для того чтобы пористая среда могла пропускать жидкость или газ при перепаде давления, она должна обладать проницаемостью. Фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) пластов ачимовского комплекса Алейнского месторождения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Средние значения коллекторских свойств ачимовских отложений Алейнского месторождения

Пласт	Пористость, %	Проницаемость, 10^{-3} мкм ²	Водоудерживающая способность, %	Абсолютная отметка глубины пласта, м
Ач ₁	16,3	3,9	55	2671
Ач ₂	16,5	5	56	2682
Ач ₃	16	3,5	60	2694

Явной зависимости значений таких свойств, как пористость и проницаемость, от глубины не обнаружено, породы пласта Ач₂ обладают самыми высокими значениями пористости и проницаемости, в отличие от пластов Ач₁ и Ач₃. А водоудерживающая способность пород, наоборот, связана с глубиной прямой зависимостью. Водоудерживающая способность пород пласта Ач₃, в соответствии с низкими ФЕС, довольно высокая – 60%, это четко свидетельствует о том, что качество коллекторских свойств толщи значительно хуже и что большая часть порового пространства в условиях пласта занята водой, размеры пор чаще небольшие, а глинистость выше, чем в отложениях Ач₁ и Ач₂.

Породы ачимовской толщи на территории ХМАО-Югры не имеют повсеместного распространения [3, С. 9], [10, С. 230], [8], встречаются в центральной и восточной частях округа (рис.1). Исследование характера изменений фильтрационно-емкостных свойств ачимовского горизонта в пределах Фроловской и Среднеобской нефтегазоносных областей с учетом данных по другим месторождениям округа показало [5], что глубина залегания исследуемых отложений увеличивается с юга на север (табл.2).



Рис. 1 – Карта нефтегазгеологического районирования территории Ханты-Мансийского автономного округа [8]:

1 – границы ХМАО, 2 – границы НГО, 3 – границы НГР, 4 – площадь месторождения и его название:

I– Выинтойское, II– Западно-Котухтинское, III– Конитлорское, IV– Алахинское, V– Восточно-Студеное, VI– Западно-Камыновское, VII– Приобское, VIII– Малобалыкское, IX– Западно-Варьганское

Пористость пород пласта Ач₁ на рассматриваемых участках примерно одинаковая и варьирует в пределах 15-16,5%, кроме Конитлорского месторождения (рис.2-а). На этом месторождении отложения ачимовской свиты (Ач₁, Ач₂, Ач₃) характеризуются максимальными значениями пористости (рис.2-а,б,в), по сравнению с другими месторождениями, равные в среднем 19,1%. Явной зависимости данного параметра от глубины залегания пласта не обнаружено. Максимальными показателями пористости обладают пласты на участках Конитлорского (III), Малобалыкского (VIII) и Восточно-Студеного (V) месторождений (по убывающей). Пласт Ач₃ расположен глубже остальных двух (Ач₁, Ач₂), а с глубиной осадочного разреза коллекторские свойства ухудшаются в результате литификации. Так и на рассматриваемых нами участках породы пласта Ач₃ обладают самыми низкими показателями пористости (рис.2-в).

Таблица 2 – Коллекторские свойства пластов ачимовского горизонта месторождений ХМАО

Пласт	Пористость, %	Проницаемость, 10 ⁻³ мкм ²	Водоудерживающая способность, %	Абсолютная отметка глубины пласта, м
1	2	3	4	5
I - Выинтойское месторождение				
Ач ₁	16,5	3,8	52,6	2873
Ач ₂	17	1,8	53	2885
Ач ₃	16	1,2	64	2905
II - Западно-Котухтинское месторождение				
Ач ₁	16,3	4	48,5	2806
Ач ₂	17	5,5	56	2818
Ач ₃	15,7	1,5	63	2830
III-Конитлорское месторождение				
Ач ₁	19	3,8	53	2386
Ач ₂	20	1,8	55	2587
Ач ₃	18,3	1,2	65	2615
V - Восточно-Студеное месторождение				
Ач ₁	16,9	4	51,9	2668
Ач ₂	18	5,5	55,5	2727
Ач ₃	16	1,5	65,4	2751

Продолжение таблицы 2 – Коллекторские свойства пластов ачимовского горизонта месторождений ХМАО

Пласт	Пористость, %	Проницаемость, 10^{-3} мкм ²	Водоудерживающая способность, %	Абсолютная отметка глубины пласта, м
1	2	3	4	5
VI - Западно-Камынное месторождение*				
Ач ₁	15	2	53	2792
Ач ₂	16	2,5	55,7	2810
Ач ₃	15,5	1	63,8	2835
VII - Приобское месторождение				
Ач ₁	16,05	3,8	55	2632
Ач ₂	16	3,8	60,8	2687
Ач ₃	15,4	1,19	62	2779
VIII - Малобалыкское месторождение				
Ач ₁	16,9	1	47,9	2595
Ач ₂	18	3	51,2	2642
Ач ₃	16,5	1	65,4	2696
IX - Западно-Варьганское месторождение				
Ач ₁	15,9	3,8	50,8	2798
Ач ₂	17	3,8	56,5	2826
Ач ₃	16	1,19	65,4	2856

Примечание: данные взяты из [2, С.156-157].

Проницаемость пород ачимовского комплекса непостоянна. Максимальными показателями проницаемости (рис.2-г,д) характеризуются пласты Ач₁ и Ач₂ на месторождениях Западно-Котухтинское (II) и Восточно-Студеное (V). Проницаемость пласта Ач₃ на всех рассмотренных участках примерно одинакова, ее показатели изменяются в пределах 1-2%. Высокие значения проницаемости пород, включая Ач₃, наблюдаются в пластах ачимовского комплекса на Алехинском месторождении (IV), где среднее значение составляет $4,1 \cdot 10^{-3}$ мкм² (рис.2-г,д,е). Как показали исследования, наиболее проницаемыми на севере Среднеобской нефтегазовой области являются пласты Ач₁ и Ач₂ (табл. 2).

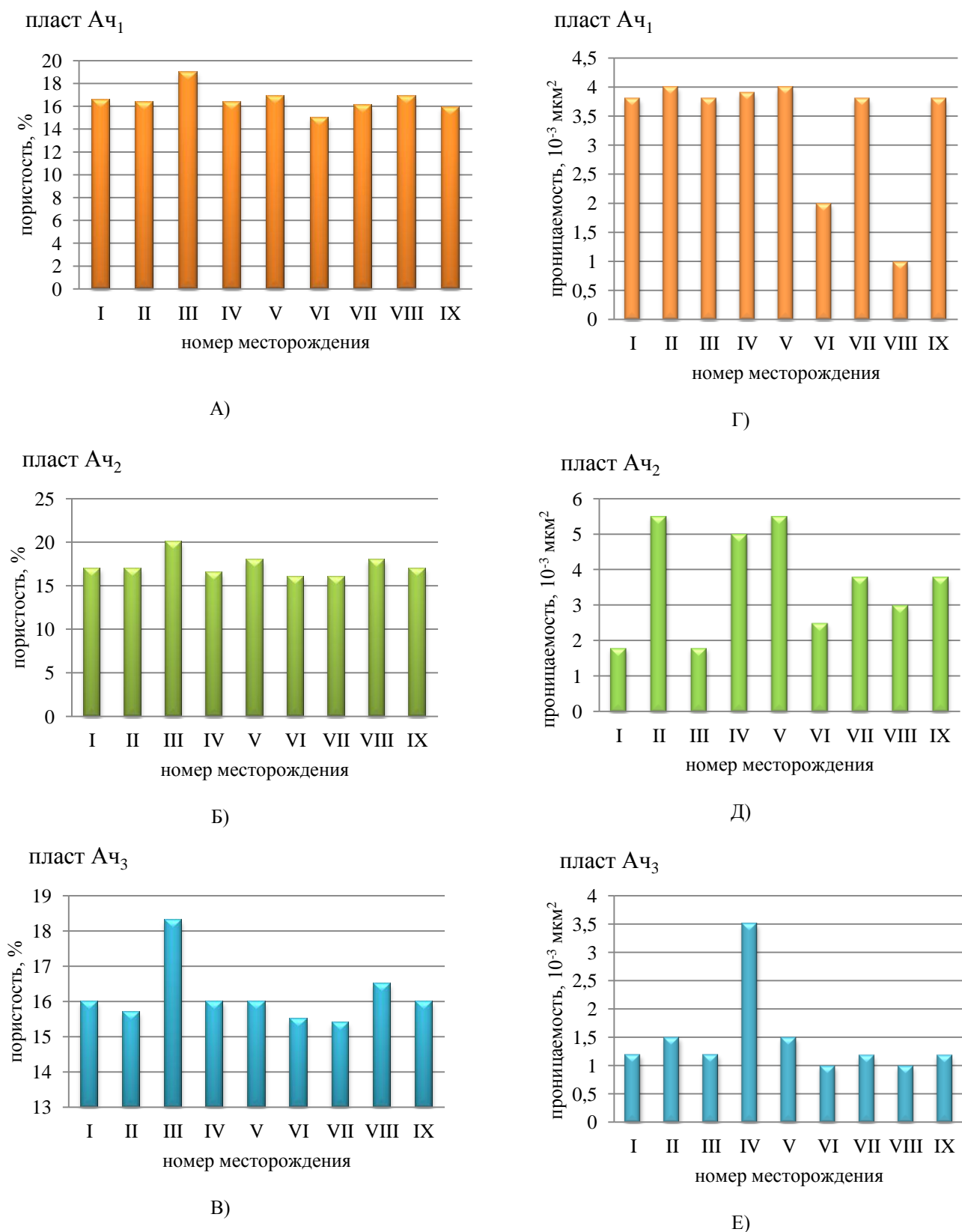


Рис. 2 – Пористость и проницаемость пластов Ач₁, Ач₂, Ач₃ на месторождениях:
 I - Выинтойское, II - Западно-Котухтинское, III - Конитлорское, IV - Алехинское, V - Восточно-Студеное, VI - Западно-Камыньское, VII - Приобское, VIII - Малобалыкское, IX - Западно-Варьганское

На основании выше сказанного можно отметить, что продуктивные породы ачимовской толщи представлены мелкозернистыми песчаниками и крупнозернистыми алевролитами. В пределах Алехинского (IV) месторождения фильтрационно-емкостные свойства изменяются неравномерно. Однако, наблюдается определенный рост параметров пористости и проницаемости отложений ачимовского комплекса с севера на юг до центральной части общей площади исследований (относительный максимум отмечен на территории Восточно-Студеного (V) месторождения), затем коллекторские свойства ухудшаются. Это обусловлено неоднозначными геологическими условиями залегания отложений ачимовской толщи [4, С. 19-20], а именно косослоистым строением пород, образующими протяженные субмеридионально ориентированные геологические тела, осложненные дизъюнктивной тектоникой.

Несмотря на это, песчаники ачимовского комплекса являются первой коллекторской толщей на пути миграции нефти и газа из нефтематеринских пород баженской свиты в шельфовые комплексы неокома [5]. Следовательно, перспективы нефтегазоносности этой толщи предполагаются высокими [11, С. 199].

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Бородин В. Н. Модель формирования и текстурные особенности пород ачимовского комплекса севера Западной Сибири / В.Н. Бородин, А. Р. Курчиков, А. В. Мельников и др. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – 84 с.
2. Волков В. А. Атлас месторождений нефти и газа Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. В 2 т. Т.1 / В. А. Волков, В. А. Шпилман и др. Тюмень-Ханты-Мансийск: Изд-во «ИздатНаукаСервис», 2013. – 236 с.
3. Волков В. А. Атлас месторождений нефти и газа Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. В 2 т. Т.2 / В. А. Волков, В. А. Шпилман и др. Тюмень-Ханты-Мансийск: Изд-во «ИздатНаукаСервис», 2013. – 308 с.
4. Жарков А. М. Неантиклинальные ловушки углеводородов в нижнемеловой клиноформной толще Западной Сибири / А. М. Жарков // Геология нефти и газа – 2001. №1. – С. 18 -23.
5. Жарков А. М. Особенности геологического строения и прогноз распространения залежей углеводородов ачимовской толще Западной Сибири [Электронный ресурс] / А. М. Жарков // Нефтегазовая геология. теория и практика. – 2016. – Т. 11. – №4. – URL: http://www.ngtp.ru/rub/4/51_2016/pdf (дата обращения: 23.07 2018).
6. Зеливянская О. Е. Петрофизика: учебное пособие / О. Е. Зеливянская. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2015. – 111 с.
7. Максимов Е. М. Строение и условия формирования ачимовской толщи Западно-Варьганского месторождения / Е. М. Максимов, Ю. А.Тренин, Т. И.Романова // Геология нефти и газа. – 1991. – № 2 – С.12-15.
8. Проект разработки Алехинского месторождения; исполн.: С.В. Соколов[и др.]. – Тюмень, 2008. – 220 с.
9. Ростовцев В. Н. Ачимовская пачка юго-востока Западной Сибири / В. Н. Ростовцев, С. Н. Резник // Известия Томского Политехнического Университета – 2002. – Т. 305, вып.8. – С. 71-78.
10. Салаватов С.Ю. Некомские отложения Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции / С. Ю. Салаватов // Международный научный журнал «Молодой ученый» – 2017. – № 2 (136). – С. 228-230.
11. Севастьянов А. А. Особенности строения и оценка потенциала ачимовских отложений на территории ХМАО - Югры /А. А. Севастьянов, К. В. Коровин, О.П. Зотова и др. // Успехи современного естествознания. – 2016. – №8. – С. 195-199.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Borodkin V.N. Model formirivaniy i texturnye ossobennosty porod achimovskogo kompleksa severa Zapadnoy Sibiri [Formation model and textural features of breeds of an achimovsky complex of the North of Western Siberia] / Borodkin V.N., Kurchikov A. R., Melnikov A.V. and others // Tyumen: TyumGNGU [Tyumen: TSOGU] –2011. – 84 pages. [in Russian]
2. Volkov V.A. Atlas mestorozhdeniy nefti i gaza Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga. [Atlas of oil and gas fields of Khanty-Mansi Autonomous Okrug.] / Edition: V.A. Volkov, V.A. Szpilman. Volume 1. // Tyumen - Khanty-Mansiysk: Izdatelstvo "IzdatNaukaCervis" [Tyumen-Khanty-Mansiysk: Izdatnaukaservice publishing house]. – 2013. – 236 pages.[in Russian]
3. Volkov V.A. Atlas mestorozhdeniy nefti i gaza Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga. [Atlas of oil and gas fields of Khanty-Mansi Autonomous Okrug.] / Edition: V.A. Volkov, V.A. Szpilman. Volume 2. // Tyumen - Khanty-Mansiysk: Izdatelstvo "IzdatNaukaCervis" [Tyumen-Khanty-Mansiysk: Izdatnaukaservice publishing house]. –2013. – 308 pages. [in Russian]
4. Zharkov A. M. Neantiklinalhyi lovushky uglevodorodov v nizhnemelovoy klinofornoy tolche Zapadnoy Sibiri [Not anticlinal traps of hydrocarbons in Lower Cretaceous klinoforn thickness of Western Siberia] / A. M. Zharkov //Geologiya nefti i gaza [Geology of oil and gas]– 2001. №1. – P. 18 -23.
5. Zharkov A. M. Osobennosty geologicheskogo stroeniya i prognoz rasprostraneniya zalezhey uglevodorodov achimovskoy tolchy Zapadnoy Sibiri [Features of a geological structure and forecast of distribution of hydrocarbons deposits to achimovsky thickness of Western Siberia] [Electronic resource] / A. M. Zharkov //Oil and gas geology. Theory and practice.– 2016. – V. 11. – №4. – URL: http://www.ngtp.ru/rub/4/51_2016/pdf (accessed: 23.07 2018).[in Russian]
6. Zelivyanskaya O.E. Petrofysika: uchebnoe posobie [Petrophysicist: manual]. // Stavropol: Izdatelstvo SKFU [Stavropol: SKFU publishing house] - 2015. – 111 pages. [in Russian]
7. Maximov E. M. Stroyeniye i usloviya formirovaniya achimovskoy tolchy Zapadno-Varyeganskogo mestorozhdeniya [Construction and formation conditions of achimovsky thickness of the West Varyegansky field] / Maximov E. M., Trenin Yu. A., Romanova of T.I. // Geologiy nefti i gaza. No. 2 [Geology of oil and gas. No. 2 February] - 1991. – P. 12-15. [in Russian]
8. Proekt razrabotki Alekhinskogo mestorozhdeniya. [Sokolov C.V., Kuznetsov A.E. Project of development of the Alekhinsky field]. – Tyumen – 2008.– 220 pages. [in Russian].
9. Rostovtsev V.N. Achimovskaya pachka jugo-vastoka Zpadnoy Sibiri [Achimovskaya a pack of the southeast of Western Siberia] / V.N. Rostovtsev, S.N. Reznik // News of the Tomsk Polytechnic University – 2002. – V. 305 (8). – P. 71-78.[inRussian].
10. Salavatov S. Yu. Neomskie otlozheniya Zapadno-Sibirskoy neftegazonosnoy provincyi. [Neocomian deposits of the West Siberianoil-and-gasprovince] // Mezhenarodniy nauchniy zhurnal "Molodoy ucheny" No2 (136) yanvar 2017. [International scientific magazine "Molodoy Ucheny" No. 2 (136), January, 2017]. – P. 228-230. [in Russian]
11. Sevastyanov A. A. Osobennosty ctroeniya i ocenka potenciala achimovskih otlozheniy na territoriy HMAO-Ugry [Features of a structure and assessment of capacity of achimovsky deposits in the territory of KhMAO - Yugra] / A.A. Sevastyanov, K.V. Korovin, and others. //Achievements of the modern natural sciences. – 2016. – No. 8. – P. 195-199. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.016>**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ТЕХНОГЕННО-МИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ**

Научная статья

Наумов В.А.¹, Фиоруччи А.², Голдырев В.В.³, Брюхов В.Н.^{4*}, Фетисов В.В.⁵^{1, 3, 4, 5} Пермский Государственный Национальный Исследовательский Университет, Пермь, Россия;² Туринский Политехнический университет, Турин, Италия;

* Корреспондирующий автор (vittter[at]inbox.ru)

Аннотация

В статье рассматриваются процессы формирования техногенно-минеральных образований (ТМО) - техногенез и последующего преобразования состава и строения ТМО - техногенез. Техногенез изучен авторами на примере золотоносных техногенных россыпей. Процессы преобразования ТМО приводят к высвобождению, переносу и аккумуляции золотоносных фаз внутри техногенных отвалов. Управление процессами техногенеза ведет к созданию природоподобных технологий добычи. Выделены направления по управлению формированием концентраций золота в ТМО. Проведены эксперименты по аккумуляции золота на геохимических барьерах.

Ключевые слова: техногенез, техногенез, золото, аккумуляция, природоподобные технологии.

SCIENTIFIC BASIS OF GEOLOGICAL PROCESS CONTROL IN TECHNOGENIC MINERAL FORMATIONS

Research article

Naumov V.A.¹, Fioruchchi A.², Goldyrev V.V.³, Bryukhov V.N.^{4*}, Fetisov V.V.⁵^{1, 3, 4, 5} Perm State National Research University, Perm, Russia;² Turin Polytechnic University, Turin, Italy

* Corresponding author (vittter[at]inbox.ru)

Abstract

The article presents the forming processes of technogenic and mineral formations (TMFs) – technogenesis and subsequent transformation of the composition and structure of TMF – technogenesis. The authors studied technogenesis on the example of gold-bearing technogenic placers. The processes of TMF conversion lead to the release, transfer, and accumulation of gold-bearing phases inside man-made dumps. Management of the processes of technogenesis leads to the creation of nature-like production technologies. Directions on the management of the formation of gold concentrations in TMFs were allocated. Experiments on the accumulation of gold on geochemical barriers were carried out.

Keywords: technogenesis, gold, accumulation, nature-like technologies.

Геология техногенно-минеральных образований (ТМО) направлена на изучение условий формирования, преобразования и осознанного управления составом вещества ТМО и выработанного пространства. В этих условиях ее основной задачей следует считать возможность перевода «неполезных» ископаемых в полезные. ТМО представляют собой результат геологической и горнотехнической деятельности человечества.

ТМО традиционно рассматривают как техногенные отвалы, техногенные и технологические отходы, техногенное минеральное сырье и техногенный минеральный ресурс. Техногенно-минеральные образования являются потенциальным источником для увеличения минерально-сырьевой базы регионов и мира в целом. На данный момент времени многими предприятиями–недропользователями ведется использование техногенных объектов в связи с истощением природных месторождений полезных ископаемых.

Современный подход геологов к комплексному освоению вещества месторождений и снижению экологических нагрузок реализуется идеей повторной разработки ТМО. Решение данной задачи возможно с учетом современных представлений о ТМО как продуктах геологической деятельности человека. При таком подходе к ТМО мы не имеем право отождествлять их с отходами производства. Их следует рассматривать как промежуточный продукт, технологический резерв месторождения, пригодный для последующего использования.

Среди геологических процессов связанных с ТМО различают: 1) процессы формирования ТМО, или собственно техногенез; 2) геологические процессы преобразования состава и строения, протекающие в ТМО – техногенез. Учитывая, что процессы техногенеза и техногенеза являются управляемыми (зависят от деятельности человека), можно выделить и 3) процессы техногенного рудогенеза – осознанного формирования заданных характеристик строения и направлений изменения состава ТМО [5], [7]. Техногенный рудогенез имеет прикладное значение и базируется на знаниях процессов техногенеза и техногенеза.

Техногенез или формирование ТМО происходит в результате процессов механической дифференциации и интеграции. Законы распределения вещества и полезных компонентов в отвалах не зависят от состава природного материала (рыхлые отложения россыпей или продукт дробления коренных руд). При этом формируются техногенные фации трех типов: намывная, отвальная (насыпная) и отвально-намывная [4]. Под техногенной фацией мы понимаем – продукт аккумуляции ТМО, сформированный при технической деятельности человека в процессе разработки месторождений.

Строение и состав осадков в техногенных фациях имеет закономерный характер распределения вещества в соответствии с системой их формирования. Распределение полезных компонентов (на примере золота), не извлеченных по разным причинам в процессе обогащения, изучены на техногенных объектах с широкой географией (Урал, Сибирь, Якутия, Дальний Восток, Канада (Yukon Territory, Klondike)).

Следует отметить, что потери полезных компонентов (свободного золота) и формирование их концентраций в ТМО идет дискретно. Различают потери, обусловленные геологическими (высокая глинистость, песчанность материала и др.) и технологическими причинами. Последние могут образовываться в период обогащения материала с наиболее высокими концентрациями золота при нарушении технологических схем обогащения или неправильной работы обогатительного оборудования.

Техногенез выражается в процессах новообразования минералов, преобразовании вещества и полезных компонентов под действием внутренних и внешних факторов геологической среды. Как геологический экзогенный процесс - техногенез отличает наличие в ТМО разрушения пород и минеральных фаз; транспортировка материала и перенос химических элементов в растворенной форме; аккумуляция и образование новых минеральных и петрографических разновидностей.

Проявление техногенеза в отвалах обусловлено механической, физико-химической и биохимической дифференциацией и интеграцией вещества, включая полезные компоненты. Велика здесь роль поверхностных, отвальных, рудных, подрудных, техногенных вод, развитых в пределах ТМО. При насыщении их полезными компонентами в процессе техногенеза они могут рассматриваться как гидроминеральное сырье, имеющее практическую значимость. Такие воды формируются в ТМО образованные при отработке сульфидных месторождений, содержащих медь, железо, мышьяк, ртуть, золото, серебро и др.

Понятие «техногенный рудогенез» представляет геологический процесс создания природой или человеком новых рудных объектов из техногенных осадков, в результате процессов техногенеза и последующего техногенеза [6]. Техногенный рудогенез изучен авторами на примере техногенных россыпей Юкона, где происходит формирование железистых конгломератов с новообразованным самородным золотом.

Золотоносные техногенные россыпи – частный случай более общего понятия «техногенно-минеральные образования (ТМО)»

К 2016г в мире добыто около 180 тыс. тонн золота [Thomson Reuters GFMS]. При этом сформировано до 600 млрд. тонн ТМО, в которых сохраняется по разным оценкам от 10 до 40 % не извлеченного золота со средним содержанием 0,2–0,5 г/т. Для примера, среднее содержание золота в золото-порфировых месторождениях-гигантах, таких как Pebble Copper (Alaska), Bingham (Utah), Oyu Tolgoi (Mongolia) составляет 0,35–0,5 г/т.

Золото в ТМО встречается в разных агрегатных состояниях и разных формах нахождения. Наиболее хорошо изучена твердая фаза: свободное, связанное в минералах, в сростках, "пленочное" и сорбированное на минералах. Менее изучено золото в растворах: отвальных, рудничных и подрудничных водах, рассолах, нефтях.

Техногенез золота в техногенных образованиях (растворение (разрушение), перенос, аккумуляция) приводит к перераспределению металла и в ряде случаев приводит к образованию зон концентрации. Управление процессами техногенеза преследует следующие основные задачи:

- аккумуляция полезных компонентов с целью последующего их извлечения (природоподобные технологии добычи);

- создание природоподобных систем защиты окружающей среды.

Выделены следующие направления по управлению формированием концентраций золота в ТМО:

- 1) Механическая дифференциация, создание механических барьеров - концентрация металла в локальной зоне отвалов путем формирования механических барьеров-ловушек;

- 2) Биохимическая дифференциация, образование пленок на поверхности золота и других металлов;

- 3) Физико-химическая дифференциация, создание геохимических барьеров в зонах разгрузки золотосодержащих техногенных вод (гидроминеральное сырье).

На данный момент времени авторами изучается прикладной аспект физико-химической дифференциации золота в рамках выполнения работ в составе международной исследовательской группы с итальянскими коллегами.

Разработаны теоретические основы механизмов растворения и переотложения золота. Растворение золота происходит цианидами Na или K, кислыми растворами тиомочевина и хлорной воды, гуминовыми и фульвокислотами, водными растворами FeCl_2 , $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$, CuCl , CuSO_4 , NaCl , HCl , H_2SO_4 . Перенос золота происходит рудными, отвальными и подотвальными водами. Осаждение золота происходит на геохимических барьерах

Проведены эксперименты по аккумуляции золота на следующих геохимических барьерах:

- 1) Карбонатный - для кислых вод. Зафиксировано восстановление растворенного золота до самородного на карбонатном барьере в бетонном отстойнике (Урал, Исовский прииск).

- 2) Углистый [10]. Получены результаты экспериментов позволяющие подтвердить направленность процесса сорбции золота, механизмы его накопления и распределения частиц нанозолота на угольной поверхности.

- 3) Электрохимическом на металлической сетке. Зафиксировано осаждение золота из техногенных вод на медной проволоке за счет природного электролиза (Урал, Исовский прииск).

На территории Северной Италии и Урала выбраны эталонные техногенные объекты на которых изучается состав и зональность техногенных и рудничных вод. Одним из объектов является законсервированное скарное железорудное месторождение с наличием зон арсенипиритовой минерализации, расположенное в Южных Альпах. Другой объект – отвалы полиметаллического объекта Восточного Урала. На объектах отобраны пробы отвальных, подотвальных и рудничных вод для определения величины золотой минерализации. На объектах планируются эксперименты по формированию искусственных углистых барьеров в виде капсульных модулей.

Процессы техногенеза в золотосодержащих техногенно-минеральных образованиях ведут к образованию «обогачительных фабрик в недрах», где внутри техногенных объектов протекают природные процессы перераспределения вещества. В результате этих процессов происходит высвобождение, растворение, миграция, регенерация и восстановление (рост) золотоносных фаз, в том числе и в форме гравитационно извлекаемого золота.

Пути управления процессами техногенеза авторы видят следующие:

- 1) Усиление процессов техногенеза (обеспечение циркуляции техногенных вод; активизация разложения сульфидов и т.д.);
- 2) Формирование механических и химических барьеров внутри техногенных образований для аккумуляции полезных компонентов.
- 3) Проектирование строительства площадок для размещения техногенных образований с учетом систем управления.

В целом, изучение процессов формирования техногенно-минеральных образований имеет важное теоретическое и практическое значение. Правильный подход к использованию ТМО позволяет разработать целый ряд природоподобных технологий, которые будут более эффективные и экологичные, чем экстенсивный путь освоения новых месторождений.

Финансирование

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной в рамках научного проекта международной исследовательской группой на базе Пермского государственного национального исследовательского университета «Разработка природоподобной технологии формирования концентраций полезных компонентов внутри техногенных отвалов путем управления процессами техногенеза».

Funding

The article presents the results of the work carried out within the framework of the scientific project by the international research team on the basis of the Perm State National Research University "Development of a nature-like technology for the formation of concentrations of useful components within man-made dumps by controlling the processes of technogenesis".

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Ковлеков И.И. Техногенное золото Якутии. М: Горная книга, 2002. 303 с.
2. Макаров В.А. Геолого-технологические основы ревизии техногенного минерального сырья на золото. Красноярск: ООО «Поликом», 2001. 132 с.
3. Мирзеханова З.Г. Техногенные образования россыпных месторождений золота: ресурсно-экологические аспекты отработки / Мирзеханова З.Г., Мирзеханов Г.С., Дебелая И.Д. // Хабаровск, ДВО РАН, 2014. 297 с.
4. Наумов В.А. Особенности формирования и распределения благородных металлов в техногенных россыпях и отвалах Урала // Горный журнал. Известия высших учебных заведений. 1994. № 8. С. 39–50.
5. Наумов В.А. Концепция управления формированием месторождений на примере техногенных россыпей золота // Естественные и технические науки. 2010. № 2. С. 262–265.
6. Наумов В.А. Минерогения, техногенез и перспективы комплексного освоения золотоносного аллювия. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Пермский государственный университет. Пермь, 2010. 42 с.
7. Наумов В.А. О направленном формировании россыпных месторождений золота (постановка проблемы) / Наумов В.А., Наумова О.Б. // Важнейшие промышленные типы россыпей и месторождений кор выветривания, технология оценки и освоения: матер. XI Межд. совещ. Москва-Дубна, 1997. С. 150.
8. Перепелицын В.А. Техногенное минеральное сырье Урала / Перепелицын В.А., Рывтин В.М., Коротеев В.А. // Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. 332 с.
9. Naumov V. A new insight into origin of the Yukon placer gold / Naumov V., LeBarge W., Kovin O. // The 45th International October Conference on Mining and Metallurgy. BorLakeBor (Serbia), 2013. 4 p.
10. Наумов В.А. О механизме сорбции наночастиц золота углистым материалом / Наумов В.А., Осовецкий Б.М. // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Пермь, 2013. С. 43–48.

Список литературы на английском / References in English

1. Kovlekov I.I. Tekhnogennoye zoloto Yakutii [Technogenic Gold of Yakutia]. M: Gornaya kniga, 2002. 303 p. [in Russian]
2. Makarov V.A. Geologo-tekhnologicheskiye osnovy revizii tekhnogen'nogo mineral'nogo syr'ya na zoloto [Geological and Technological Bases of Revision of Technogenic Mineral Raw Materials for Gold]. Krasnoyarsk: Polikom Ltd., 2001. 132 p. [in Russian]
3. Mirzekhanova Z.G. Tekhnogennyye obrazovaniya rossypnykh mestorozhdeniy zolota: resursno-ekologicheskiye aspekty otrabotki [Technogenic Formations of Alluvial Gold Deposits: Resource-Ecological Aspects of Mining.] / Mirzekhanova Z.G., Mirzekhanov G.S., Debelaya I.D. // Khabarovsk, FEB RAS, 2014. 297 p. [in Russian]
4. Naumov V.A. Osobennosti formirovaniya i raspredeleniya blagorodnykh metallov v tekhnogennykh rossypakh i otvalakh Urala [Features of Formation and Distribution of Precious Metals in Technogenic Placers and Dumps of Urals] // Gornyy zhurnal. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy [Mining Journal. News of higher educational institutions]. 1994. No. 8. P. 39-50. [in Russian]
5. Naumov V.A. Kontseptsiya upravleniya formirovaniyem mestorozhdeniy na primere tekhnogennykh rossypey zolota [Concept of Managing Formation of Deposits on Example of Technogenic Gold Placers] // Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki [Natural and technical sciences]. 2010. – No. 2. – P. 262-265. [in Russian]
6. Naumov V.A. Minerageniya, tekhnogenez i perspektivy kompleksnogo osvoyeniya zolotonosnogo allyuviya. Avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchenoy stepeni doktora geologo-mineralogicheskikh nauk [Minerageny, Technogenesis

and Prospects of Complex Development of Gold-bearing Alluvium]. abstract of Dis. ... of PhD in Geology and Mineralogy / Perm State University. Perm, 2010. 42 p. [in Russian]

7. Naumov V.A. O napravlenom formirovanii rossypnykh mestorozhdeniy zolota (postanovka problemy) [On Directed Formation of Alluvial Gold Deposits (Statement of Problem)] / Naumov V.A., Naumova O.B. // Vazhneyshiye promyshlennyye tipy rossypey i mestorozhdeniy kor vyvetrivaniya, tekhnologiya otsenki i osvoyeniya: mater. XI Mezhd. soveshch [The most important industrial types of placers and weathering crust deposits, technology for assessment and development: Materials of the XI Int. meeting]. Moscow-Dubna, 1997. P. 150. [in Russian]

8. Perepelitsyn V.A. Tekhnogennoye mineral'noye syr'ye Urala [Technogenic Mineral Raw Materials of URALS] / Perepelitsyn V.A., Rytvin V.M., Koroteev V.A. // Ekaterinburg: RIO UB RAS, 2013. 332 p. [in Russian]

9. Naumov V. A new insight into origin of the Yukon placer gold [New Insight into Origin of Yukon Placer Gold] / Naumov V., LeBarge W., Kovin O. // The 45th International October Conference on Mining and Metallurgy [The 45th International October Conference on Mining and Metallurgy]. BorLakeBor (Serbia), 2013. 4 p. [in Russian]

10. Naumov V.A. O mekhanizme sorbtsii nanochastits zolota uglistym materialom [About Mechanism of Sorption of Gold Nanoparticles by Carbonaceous Material] / V.A. Naumov, B.M. Osovetskiy // Geologiya i poleznyye iskopayemye Zapadnogo Urala [Geology and minerals of the Western Urals]. Perm, 2013. P. 43-48. [in Russian]

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.017>**ОЦЕНКА МЕЖ-ОСЦИЛЛЯТОРНОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Научная статья

Бахарев Б.В.^{1,*}, Воробьев В.В.²¹ORCID: 0000-0003-0605-3704;²ORCID: 0000-0002-7716-2580,^{1,2} Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биофизики клетки РАН, Пущино, Россия

* Корреспондирующий автор (boris_baharev[at]mail.ru)

Аннотация

В наших предыдущих работах была разработана модель электроэнцефалограммы (ЭЭГ), основанная на интегральных нелинейных уравнениях для усреднённых по нейронному ансамблю мембранных потенциалов мозга. В областях ЭЭГ устойчивости свертка характеристических уравнений для гармонических колебаний с отрицательными декрементами и дискретного (равномерно-разрывного) белого гауссова шума адекватно моделировала ЭЭГ. Методы вычисления декрементов ЭЭГ по корреляционным функциям были предложены нами ранее и апробированы на моделях и реальных ЭЭГ крыс и мышей. В данной работе на трансгенных 5xFAD мышах (модель болезни Альцгеймера) мы анализируем взаимоотношения между различными областями мозга по когерентности их ЭЭГ ритмов с определением декрементов и частот на основании разработанной нами модели ЭЭГ.

Ключевые слова: ЭЭГ, свёртка гармонических функций, когерентность, фазовый сдвиг.

ESTIMATION OF INTER-OSCILLATORY COHERENCE IN THE ELECTROENCEPHALOGRAMS BY USE OF THEIR MATHEMATICAL MODELING

Research article

Bakharev B.V.^{1,*}, Vorobyov V.V.²¹ORCID: 0000-0003-0605-3704;²ORCID: 0000-0002-7716-2580,^{1,2} Institute of Cell Biophysics, Russian Academy of Science, Pushchino, Russia

* Corresponding author (boris_baharev@mail.ru)

Abstract

In our previous studies, a model of the electroencephalogram (EEG), based on integral nonlinear equations for averaged brain membrane potentials in neuronal ensembles, was developed. In areas of EEG stability, characteristic equations, constructed for a set of oscillations with negative decrements and their convolution with discrete (evenly discontinuous) white Gaussian noise, satisfyingly simulated the EEG. The methods for calculation of the EEG decrements through correlation functions were suggested earlier and tested on EEG from rats and mice. In present study on transgenic 5xFAD mice (a model of the Alzheimer's disease), we analyze the relationships between different brain areas using coherence of oscillations in their EEG with decrements and frequencies revealed from our EEG model.

Keywords: EEG; modeling; harmonic functions convolution; coherence; phase shift.

Introduction

In our previous studies we investigated the model of rhythmic processes in summarized electrical activity (electroencephalogram, EEG) of the cerebral cortex, which was based on the integral equations of averaged membrane potentials of excitatory and inhibitory neocortical neurons. Nonlinear analysis of these equations revealed a stable region associated with a set of negatively decremented oscillations. We suggested that a solution for a linear system represents a sum of convolutions of external signals with corresponding original functions. Furthermore, discrete white Gaussian noise, typically used as an afferent input during resting awake, has to be involved in development of EEG model through convolution of centered discrete white noise and harmonic functions with negative decrements. Initially, EEG model was represented as a convolution of a single harmonic function [5], and later, a sum of two independent processes was studied with estimation of decrements through signal power spectra, calculated, in turn, through autocorrelation functions [6]. Finally, a convolution of the sum of several independent harmonic functions with discrete white Gaussian noise, and those with independent Gaussian noises, were examined [7]. In present work, the frequency-decrement parameters were calculated by use of the least-squares method and real EEG's autocorrelation functions, normalized to EEG variance, for further simulation of the coherence and phase parameters of EEG.

System and methods

In transgenic 5xFAD (a model of the Alzheimer's disease) and non-transgenic mice (n = 6 and 9, respectively) with chronically implanted electrodes into the hippocampus (HPC) and ventral tegmental area (VTA, dopamine-producing nucleus), EEG recorded from these brain areas for 1 hour. EEG signals, sampled at 500 Hz off-line, were passed through a second-order Butterworth filter in the range of 0.5-30 Hz [8]; power frequency spectra were calculated for 5-sec EEG epochs by use of the correlation function [9] of 1-sec duration, normalized to EEG variance and smoothed by Parzen's function [10]. In analysis of auto- and cross-spectra, coherence and phase interrelations in EEG and its model, the least-squares method was used.

Implementation and discussion

We modeled EEG, $\xi(t)$, as a real part of a sum of convolutions of damped harmonic functions (EEG rhythms) and discrete white Gaussian noise with the sampling rate of Δt :

$$\xi(t) = \text{Re}(x), x(t) = \sum_{l=1}^m x_l, \text{ where } x_l(t) = k_l \int_0^t q(t') \exp(z_l^x \times (t-t') + j\varphi_l^x) dt', \quad z_l^x = \alpha_l^x + j\omega_l^x. \quad x_l \text{ is a EEG}$$

rhythm with decrement of α_l^x , frequency of $\omega_l^x = 2\pi f_l^x$ and phase of φ_l^x , created by the discrete (uniformly discontinuous) white Gaussian noise $q(t)$ with the sample rate Δt and the variance of σ_q^2 . Then,

$$\begin{aligned} x_l(t + \Delta t) &= k_l^x \exp(z_l^x \Delta t) \int_0^{t+\Delta t} q(t') \exp(z_l^x \times (t-t') + j\varphi_l^x) dt' = \\ &= \exp(z_l^x \Delta t) x_l(t) + k_l^x q(t + \Delta t) \int_t^{t+\Delta t} \exp(z_l^x \times (t + \Delta t - t') + j\varphi_l^x) dt', \end{aligned}$$

recurrence relation is:

$$x_l(t + \Delta t) = \exp(z_l^x \Delta t) x_l(t) + k_l^x q(t + \Delta t) \exp(j\varphi_l^x) (\exp(z_l^x \Delta t) - 1) / z_l^x,$$

$$\text{and } x_l(t + \tau) = x_l(t) \exp(z_l^x \tau) + k_l^x \int_t^{t+\tau} q(t') \exp(z_l^x \times (t + \tau - t') + j\varphi_l^x) dt'.$$

For simulated EEG, the averaged autocorrelation function, calculated in a short time interval of T, is:

$$\hat{R}_x(\tau) = \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} \sum_l x_l^*(t) \sum_l x_l(t + \tau) dt \approx \sum_l (k_l^x)^2 \sigma_q^2 \exp(z_l^x \tau).$$

In our model, among two processes, the second one is: $\eta(t) = \text{Re}(y)$, $y(t) = \text{Re} \sum_{l=1}^m y_l$, where

$$y_l(t) = \int_0^t p(t') k_l^y \exp(z_l^y \times (t-t') + j\varphi_l^y) dt', \quad z_l^y = \alpha_l^y + j\omega_l^y, \text{ and } p(t) \text{ is the discrete (uniformly discontinuous) white}$$

Gaussian noise, correlated with $q(t)$ and the variance of σ_q^2 . In our model, $p(t) = q(t) * \rho + q_p(t) * \sqrt{1 - \rho^2}$, where $q(t)$ and $q_p(t)$ are white independent Gaussian noises and ρ is a coefficient of correlation, with recurrence relation of

$$y_l(t + \Delta t) = \exp(z_l^y \Delta t) y_l(t) + k_l^y p(t + \Delta t) \exp(j\varphi_l^y) (\exp(z_l^y \Delta t) - 1) / z_l^y, \text{ and normalized cross-correlation}$$

$$\text{function of simulated process as follows: } r_{\xi\eta}(\tau) = \int_0^{T-\tau} \xi(t) * \eta(t + \tau) dt / \sqrt{\int_0^{T-\tau} \xi(t)^2 dt \int_0^{T-\tau} \eta(t + \tau)^2 dt}.$$

Replacing the integral by the sum with sampling increment of Δt allows the calculation both the coherence and phase. Sinusoidal signals with close frequencies are well known to form branches of normalized cross-correlation function approximately as follows:

$$r_{\xi\eta}(\tau) \approx \frac{\sin(\Delta\omega(T - \tau)/2)}{\Delta\omega(T - \tau)/2} \cos(\Delta\omega(T - \tau)/2 + \omega^y \tau + \Delta\varphi) \quad \text{and}$$

$$r_{\eta\xi}(\tau) \approx \frac{\sin(\Delta\omega(T - \tau)/2)}{\Delta\omega(T - \tau)/2} \cos(\Delta\omega(T - \tau)/2 - \omega^x \tau + \Delta\varphi), \text{ where } \Delta\varphi = \varphi^x - \varphi^y \text{ and } \Delta\omega = \omega^x - \omega^y, \text{ resulting,}$$

in dependence of the amplitude and phase shifts of cross-correlation function, in both the difference between frequencies and time of T. An example of the computation of monochromatic (strongly sinusoidal) signals is shown on Fig. 1A.

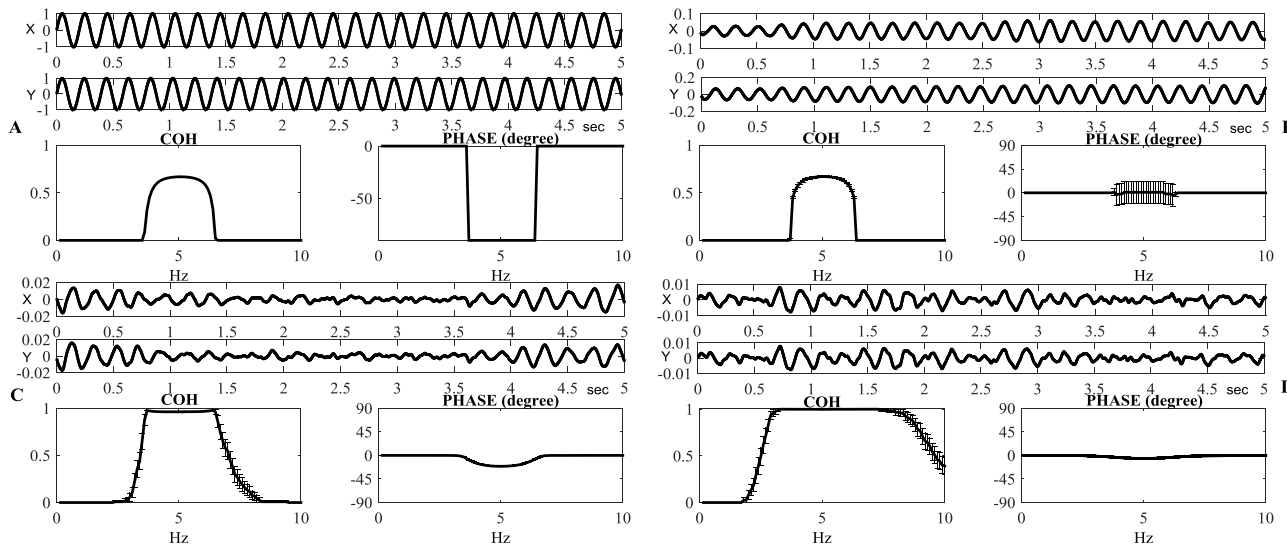


Fig. 1 – Coherence and phase evaluations are shown for different ("x" and "y") simulated EEG ($f_x = 5$ Hz, $f_y = 5.1$ Hz, $\Delta\varphi = 0$) monochromatic sinusoidal signals:

$\alpha_x = \alpha_y = 0$ (A) and simulation-dependent signals of the real part of convolutions of harmonic functions with discrete white Gaussian noise ($\rho=1$) of similar amplitude $\alpha_x = \alpha_y = 0$ (B); either at $\alpha_x = \alpha_y = -1 \text{ сек}^{-1}$ (C) or at $\alpha_x = \alpha_y = -5 \text{ сек}^{-1}$ (D). On B - D, frequency dependent distributions (horizontal axes are frequencies, in hertz) of the coherence (in arbitrary units) and phase (in degrees), averaged for 120 successive realizations, are demonstrated (vertical line segments are confidence intervals)

The second signal outruns the first one with phase of approximately $\pi/2$. In simulated signals with $\rho=1$, $\Delta\varphi=0$, and $\Delta\omega\neq 0$, the mean phase on 120 realizations is about zero due to the random component, while the variance rate is very high. The coherence, calculated for the signals with stable amplitudes, i.e., without decrements (Fig. 1B), is similar to estimated value (Fig. 1A) while the coefficient of correlation was extremely small. The decrements insertion into simulated signal maximally increases both correlation and coherence of the signals and eliminates the phase shift between them (Fig. 1C, D). In simulated independent signals ($\rho=0$, $\Delta\varphi=0$, $\Delta\omega\neq 0$) coherence is attenuated at decrement module increasing, whereas the correlation is minimal and phase is roughly fluctuated around the zero (Fig. 2).

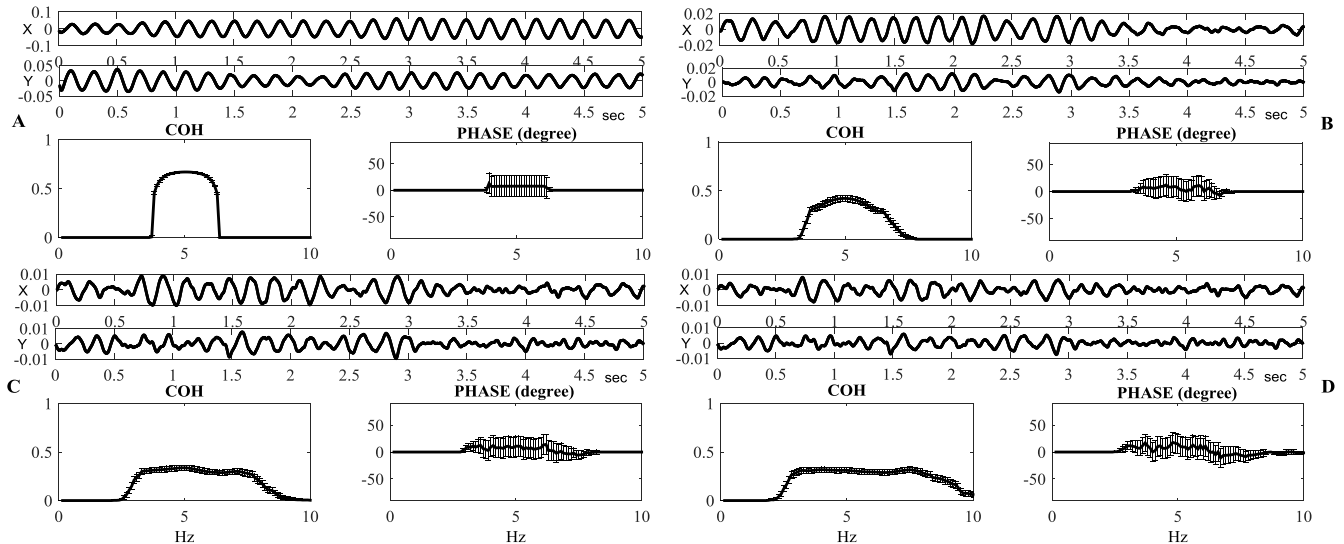


Fig. 2 – Coherence and phase evaluations are shown for different ("x" and "y") independent simulated signals ($\rho=0$, $\Delta\varphi=0$) of $f_x = 5$ Hz $f_y = 5.1$ Hz:

at $\alpha_x = \alpha_y = 0$ (A), $\alpha_x = \alpha_y = -1 \text{ s}^{-1}$ (B), $\alpha_x = \alpha_y = -3 \text{ s}^{-1}$ (C), and $\alpha_x = \alpha_y = -5 \text{ s}^{-1}$ (D). On B - D, frequency dependent distributions (horizontal axis are frequencies, in hertz) of the coherence (in arbitrary units) and phase (in degrees), averaged for 120 successive realizations, are demonstrated (vertical line segments are confidence intervals)

This approach was used for analysis of interrelations between EEG, recorded for 1 hour from two brain areas of the hippocampus (HPC) and ventral tegmental area (VTA) in transgenic (Tg) and non-transgenic (nTg) mice (Fig. 3).

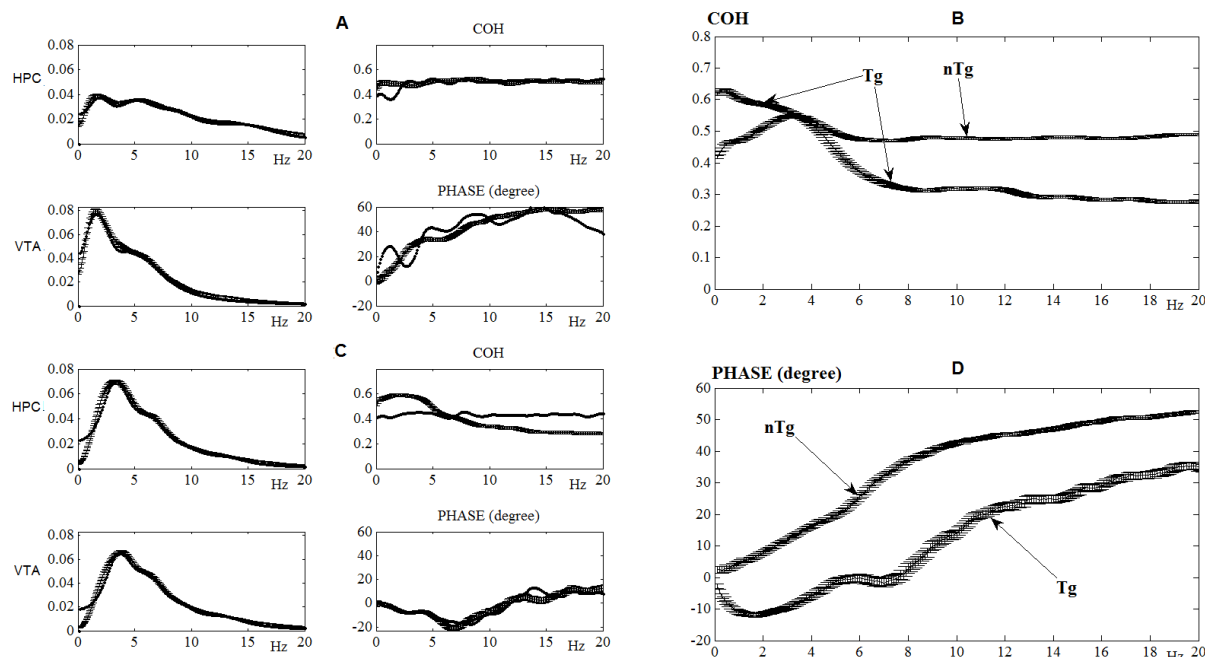


Fig. 3 – Interrelations between power frequency spectra, coherence, and phase shift in EEG, recorded for 1 hour from two brain areas (HPC and VTA) in individual transgenic (Tg) and non-transgenic (nTg) mice (A, C) or averaged (B, D) across their populations ($n=6$ and 9 , respectively). The results of the EEG modeling are well fitted those obtained in the experiments on mice (c.f., thin and thick lines, respectively). Horizontal axes are frequencies, in hertz; vertical axes are either normalized arbitrary units for power and coherence spectra or degrees, for the phases' shifts. The line segments on the plots are associated with confidence intervals

In one of control mouse (Fig. 3A), obvious differences between frequency spectra of EEG from the brain areas are observed, whereas in a transgenic mouse (Fig. 3B), the spectra are about similar. In contrast, HPC-VTA coherence level is stable at all analyzed frequencies in nTg mouse, whereas it is unstable in Tg mouse. Finally, phase shifts between EEG from both brain structures, frequency-dependent in nTg mouse, practically disappeared in Tg mouse. The differences in these EEG parameters between Tg and nTg mice are especially demonstrative in their averaged forms (Fig. 3 C, D).

The results of these experiments were obtained in several consecutive steps of EEG computation. Firstly, by use of the least-squares method, the frequency-decrement parameters (Table) were calculated from the averaged auto-correlation functions. Secondly, the EEG simulation was performed through analyzes of the coefficients of correlation (to select " ρ ") and phase (" φ "). The results of the EEG modeling are well fitted those obtained on mice (c.f. thin and thick lines in Fig.3).

Discussion

We have shown a feasibility of coherence simulation of EEG and phase alignment between them. We have revealed that convolution of sinusoidal signals with white Gaussian noise suggests the variance of phase shift between them. Furthermore, the decrements of signal simulation, originated from the same white Gaussian noise, increase the coefficient of correlation and coherence and stabilize phase relationships between the signals. Finally, we have shown that coherence of independent noises, lowering with increase of decrement module, provokes an attenuation of the coefficient of correlation and considerable increase of phase variance. One of possible consequences in development of this EEG model of coherence-phase relationships is associated with suggestion to pay attention on partially dependent Gaussian noises in cerebral networks functioning.

Conclusion

The coherence of EEG from different brain areas is associated with the extent of synchronization frequencies of their intrinsic potentials and, thus, with the level of interrelations between the structures. Disturbances in the interrelations are the main pathological factors accompanying the development of neurodegenerative processes in Alzheimer's disease, in particular. A monitoring of EEG coherence in such patients is suggested allow the revealing of early stages of the disease and, thus, the improvement of its further therapy. Our approach is widening a spectrum of the existing tools used for analyzes of the intracerebral disturbances associated with neurodegenerative processes. Furthermore, the results obtained by use of this approach are extremely important for its further improvement.

Table 1– Frequency-decrement electroencephalogram (EEG) characteristics, calculated by use of averaging normalized autocorrelation functions for the hippocampus (HPC) and ventral tegmental area (VTA) in one of non-transgenic (nTg) and transgenic (Tg) mice

Mice	nTg		Tg	
Areas	HPC	VTA	HPC	VTA
k_1	1	1	1	1
f_1	1,8	1,0	3,3	3,6
α_1	-5,5	-0,6	-7,7	-7,7
φ_1	0°	0°	5°	0°
k_2	1,5	2,0	1,4	0,8
f_2	5,0	1,9	6,3	6,3
α_2	-13,3	-4,2	-11,1	-9,5
φ_2	15°	0°	-10°	10°
k_3	1,3	3,3	1,3	0,5
f_3	8,5	5,1	9,8	9,1
α_3	-16,3	-16,4	-19,5	-10,2
φ_3	45°	-30°	0°	0°
k_4	1,3	0	0,9	0,5
f_4	14,6		13,2	12,9
α_4	-22,4		-11,8	-13,8
φ_4	60°		30°	-30°
ρ_{real}	0,54		0,67	
ρ_{sim}	0,60		0,63	

Notes: k_i , f_i , α_i , and φ_i are parameters for the "I"-consecutive decomposition of the signal (*index*, *frequency*, *decrement*, and *phase*, respectively); ρ_{real} and ρ_{sim} are coefficients of cross-correlation function for a real EEG and its simulated version, respectively.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №16 04 00942 «Исследование роли дофаминергической системы мозга в механизмах болезни Альцгеймера на моделях ее спорадической и наследственной форм».

Funding

Grant RFBR 16-04-00942 (Russia): "A study of the brain dopaminergic system involvement in mechanisms of Alzheimer's disease on models of its sporadic and inherited types".

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Bakharev B.V. The influence of inhibitory connections and form of the postsynaptic potentials on the formation of rhythmic processes in the cerebral cortex: analysis of the approximate equation of the electroencephalogram / Bakharev B.V., Zhadin M.N. // Biophysics, Vol. 42, No. 1, 1997, pp. 229-237.
2. Bakharev B.V. Rhythmic Processes of Bioelectrical Activity of the Cerebral Cortex during the Activation Response: Qualitative Nonlinear Analysis with Regard for Refractoriness / Bakharev B.V., Zhadin M.N., Agladze N.N. // Biophysics, Vol. 46, No. 4, 2001, pp. 675-682.
3. Bakharev B.V. Rhythmic Bioelectric Activity of the Cerebral Cortex Analyzed with Allowance for the Dependence of the Postsynaptic Potential on the Membrane Potential / Bakharev B.V., Zhadin M.N. // Biophysics, Vol. 49, No. 4, 2004, pp. 688-696.
4. Bakharev B.V. How the Nonlinear Voltage Dependence of the Amplitude of Excitatory Postsynaptic Potentials Induced by Cerebral Cortical Neurons Affects Cortical Rhythmic Activity, Biophysics, Vol. 53, No. 5, 2008, pp. 448-451.
5. Bakharev B.V. On the Encephalogram Structure / Bakharev B.V., Zhadin M.N. // Biophysics, Vol. 49, No. 6, 2004, pp. 1000-1003.
6. Bakharev B.V. Frequency-Decrement Electroencephalogram Analysis by Model of Rhythmic Processes of Bioelectrical Activity of the Cerebral Cortex / Bakharev B.V., Zhadin M.N. // Biophysics, Vol. 59, No. 3, 2014, pp. 443-446.
7. Bakharev B. V. A Correlational Analysis of Electroencephalograms Based on the Modeling of Biopotentials of the Cerebral Cortex, Biophysics, Vol. 61, No. 4, 2016, pp. 670-674.
8. Robert K. Otnes Applied time series analysis / Robert K. Otnes, Loren Enochson // New York, 1978.
9. Bendat Julius S. Engineering applications of correlation and spectral analyses / Bendat Julius S., Piersol Allan G. New York, 1980.
10. Parzen E. Mathematical considerations in the estimation of spectra. Technometrics, 1961, Vol. 3, No 2, pp. 167-190.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.018>

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ЧЕЛОВЕКОМ И ДЕЛЬФИНОМ

Научная статья

Иванов М.П.^{1,*}, Толмачев Ю.А.², Стефанов В.Е.³

¹ ORCID: 0000-0001-7334-1584;

² ORCID: 0000-0002-5439-6405;

³ ORCID: 0000-0002-7407-8236,

^{1,2,3} Санкт-Петербургский государственный университет; Санкт-Петербург, Россия

* Корреспондирующий автор (20mivanov[at]mail.ru)

Аннотация

Экспериментально показано перспективная технология с использованием видео и акустического оборудования с применением различных сценариев взаимодействия между человеком и дельфином белухой. Для демонстрации этих сценариев был разработан специальный подводный монитор. При демонстрации животному различных картинок и звукового сопровождения проявилось резкое увеличение времени удержания внимания дельфина у экрана (до 7 минут). Акустическая характеристика сигналов животного при демонстрации собственного изображения с использованием веб-камер показала, что дельфин использовал последовательности пакетов ультракоротких широкополосных импульсов различной длительности и количеством импульсов с время-импульсной модуляцией. Анализ записанных сигналов показал, что отчетливо различаются три основных временных структуры, состоящие из повторения и комбинации таких пакетов.

Ключевые слова: коммуникационные сигналы дельфина, пакеты импульсов, время-импульсная модуляции, модуляция позиции импульса.

NEW TECHNOLOGY OF INFORMATION INTERACTION BETWEEN MAN AND DOLPHIN

Research article

Ivanov M.P.^{1,*}, Tolmachev Yu.A.², Stefanov V.E.³

¹ ORCID: 0000-0001-7334-1584;

² ORCID: 0000-0002-5439-6405;

³ ORCID: 0000-0002-7407-8236,

^{1,2,3} Saint Petersburg State University; Saint Petersburg, Russia

* Corresponding author (20mivanov[at]mail.ru)

Abstract

We have shown experimentally the promising way to dolphin and man communication using video and acoustic equipment by the beluga dolphins reaction to various scenarios presented. For the demonstration of these scenarios, a special underwater monitor was engineered. The participated animals' interest to different pictures and sounds revealed itself in a sharp increase of the dolphin retention time at the screen (up to 7 minutes). The animal's acoustic response to the demonstration of its own image with the use of a web camera consisted of the frequency wideband impulse packets sequences of varying lengths with internal time-pulse modulation. The analysis of the recorded signals made it possible to distinguish three main temporal structures, consisting of repetitions and permutations of such packets in time.

Keywords: dolphin' communication signal, packages of impulses, time modulation, pulse position modulation.

Introduction

Modern hydroacoustic systems allow for a long-term monitoring of bioacoustic activity of naval animals. The development of monitoring systems operating in various parts of the spectrum, as well as the use of additional channels for the information transmission and reception, suggest the search for psychophysiological techniques to provoke communication between animals [1] in the conditions of a closed pool. Progress in such experiments can allow us to form a database of acoustic signals used by dolphins during the "verbal interaction" between animals. This database will be used further to create the acoustic communication channel for the man - dolphin dialogue.

The general purpose of the study presented in our paper is in organizing an acoustic channel for the development of the intermediary language for the dialogue system "man - dolphin" based on the study of acoustic communication behavior between animals. In this process, one needs to solve the following problems:

- development of methodic to provoke the acoustic contacts between dolphins;
- creation of the technology of impact on the dolphin's visual and acoustic sensor systems;
- formation of communication signals database used by dolphin in the interaction with the feedback system via video and acoustic channels.

Being the secondary aquatic mammals, cetaceans twice passed from the aquatic environment to the gaseous habitat in the course of a long evolution. These changes gradually led to changes in the sensory system. In the process of adaptation, the change of sensors changed the behavior of cetaceans, which inevitably led to a change in channels of communication. The difference in the physical properties of the human and dolphin habitat has led to the fact that the main information channel for a man is vision and hearing, while for a dolphin the main means of perception of the environment is sound as the physical basis of "illumination" of space, while vision plays an auxiliary (but rather large) role. Both channels are used when establishing contact with dolphins in human actions, but when using an acoustic channel, a man immensely loses both in the speed of

information generation and of its processing. The effective frequency range of "generated" and "received" sounds by a man is 400-4000 Hz, while for a dolphin it extends from 10 Hz to hundreds of kilohertz. Visual contacts with the dolphin are more effective for the man but also have limitations due to the peculiarities of light propagation from air to water and backwards. One must note also that the interval of the animal's head being above water is very limited, as well as the underwater staying of the man without special equipment.

Numerous attempts aimed at the active human interaction with the dolphin are usually built on the variation of methods of training based on the each other imitating behavior of animals [2] or on the copying of certain types of human activity by the dolphin [3]. For the interaction with dolphins and other cetaceans, trainers use visual and acoustic channels as the main ones, the tactile channel is also successfully used but it requires the direct contact with the animal.

We see the most natural development of expanding the human - dolphin communication means in two directions:

- compression in time of the acoustic signals generated by a person and the reverse transformation of the dolphins' signals;
- the use of underwater sources of images (perhaps with appropriate sound effects) of a static or dynamic character.

The first direction requires engineering and assembling of a completely new park of acoustic devices. Ability to complex forms of imitation plays highly significant role in dolphins' social life. It is assumed that their ability to "vocal" and motor simulation is the basis on which various forms of coordinated group activity develops: synchronized swimming, collective hunting, protective behavior [4], [5]. The great similarity of the identification signals of animals belonging to the same community gives them the opportunity to quickly recognize their congeners.

The second, at the first stages, at least, can be implemented with a small modification of existing computer monitors [6]. We choose this direction for a series of experiments with Beluga wales (*Delphinapterus leucas*).

Specific features of dolphins' physiology and psychology lead to the fact that the interaction within the group (pack) of dolphins and humans-to-dolphins significantly differs from that of other mammals. Accordingly, for the study of cognitive functions and communication behavior of dolphins, the formation of useful skills is realized in the process of active learning. Thus, we must abandon the conventional methods of training with the use of food deprivation and the use of negative reinforcement.

Material and methods

The positive results of the visual contact between the trainer and the dolphin with the help of images on the screen of underwater TV were shown in some well-known experiments [6], [7]. In our study, we used a system of interactive communication channels, including underwater computer monitor, webcam, microphones and acoustic signal synthesizer, which allowed activating the attention of the animal to the subject. This system permits to control the feedback between the flow of echolocation signals emitted by Beluga whales when approaching the monitor and the nature of the presented images. The software allows also the animal to control itself the image on the underwater monitor depending on the terms set up by the operator. By changing the amplitude of the acoustic signals and their frequency, the dolphin was able to turn independently the underwater monitor on or off and to change the image on the screen [8]. During all time of the experiment, the continuous acoustic monitoring was effectuated. Permanent processing of the incoming objective information and implementation of various devices interaction were realized with the help of specialized software. It provided communication between different devices: reception of dolphin' echolocation of signals, control of scenes shown on the screen, synthesis of acoustic stimuli, *etc.* The block diagram of the engineered complex is shown in Fig.1.

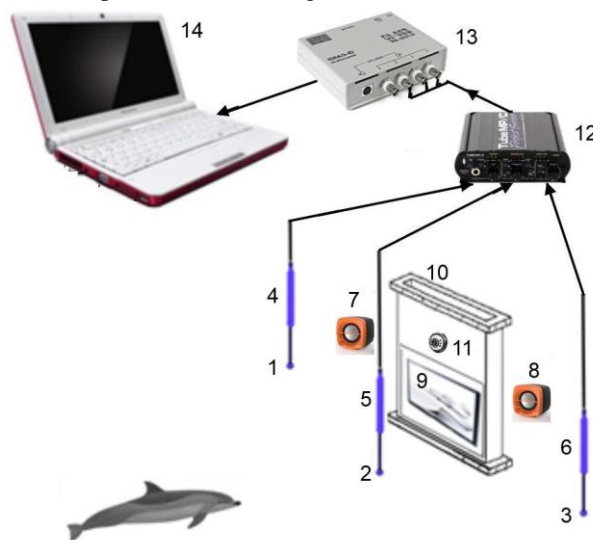


Fig. 1 – The scheme for the study of dolphin's cognitive functions:

1, 2, 3 - three hydrophones, 4, 5, 6 - three pre-amplifiers, 7, 8 - two loudspeakers; 9, 10 - monitor inside the underwater hermetic box; 11 - web camera; 12 - general three-channel amplifier; 13 - analog-to-digital convertor; 14 – computer

The developed software allowed us to form the dolphin conscious activity on the basis of self-learning or on the imitative reflex of the animal. The software interface is shown in Fig. 2.



Fig. 2 – The interface of the software “feedback-monitor” for the experimenter:

1 – position of the dolphin’s head taken by webcam; 2 – record of the acoustic pulses sequence; 3 – software to control the monitor; 4 – the monitor picture

For the self-learning subjects or vicarious learning, the broadcast on an underwater monitor was used. In the video clips demonstrated, the trained beluga whales are actively nodding their heads and spinning around their own axis at the command of the trainer. One of tested dolphins after a long observation of the scene demonstrated on the monitor repeated the motor acts of nodding and turning around its own axis. At all period of this apprehending, there were no additional acoustic accompaniment signals, in addition to echolocation signals.

Results

Demonstration of the floating fishes on the monitor in the aquarium, when their movement was synchronized with echolocation pulses, led to a continuous lingering of dolphin’s attention to the monitor up to 7 minutes. A similar reaction was observed during video demonstration of the moving toy synchronized with echolocation pulses, as well as the periodic change of scale and number of different simple geometry figures.

Transmission of acoustic stimuli in the form of different song fragments, music, narration associated with various images on the screen, even synchronized with the echolocation pulses, did not induce the interest of dolphin. He swam up to the monitor, began the location test and after the beginning of the acoustic and video broadcast turned around and left the monitor. At the same time, the acoustic stimulus synthesized of a long noise-like pulses (in the frequency band up to 10 kHz) together with the amplitude modulation by the voice of the announcer (at the modulation depth not more than 5%) caused an active response of the animal. This response consisted of a package of broadband pulses with the modulation of time interval between pulses, which were clearly recorded by the acoustic control system. The delay of reaction varied from 300 to 2000 ms.

In all the described experiments during the tests, there were two animals in the pool: male and female belugas. The duration of each experiment varied from one to four hours and depended solely on the animal’s free will to work. Sometimes, the preparatory period for setting up the equipment was delayed, but under the stable dolphin’ “research mood” they remained nearby the monitor screen and waited for the start of work. Food reinforcement in the experiments was not used at all. As is well-known, the imitative reflex does not require immediate nutritional reinforcement, and the positive result plays the role of such the reinforcement itself, sometimes. In these tests, the preparatory period was clearly distinguished, during which the animals fixed their position at the monitor either in turn or together. At the same time, the period spent at the monitor was not more than 10÷20 seconds. Only on the 11-th and 12-th day of the study, the duration of the animals’ activity reached a maximum value of 60 and 76 minutes for the whole experiment.

Demonstration of self-video image of the animal obtained with the help of web camera synchronized with echolocation signals caused an intense reaction of emitting the acoustic pulses packets of different duration and frequency. Packets consisted of ultrashort broadband pulses with modulation the time interval between pulses. The evident response was observed in 41 of 43 tests fulfilled. In some experiments, in parallel with sound effects, various video fragments were displayed at the monitor in these tests; the first dolphin’s acoustic response to the video and/or sound signal was of the main importance.

The results of induction of motor simulation behavior show the consistency of vicar teaching in this group of beluga whales. We observed the clearly visible cognitive function, which provides targeted attention, the process of learning about the surrounding world and interaction with it. Subjects containing the video games synchronized with dolphin’s acoustic activity by the feedback, induced the increase of attention to the monitor, but they did not cause the expected acoustic communication reaction. Quite different was the dolphin’s motor and acoustic response to the image received with the webcam: there was observed the exact match between the image and the acoustic communication signal sequence, even without any acoustic and food reinforcement.

The recorded acoustic signals of the dolphin clearly indicated that this was a verbal reaction to the video and acoustic impact. The dolphin tried to come into verbal contact with the image on the underwater monitor. The spatially distributed system of hydrophones also has shown that the dolphin can control the characteristics of the radiation field. For further processing of hydroacoustic information, there are important fragments, which were recorded simultaneously by three channels (with the necessary delays) with a maximum signal on the second channel.

Analysis of the set of dolphin' signals obtained at a good signal/noise ratio in various experiments made it possible to reveal the characteristic temporal structures (Fig. 3), which are repeated in different fragments when displaying the webcam image and during acoustic noise stimuli containing amplitude modulation. Some specific pulse packages were well distinguished by their modulation structure. We have singled out two packages of ultrashort pulses, which were presented and clearly recorded in practically all fragments of the acoustic response. The first packet is indicated as 1, 1' in Fig. 3, and the second one as 2, 2'. The duration of packets of the first type can slightly differ or be very close to 803 ms or 789 ms, the number of impulses being 119 and 85, correspondingly. The minimum and maximum change of the interval between pulses can both vary significantly or be very close one to another, while the modulation coefficient varied insignificantly from 0.15 to 0.17 (for the first type signals) and from 0.92 to 0.93 (for the second type signals). Signals of type 2 can differ significantly in the duration (221 ms in Fig. 3.1 A and 331 ms in Fig. 3.1' A), while the number of pulses varies insignificantly: 37 and 43, and the time parameters remain constant $t_{\min} = 2,9$ ms, and $t_{\max} = 2,9$ ms.

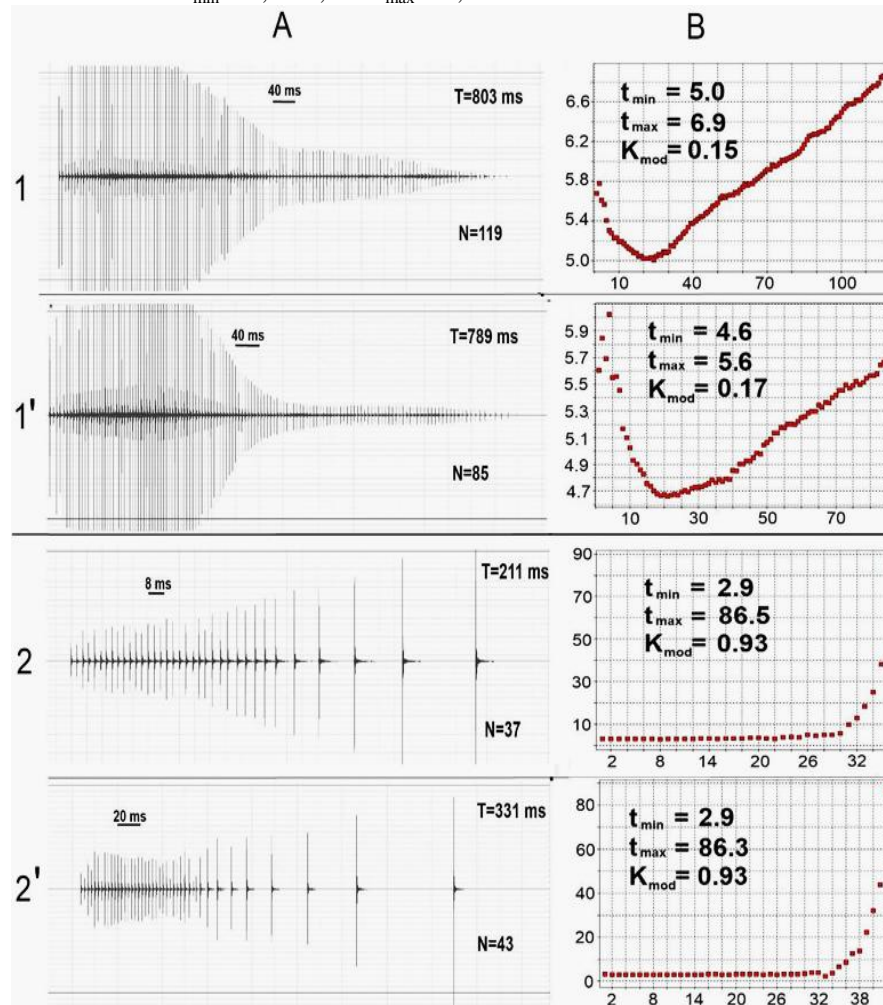


Fig. 3 – Two main type of communication signals (A) and dependence of internal pulse frequency modulation (B) on the impulse number for two experiments numbered 1 and 2. N - is the total number of impulses recorded in one experiment, T - is the moment corresponding to the last impulse of the pack. Pay attention to the stability of the internal pack form

Discussion and Conclusion

Thus, the information parameters of signals of the first and second types can be fixed as following:

- the duration of the packets,
- the number of pulses in the pack,
- the variation of time-pulse modulation,

as well as the repeatability of the packets in all parameters and the invariance of these parameters in azimuth. In addition, there are signals with a structure that can be represented as permutations and repetitions of signals of these two types, stable in parameters.

The pulse series we have recorded have some similarities with the results reported in [9]. There were no frequency-modulated long pulses that were used as communication signals for the formation of the mediator language in experiments with *Orcinus orca* [10]. We would specially emphasize that the time parameters of isolated verbal signals are stable in form and invariant with respect to the angle of observation. The considered experiments have shown also that there is a channel for the information transfer in the high frequency region of verbal signals with time-pulse modulation of a sequence of ultrashort pulses in packets, which is quite suitable for the information encoding.

The recorded signals allow us already to form a database of communication sequences that are associated with the subjects formed by the experimenter. Further development of the experiment of this type should be aimed on the provoking of the communication interaction between two dolphins in a duplex acoustic and video communication system (Fig. 4) with accumulation of a database of acoustic interaction of animals.

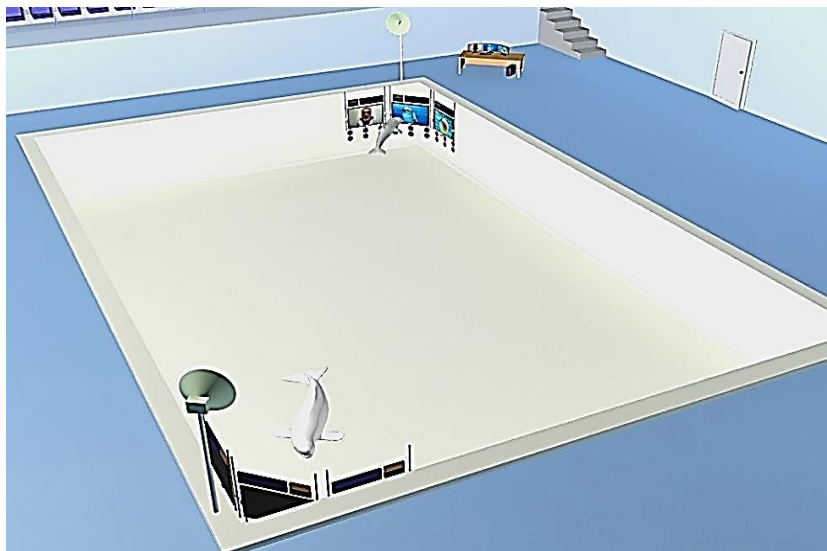


Fig. 4 – General view of the pool arranged for the experiment aimed on the formation of database on the acoustic activity of dolphins when operating with the duplex three-channel communication system

Our interest is in the formation of an intermediate language of dolphin-to-human “verbal” communication on the basis of the resulting verbal interaction database. In the conducted experiments, we have recorded signals with minimal distortions that are usually unavoidable when recording sound in the confined space with broadband reception system.

The results of this work show the prospects of complex experiments with various combinations of video and acoustic scenes included. The developed technical support of our experiments and the obtained data allow us to see the future experiments on the study of cognitive functions and communications between dolphins and dolphins-to-man, which may make feasible creation of a language-intermediary between human and dolphin.

The fulfilled study opens up also the possibility of implementation of duplex communication between animals and realization of an Internet video conference between groups of animals, in the future.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю признательность за предоставленную возможность провести описанное исследование всей команде тренеров, а также лично Игорю Костову, директору Санкт-Петербургского дельфинария (Крестовский остров); всем тренерам Анапского дельфинария и лично Людмиле Камаевой, директору; всем сотрудникам Дельфинария Евпатории и лично Игорю Масбергу и Руслану Павловскому, менеджерам.

Acknowledgement

The authors express their sincere appreciations for the given opportunity to conduct the described research to all team of trainers, as well as personally to Igor Kostov, the Director of St. Petersburg Dolphinarium (Krestovsky Island); to all coaches of the Anapa Dolphinarium, and personally to Lyudmila Kamaeva, Director in Chief; to the entire staff of Evpatoria Dolphinarium and personally to Igor Masberg and Ruslan Pavlovskiy, managers.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Ivanov M. P. The Technique of Physiological Experiments on Acoustic Communication of Dolphins // *Doklady Biological Sciences*, - 2008. - V. 423. - № 2. – P. 375-378. DOI: 10.1134/S001249660806002 [IN RUSSIAN]
2. Brown D.H. Observations on the behavior of wild and captive also killer whales, with notes on associated behavior of other genera of captive delphinids / Brown D.H., Caldwell D.K., Caldwell M.C. // *Los Angeles City Museum Contribution to Science* – 1966. – № 95. – P. 1–32.
3. Tayler C. K. Imitative behaviour by Indian Ocean bottlenose dolphins (*Tursiops aduncus*) in captivity / Tayler C. K., Saayman G. S. // *Behaviour* . – 1973. - №44. –P. 286–98.
4. Herman L.M. Cognitive characteristics of dolphins / In: *Cetacean behavior: Mechanisms and functions*, ed., L. M. Herman. Wiley and Sons. – 1980.
5. Herman L. M. Cognition and language competencies of bottlenosed dolphins / In: *Dolphin cognition and behavior: A comparative approach*, eds., R.J. Schusterman, J.A. Thomas, & F.G. Wood. Lawrence Erlbaum. – 1986.
6. Herman L. M. Bottlenosed dolphin and human recognition of veridical and degraded video displays of an artificial gestural language / Herman L. M., P. Morrel-Samuels, A. A. Pack. // *Journal of experimental psychology: General*. – 1990. - №119. –P. 215–230.
7. Herman L. M. The communication systems of cetaceans / Herman L. M., Tavalga W. N. // In L.M. Herman (Ed) *Cetacean Behavior: Mechanisms and functions*. - New York.: Wiley & Sons, Inc. - 1980. – P. 149-209.
8. Ivanov M.P. A Study of Cognitive Functions in the Dolphin *Delphinapterus leucas* / Ivanov M.P., Tolmachev Yu.A., Tulub A.A. and others // *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. - 2017. – V.54. - №3. – P. 250-252.

9. Belikov R. A. Communicative pulsed signals of beluga whales in the reproductive gathering off Solovetskii Island in the White Sea / Belikov R. A., Bel'kovich V.M. // Acoustical Physics. - 2008. - №54 (1). - P. 115–123.

10. Dudok van Heel W. H. An experiment in two-way communication in *Orcinus orca* / Dudok van Heel W. H., Kamminga C., J.D. van der Toorn. // Aquatic Mammals. - 1982. - V.9. - №3. - P. 69-82.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.019>

УГОЛ РАСКРЫВАНИЯ ПАСТИ НИЛЬСКОГО КРОКОДИЛА *CROCODYLUS NILOTICUS* ПРИ БАСКИНГЕ

Научная статья

Киладзе А.Б.*

ORCID: 0000-0001-9243-5922;

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (andreykiladze[at]yandex.ru)

Аннотация

Рассмотрен один из аспектов поведенческой терморегуляции нильского крокодила *Crocodylus niloticus* Laurenti, 1768 (Crocodylidae, Crocodylia) в условиях крокодиловой фермы в Djerba Explore Park (о. Джерба, Тунис). Наблюдение за баскингом провели для 12 взрослых особей 3 июня 2018 г. в дневное время при температуре воздуха +29°C. Установлено, что ширина раскрытия пасти во время баскинга определяется углом между разомкнутыми челюстями, который в среднем составляет $26 \pm 1^\circ$, варьируя в пределах 18–32°.

Ключевые слова: нильский крокодил *Crocodylus niloticus*, терморегуляция, угол между открытыми челюстями, градусная мера, баскинг.

ANGLE OF MOUTH GAPING OF THE NILE CROCODILE *CROCODYLUS NILOTICUS* AT BASKING

Research article

Kiladze A.B.*

ORCID: 0000-0001-9243-5922;

A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

* Corresponding author (andreykiladze[at]yandex.ru)

Abstract

One of the aspects of the behavioral thermoregulation of the Nile crocodile *Crocodylus niloticus* Laurenti, 1768 (Crocodylidae, Crocodylia) under the conditions of a crocodile farm in Djerba Explore Park (Djerba Island, Tunisia) was considered. Observation of the basking was carried out for 12 adult individuals on June 3, 2018, in the daytime at an air temperature of + 29°C. It was established that the degree of mouth gaping during basking was determined by the angle between the open jaws, which on average was $26 \pm 1^\circ$, varying from 18° to 32°.

Keywords: the Nile crocodile *Crocodylus niloticus*, thermoregulation, angle between the open jaws, degree measure, basking.

Introduction

The ability of crocodiles to thermoregulation, which increases and decreases the body temperature, is achieved due to specific acts of behavior, the most important of which is basking [3, P. 185–192], [9, P. 549–557], [10, P. 77–86]. It is considered that such type of behavior is related to the ability of the individuals to bask in the sun, move between land and water or to cover in the shadow [3, P. 185–192], [10, P. 77–86]. It is known that the Mugger crocodile *Crocodylus palustris* Lesson, 1831 during the temperature peak is even able to hide in burrows as a protective measure [3, P. 185–192], [8]. In this regard, the crocodiles thermoregulation is directly dependent on environmental conditions and behavioral adaptation [2], [3, P. 185–192].

One of the basking visually distinctive features is the open jaws, which increase the evaporative cooling [3, P. 185–192], [5, P. 443–467]. Open jaws should be considered as an element of a potentially useful mechanism related to the heat release [3, P. 185–192], [11, P. 235–236]. Thus, when the American alligator *Alligator mississippiensis* Daudin, 1802 opens the jaws during the basking, it reduces the heat increment in the head and gives the possibility to increase the body temperature to the required level [3, P. 185–192], [11, P. 235–236].

The basking features of the Nile crocodile *Crocodylus niloticus* Laurenti, 1768 were described in several studies earlier [1, P. 211–356], [3, P. 185–192], [4, P. 463–469], [5, P. 443–467], [6, P. 81–88]. It seems that the latitude of the inhabitation and air and water temperature influences the frequency and prevalence of basking [3, P. 185–192]. Seasonal aspects also affect the behavioral thermoregulation. Thus, in Zimbabwe, individuals of the Nile crocodile stayed in the state of basking more often in winter than in the summer period [4, P. 463–469]. Additionally, during the winter period the opening jaws can be also a signal of the Nile crocodile threatening behavior [4, P. 463–469].

Many issues of such an interesting behavioral aspect of the crocodiles' life are still poorly studied. Thus, the gaping angle of the mouth is mentioned only in few studies [7, P. 25–38], however, it is obvious that such feature can also be of the species-specific nature, and depend on environmental factors.

In this regard, the aim of this paper is to describe the variants of basking and to determine the gaping angle of the Nile crocodile jaws.

Material and methods

Observation of specimens of the Nile crocodile *Crocodylus niloticus* Laurenti, 1768 (Crocodylidae, Crocodylia) was carried out on June 3, 2018, on a crocodile farm in Djerba Explore Park on Djerba Island (Tunisia), in the daytime from 3.44 pm to 4.01 pm. On that day, the weather conditions had the following parameters: air temperature was + 29°C; atmospheric pressure — 758 mm Hg; cloud cover — clear; wind — northeast; wind speed was 7 m/s (<https://www.gismeteo.ru/diary/6517/2018/6/>).

During the observation period, we saw and photographed 12 adult crocodiles with open jaws in the state of basking. The mouth gaping angle was determined from photographs. On the inner line of the opening of the jaws, we constructed two straight lines, at the intersection of which the angle α of jaw opening was found (Fig. 1).

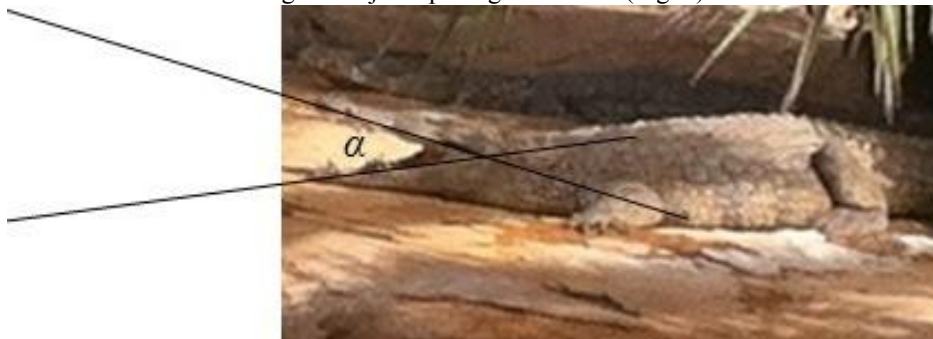


Fig. 1 – Measurement of the angle (α) of the mouth gaping of the Nile crocodile *Crocodylus niloticus* at basking. Crocodile farm in Djerba Explore Park (Djerba Island, Tunisia)

Note: Photo by A.B. Kiladze

The angle α was measured by a protractor within the accuracy of 1°. The results were processed by descriptive statistics methods using STATISTICA 10 (StatSoft, USA). Statistical parameters were rounded to integer values.

Results and Discussion

According to our observations, crocodile can perform basking in the following cases: (i) lying in direct sunlight on the shore of the reservoir (Fig. 2A); (ii) were locating in the shade or half-shade under the trees (Fig. 2B); (iii) on partial immersion in water, usually by the back part of the body (Fig. 2C).



Fig. 2 – Variants of basking of the Nile crocodile *Crocodylus niloticus* with an open mouth: A – under direct sunlight on the shore; B – in the shade or half-shade under palms; C – with partial immersion in water. Crocodile farm in Djerba Explore Park (Djerba Island, Tunisia)

Note: Photos by A.B. Kiladze

During basking, the individuals remain immobile and can hold the mouth open for quite some time. Periodically crocodiles smoothly close and open jaws. The gaping angle of the mouth of crocodiles averages $26 \pm 1^\circ$ (Table 1).

Table 1 – The exponent of the gaping of the mouth of the Nile crocodile *Crocodylus niloticus* at basking ($n^* = 12$)

Statistical parameters	Angle of jaw opening (α , $^\circ$)
$M \pm m$	26 ± 1
lim	18 — 32
$\pm \sigma$	5
Cv, %	19

Note: n is the number of measurements; $M \pm m$ is the arithmetic mean with the error of the arithmetic mean; lim — parameter limits; $\pm \sigma$ is the standard deviation; Cv is the coefficient of variation.

It is obvious that during basking, crocodiles only slightly open their jaws, slightly opening the mouth, whereas when attacking a large prey they open it widely. Our results are close to the data obtained for the Mugger crocodile, as the angle between the open jaws during basking ranges from 20° to 25° [7, P. 32].

Conclusion

Scientific value of our results is as follows: (i) the data supplement information on the thermal biology of the Nile crocodile; (ii) the data are an example of the morphological and functional adaptation of the Nile crocodile to environmental conditions; (iii) the data complement the system of morphometric parameters of the jaw apparatus of the Nile crocodile at basking.

Thus, the usage of geometrical and statistical methods allowed us to clarify important features related to the physiology of the Nile crocodile.

Благодарности

Выражаю благодарность д.б.н. О.Ф. Черновой (Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН) за редактирование рукописи

Acknowledgement

I am grateful to Dr. O.F. Chernova (Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences) for editing the manuscript.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Cott H.B. Scientific results of an inquiry into the ecology and economic status of the Nile crocodile (*Crocodylus niloticus*) in Uganda and Northern Rhodesia / H.B. Cott // The Transactions of the Zoological Society of London. – 1961. – Vol. 29(4). – P. 211–356. <https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.1961.tb00220.x>
2. Cott H.B. Looking at Animals: A Zoologist in Africa / H.B. Cott. – New York: Scribner's Sons, 1975.
3. Downs C.T. Body temperature and basking behavior of Nile crocodiles (*Crocodylus niloticus*) during winter / C.T. Downs, C. Greaver, R. Taylor // Journal of Thermal Biology. – 2008. – Vol. 33. – P. 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2008.02.001>
4. Kofron C.P. Behavior of Nile crocodiles in a seasonal river in Zimbabwe / C.P. Kofron // Copeia. – 1993. – Vol. 2. – P. 463–469.
5. Loveridge J.P. Thermoregulation of the Nile crocodile *Crocodylus niloticus* / J.P. Loveridge // Symp. Zool. Soc. London. – 1984. – Vol. 52. – P. 443–467.
6. Modha M.L. Basking behavior of the Nile crocodile on Central Island, Lake Rudolph / M.L. Modha // East Afr. Wildl. J. – 1968. – Vol. 6. – P. 81–88. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2028.1968.tb00904.x>
7. Rosamma K.M. Studies on *Crocodylus* sp. of Kerala / K.M. Rosamma. – Unpublished PhD thesis. – Trivandrum: University of Kerala, 1993. – P. 25–38. – URL: <http://hdl.handle.net/10603/140807> (accessed: 30.07.2018).
8. Ross C.A. Crocodiles and Alligators. An Illustrated Encyclopedic Survey by International Experts / C.A. Ross, S. Garnett, T. Pyrzakowski. – London: Meerhust Press, 1989.
9. Seebacher F. Patterns of body temperature in wild freshwater crocodiles, *Crocodylus johnstoni*: thermoregulation versus thermoconformity, seasonal acclimatization, and the effect of social interactions / F. Seebacher, G.C. Grigg // Copeia. – 1997. – Vol. 3. – P. 549–557.
10. Seebacher F. Crocodiles as dinosaurs: behavioural thermoregulation in very large ectotherms leads to high and stable body temperatures / F. Seebacher, G.C. Grigg, L.A. Beard // J. Exp. Biol. – 1999. – Vol. 202. – P. 77–86.
11. Spotilia J.R. Mouth gaping as an effective thermoregulatory device in alligators / J.R. Spotilia, K.M. Terpin, P. Dobson // Nature. – 1977. – Vol. 265. – P. 235–236.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.020>**АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ПУТЬ СОХРАНЕНИЯ КОЛЛЕКЦИИ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КОРМОВЫХ КУЛЬТУР**

Научная статья

Филипенко Г.И.^{1,*}, Забегаяева О.Н.², Баранова Е.А.³, Герасимова Т.В.⁴¹ ORCID: 0000-0001-8419-1518;² ORCID 0000-0002-6316-3232;³ ORCID 0000-0001-9071-0513;⁴ ORCID 0000-0002-3858-4561,^{1, 2, 3, 4} Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), Санкт-Петербург, Россия

*Корреспондирующий автор (galina-filipenko[at]yandex.ru)

Аннотация

Проанализированы результаты 25-летнего хранения 575 образцов семян люцерны посевной (*Medicago sativa* L.) и 127 образцов семян клевера лугового (*Trifolium pratense* L.) в филиале ВИР Кубанском генетическом банке семян при температуре 4°C. Семена хранили в герметически закрытой таре, исходная влажность семян составляла 4,0-6,9%. Показано, что у люцерны посевной число образцов со всхожестью выше 80% после хранения составляло 95%, а у клевера – 93% хранившихся образцов. На образцах клевера была обнаружена тенденция к увеличению периода сохранения высокой жизнеспособности при снижении исходной влажности семян. В 2018 г. проводилась разработка методики получения ультра сухих семян клевера лугового и люцерны посевной, потенциально пригодных к длительному хранению без использования низких температур, что является альтернативным путем сохранения генетических ресурсов растений. Используя силикагель в соотношении семена: силикагель=1:10, удалось за 7 недель подсушить семян клевера лугового до 2,8%, а люцерны посевной – до 1,9-2,0%, без снижения их всхожести. Эти значения ниже рекомендованных стандартами для генбанков, такие семена можно отнести к ультра сухим. Важным моментом методики является еженедельная замена использованного силикагеля на свежий. Следующий этап работ – проверка эффективности этого режима подсушивания семян клевера лугового и люцерны посевной в опытах по длительному хранению, а также в модельных опытах по ускоренному старению семян.

Ключевые слова: генетические ресурсы растений, многолетние кормовые культуры, коллекция семян, клевер, люцерна, влажность семян, ультра сухие семена.

ALTERNATIVE WAY OF STORING COLLECTION OF GENETIC RESOURCES OF FODDER CROPS

Research article

Filipenko G.I.^{1,*}, Zabegaeva O.N.², Baranova E.A.³, Gerasimova T.V.⁴¹ ORCID: 0000-0001-8419-1518;² ORCID 0000-0002-6316-3232;³ ORCID 0000-0001-9071-0513;⁴ ORCID 0000-0002-3858-4561,^{1, 2, 3, 4} Federal Research Centre N.I.Vavilov Research Institute of Plant Industry, St. Petersburg, Russia

*Correspondent author (galina-filipenko[at]yandex.ru)

Abstract

The article analyzes the results of 25-year storage of 575 samples of creeping alfalfa seeds (*Medicago sativa* L.) and 127 samples of meadow clover seeds (*Trifolium pratense* L.) in the branch of N.I.Vavilov Research Institute of Plant Industry of the Kuban genetic seed bank at a temperature of 4 °C. Seeds were stored in hermetically sealed containers; the initial moisture content of the seeds was 4.0-6.9%. It was found that 95% of the samples of creeping alfalfa and 93% of clover had germination above 80% after the storage. Clover specimen showed a tendency for the increase in terms of keeping high viability with a decrease in the initial moisture of seeds. In 2018, a method was developed to produce ultra-dry seeds of clover meadow and creeping alfalfa potentially suitable for long-term storage without the use of low temperatures, which is an alternative way to store plant genetic resources. Using silica gel in the ratio of seeds: silica gel = 1:10, in 7 weeks we managed to dry the clover meadow to 2.8%, and creeping alfalfa to 1.9-2.0% without reducing their germination. These values are below the recommended standards for gene banks; such seeds can be referred to as ultra-dry. An important point in the technique is the weekly replacement of the used silica gel with the fresh one. The next stage of the work is to test the effectiveness of this mode of drying the seeds of clover meadow and creeping alfalfa in experiments on long-term storage, as well as in model experiments on accelerated aging of seeds.

Keywords: plant genetic resources, perennial fodder crops, seed collection, clover, alfalfa, seed moisture, ultra-dry seeds.

Сохранение и устойчивое использование биологического разнообразия имеет решающее значение для удовлетворения потребностей в продовольствии и здравоохранении, а также других потребностей растущего населения Земли [1]. По данным ФАО в мире насчитывается около 1750 генных банков, сохраняющих 7,4 миллиона коллекционных образцов растений [2, С. 5]. Коллекция образцов сельскохозяйственных культур и их диких родичей, хранящаяся в ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова» (ВИР), занимает 4 место в мире по численности после коллекций США, Китая и Индии [2, С. 6]. Коллекция генетических ресурсов ВИР насчитывает 329826 образцов, из них 32543 образца составляет

коллекция отдела генетических ресурсов кормовых культур (из отчета ВИР за 2017 г.). Это самая большая в России коллекция бобовых, злаковых и других кормовых культур. Сохранение коллекции кормовых культур в живом виде осуществляется как путем пересевов, так и с использованием технологии длительного хранения образцов семян в условиях низких температур.

Известно, что долговечность семян при хранении определяется взаимодействием биологических факторов, присущих семенам, и условий хранения, среди которых ведущую роль играют температура, содержание влаги в семенах (относительная равновесная влажность) и парциальное давление кислорода [3, С. 14], [4, С. 565]. Установлено, что, чем ниже температура хранения [5, С. 26] и парциальное давление кислорода [5, С. 57], тем длиннее период жизнеспособности семян. На изменение влажностного режима семена разных видов реагируют по-разному. У большинства сельскохозяйственных культур семена хорошо переносят подсушивание до влажности 2-5%. Такие семена называют ортодоксальными (от латинского *orthodox* – правоверный). Но есть растения, семена, которые нельзя высушивать ниже характерного для них, обычно высокого, уровня влажности (12-31%) – тропические древесные растения, цитрусовые, кофе, какао, некоторые каучуконосы и др. Их семена называют рекальцитрантными (от латинского *recalcitro* – брыкаться, противиться) [6, С. 501]. Позже была выделена группа растений, семена которых занимают промежуточное положение между ортодоксальными и рекальцитрантными. Собственно говоря, группа рекальцитрантных семян была разбита на две: те, которые переносят подсушивание только до влажности не ниже 15-20% – собственно рекальцитрантные, и те, которые можно подсушить до влажности 10-12,5% – интермедиальные семена [7, С. 15].

Сохранение рекальцитрантных и интермедиальных семян требует особых подходов – таких, как хранение семян в увлажненном состоянии [8, С. 130]. Ортодоксальные семена хранят подсушенными, их долговечность при снижении исходной влажности повышается, по крайней мере, в температурном интервале от 3° до 90°С и интервале влажности семян от 5% до 25% [9, С. 376]. Правильная организация длительного хранения семян, гарантирующая сохранение их жизнеспособности и генетической целостности, предполагает точное знание, являются семена ортодоксальными, рекальцитрантными или интермедиальными.

Современные стандарты для генбанков рекомендуют подсушивание ортодоксальных семян перед низкотемпературным хранением при 5-20°С и 10-25% относительной влажности воздуха [8, С. 24]. В этих условиях равновесная влажность семян составляет 3-7% в зависимости от культуры. В Генбанке ВИР, построенном в 2000 г., семена сушат перед закладкой на хранение при температуре 20°С и относительной влажности 12%. В этих условиях равновесная влажность семян у клевера составляет 3,5-5,8%, у люцерны – 3,7-5,2%.

Однако имеются экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что семена, подсушенные до более низких значений влажности, чем рекомендовано стандартами для генбанков, называемые ультра сухими, могут храниться весьма длительные сроки, притом даже без использования отрицательных температур. Например, ученые Мадридского политехнического университета показали, что семена 37 видов семейства *Brassicaceae*, подсушенные при помощи силикагеля до 1,5-3% и запааянные в стеклянные ампулы, сохраняли всхожесть на исходном уровне после 40 летнего хранения в лаборатории. В некоторых случаях всхожесть была выше исходной – за счет преодоления твердосемянности [10, С. 143]. Хранение ультра сухих семян при комнатной температуре представляет собой альтернативу энергозатратному низкотемпературному хранению. Но подсушивание семян до ультра низких значений влажности связано с техническими трудностями. К тому же, стоит помнить, что чрезмерное снижение влажности может привести к деструктивным изменениям. Для каждой культуры предел подсушивания связан с морфологическими особенностями семян, их биохимическим составом [11, С. 1019]. Серьезной проблемой является вывод семян из ультра сухого состояния без причинения им ущерба [7, С. 25].

Задача данного исследования – уточнить, к какому типу по отношению к подсушиванию относятся семена клевера лугового (*Trifolium pratense* L.) и люцерны посевной (*Medicago sativa* L.), и разработать методику получения ультра сухих семян этих культур, если они являются ортодоксальными.

Еще в 50-х XX века годах в опытах лаборатории семеноведения ВИР (с 1997 г. ЛДХГР) было показано, что семена кормовых бобовых культур хорошо переносят подсушивание до 4%-ной влажности, т.е., скорее всего, являются ортодоксальными. Многолетнее хранение семян – в течение 10-27 лет, в герметически закрытых стеклянных бутылочках в помещении, температура в котором колебалась от 12°С до 20°С, выявило различия в долговечности между образцами, имевшими разную исходную влажность. На основании результатов опытов были рекомендации для организации длительного хранения семян в Национальном хранилище семян на Кубани (ныне Кубанский генетический банк семян), начавшем работу в 1976 г. Для люцерны была рекомендована исходная влажность семян 4%, для клевера – 4-6%. Однако не все полученные тогда материалы были опубликованы и в должной мере обсуждены. Не все результаты могли быть однозначно истолкованы. В качестве примера можно привести 10-летнее хранение при 12-20°С образцов семян люцерны Славянской, исходная влажность которых колебалась в интервале от 13,9% до 4,4% (рис. 1).

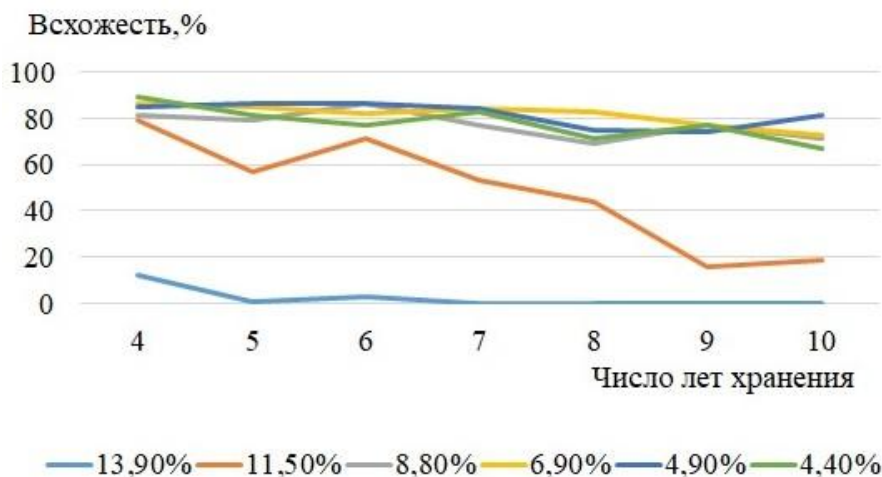


Рис. 1 – Влияние исходной влажности семян люцерны посевной сорта Славянская на изменение их всхожести в процессе хранения в герметически закрытой таре

В этом опыте было обнаружено, что снижение исходной влажности семян от 13,9% до 8,8% ведет к увеличению периода, в течение которого семена сохраняют высокую жизнеспособность. Однако дальнейшее снижение влажности от 8,8% до 4,4% не оказало заметного влияния на сохранность семян, что могло быть связано с довольно жесткими условиями использованной сушки – в термостате при 35-40°C, и повреждением семян, когда для получения более низких значений влажности увеличивали время экспозиции. Но, возможно, 10 лет – недостаточный срок для проявления преимуществ более низкой исходной влажности. С этой точки зрения целесообразно рассмотреть результаты длительного хранения большого числа образцов многолетних кормовых бобовых культур в Кубанском генетическом банке семян.

Так, в 1977 г. на хранение в Кубанский генетический банк было заложено на хранение 575 образцов люцерны посевной, 476 из них (83%) имели всхожесть выше 91-100%, остальные – 81-90% (рис. 2а). После 25 лет хранения в герметически закрытых бутылочках всхожесть в интервале 91-100% имели 106 образцов (19%), число образцов со всхожестью 81-90% увеличилось до 439 (76%), появились образцы с более низкой всхожестью. Но в целом число образцов со всхожестью выше 80% составляло 95% (рис. 2б). Такие результаты следует признать успешными. Тем более, что температура хранения базовых коллекций ВИР в Кубанском генетическом банке семян равна 4°C, тогда как современные стандарты для генных банков ФАО рекомендуют –18°C [8, р. 24].



Рис. 2 – Соотношение числа образцов люцерны посевной с разной всхожестью (%): А – перед закладкой на длительное хранение в Кубанский генетический банк семян в 1977 г.; Б – после 25 лет хранения

В 1982 г. на хранение в Кубанский генетический банк семян было заложено 127 образцов клевера лугового. 85 из них имели исходную влажность семян от 4,0 до 5,0%, 42 – влажность от 5,1 до 6,9%. Такое деление на группы по влажности довольно условно: просто 5% – это среднее значение в интервале значений влажности, до которых высушают семена в условиях, рекомендованных стандартами для генбанков ФАО [8, р. 24]. Тем не менее, было интересно выяснить, сказываются ли различия в исходной влажности семян на их долговечности. В группе с более низкой исходной влажностью 82 образца (96%) перед хранением имели всхожесть 91-100%, а 3 образца (4%) – 81-90% (Рис. 3а). После 25 лет хранения образцы со всхожестью 91-100% составляли 68% группы, а со всхожестью 81-90% – 28% (Рис. 2б). В группе с более высокой исходной влажностью в процессе хранения произошло уменьшение числа образцов со всхожестью 91-100% с 38 (90%) до 17 (45%), а число образцов со всхожестью 81-90% выросло с 4 (10%) до 19 (45%) (Рис. 3в и 3г). В группе с исходной влажностью 4,0-5,0% число образцов со всхожестью выше 80% в результате 25-летнего хранения в Кубанском генетическом банке семян снизилось со 100 до 96% (Рис. 3а и 3б). В

группе образцов с исходной влажностью 5,1-6,9% также произошло снижение числа образцов со всхожестью выше 80% с 90 до 86% (Рис.3в и 3г). Таким образом, нельзя сказать, что образцы клевера лугового с исходной влажностью 4,0-5,0% хранились значительно лучше, чем образцы с исходной влажностью 5,1-6,9%. Но тенденция к более длительному сохранению жизнеспособности при снижении исходной влажности семян имеется, особенно если сравнить, как менялось в группах, различающихся по влажности, число образцов со всхожестью 91-100%.

Если не разделять образцы клевера лугового, заложенные в 1982 г. в Кубанский генетический банк семян, на группы, то можно сказать, что после 25 лет хранения 118 из 127 (93%) имели всхожесть выше 80%.

В целом, достаточно успешные результаты длительного хранения в Кубанском генетическом банке образцов клевера лугового и люцерны посевной, имевших исходную влажность семян 4,0-6,9%, позволяют уверенно отнести семена этих культур к ортодоксальным. Это делает возможным разработку методики получения ультра сухих семян клевера лугового и люцерны посевной.

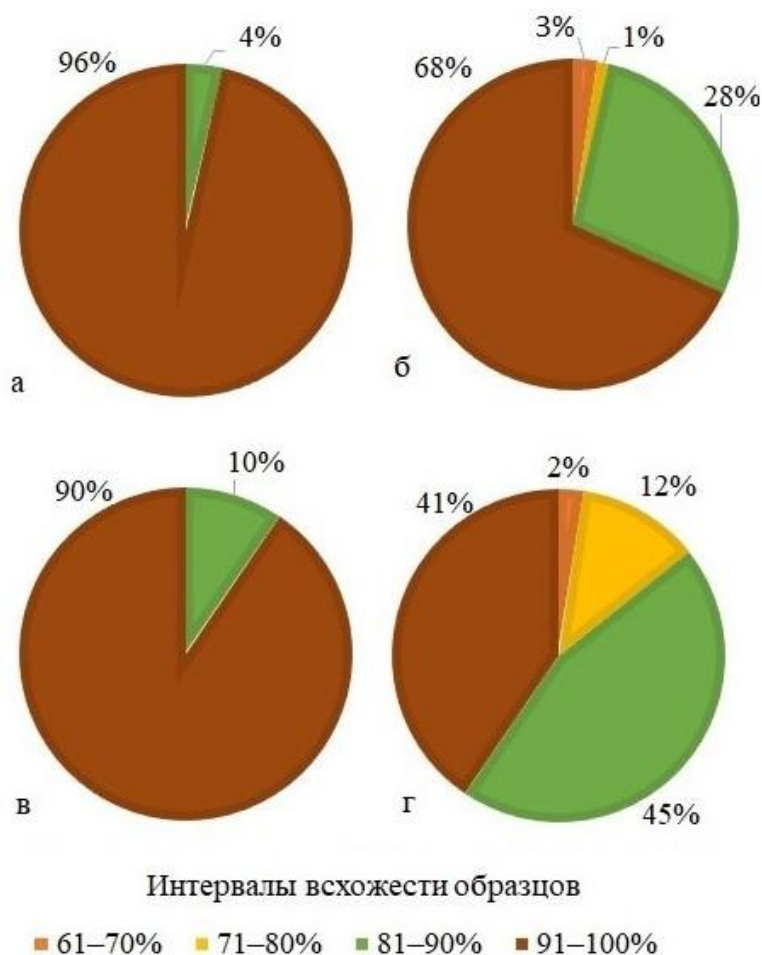


Рис. 3 – Изменение соотношения числа образцов с разной всхожестью (%) в партии семян клевера лугового в процессе 25-летнего хранения в Кубанском генетическом банке семян в зависимости от исходной влажности семян:

А – при закладке на хранение, исходная влажность 4,0-5,0%;

Б – после хранения, исходная влажность 4,0-5,0%;

В – при закладке на хранение, исходная влажность 5,1-6,9%;

Г – после хранения, исходная влажность 5,1-6,9%

Первый этап разработки методики получения ультра сухих семян – определение нижнего предела влажности, до которого можно подсушивать семена, не вызывая деструктивных изменений, снижающих их способность к прорастанию и нормальному развитию.

В прошлые годы на зерновых культурах было показано, что при подсушивании образцов в термостате при температуре 40°C до ультранизких значений влажности всхожесть семян несколько снижалась. При использовании для подсушивания силикагеля в соотношении 10 объемов силикагеля на 1 объем семян изменений жизнеспособности семян не наблюдалось, при этом влажность семян снизилась до ультра низких значений за 7 недель [12, С. 42]. Такой же режим подсушивания был успешно использован для получения ультра сухих семян масличных культур. Для достижения положительного результата оказалась важна регулярная замена силикагеля, используемого для подсушивания [13, С. 51].

Аналогичные опыты были проведены в 2018 г. на семенах зернобобовых кормовых культур. В работе были использованы семена клевера лугового и люцерны посевной, полученные из отдела генетических ресурсов многолетних кормовых культур ВИР (табл. 1).

Таблица 1 – Основные сведения об образцах клевера лугового и люцерны посевной, использованных в опытах по получению ультра сухих семян

№ каталога ВИР	Происхождение образца	Место репродукции	Год репродукции	Исходная всхожесть, %	Исходная влажность, %
Клевер луговой					
к-47421	Белогорка	Белогорка	2013	89	6,9
Люцерна посевная					
к-6254	Казахстан	Китай	2013	97	6,1
к-19996	Азербайджан	Китай	2013	93	5,6

Подсушивание семян проводили при помощи силикагеля (соотношение семена: силикагель = 1:10) в герметически закрытой таре при комнатной температуре, в течение 8 недель, еженедельно заменяя силикагель и проверяя стандартными методами всхожесть [14, с. 36-44] и влажность семян [15, с.109-114]. Перед определением всхожести образцы 6 часов выдерживали открытыми в лабораторном помещении (температура воздуха 18-20°C, относительная влажность воздуха 60%). Этого оказалось достаточно, чтобы семена увлажнились, и предшествующее подсушивание не сказывалось на их всхожести. Опыт проводили в двукратной повторности. Влажность семян в последнюю неделю опыта стабилизировалась и была у клевера лугового к- 7421 2,8%, у люцерны посевной к-6254 и к-19996 1,9% и 2,0%, соответственно (Рис. 4). Достоверных изменений всхожести изучаемых образцов в процессе подсушивания семян в течение 8 недель не произошло (рис. 5).

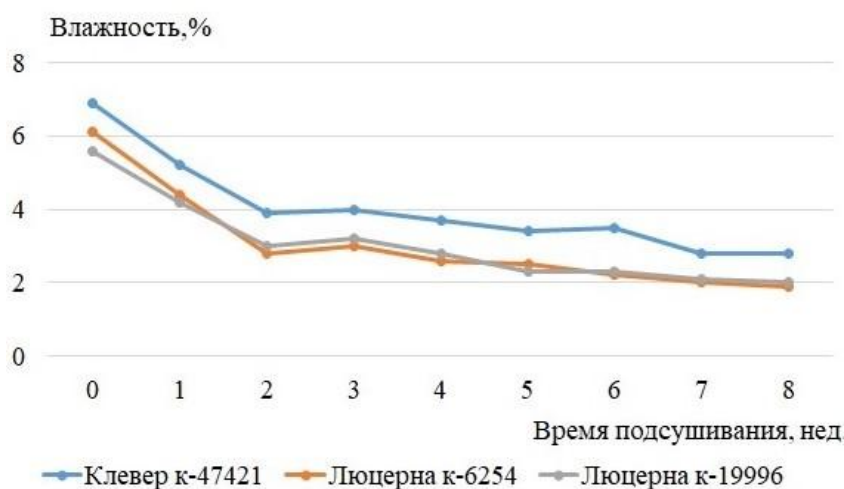


Рис. 4 – Динамика высушивания семян клевера и люцерны с помощью силикагеля (соотношение семена: силикагель=1:10)

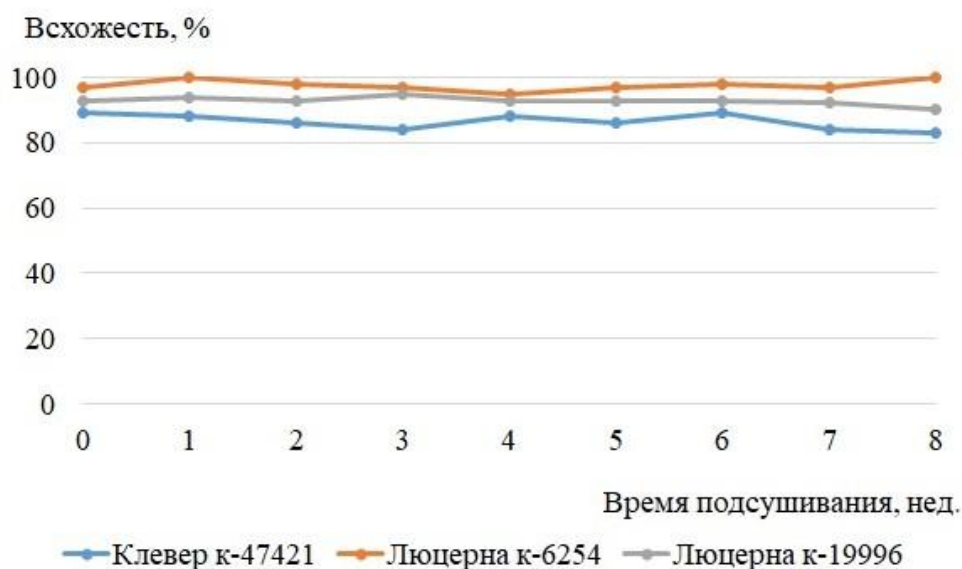


Рис. 5 – Влияние высушивания семян клевера и люцерны с помощью силикагеля (соотношение семена: силикагель=1:10) на их всхожесть

Таким образом, подсушивание семян многолетних бобовых трав – клевера лугового и люцерны посевной, при помощи силикагеля (соотношение семена : силикагель = 1:10) в течение 7 недель, сопровождаемое еженедельной заменой использованного силикагеля на свежий, позволяет снизить влажность семян клевера лугового до 2,8%, а люцерны посевной – до 1,9-2,0%, без снижения их всхожести. Следующий этап разработки методики получения ультра сухих семян клевера лугового и люцерны посевной – проверка этого режима подсушивания семян в опытах по длительному хранению, а также в модельных опытах по ускоренному старению семян.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ВИР № 0662-2018-0004 по теме «Совершенствование стратегии, теории, методов и технологий ex situ хранения генетических ресурсов растений без потери их жизнеспособности».

Funding

The work was carried out within the framework of the state task of N.I.Vavilov Research Institute of Plant Industry, St. Petersburg, Russia No. 0662-2018-0004 on “Improving Strategy, Theory, Methods, and Technologies of Ex Situ Storage of Plant Genetic Resources with no Loss of their Viability.”

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. The Convention on Biological Diversity. 1993. Preamble. URL: <https://www.cbd.int/convention/articles/default.shtml?a=cbd-00> (accessed: 24.08.2018).
2. FAO. The Second Report on the State of the World's Plant Genetic Resources for Food and Agriculture. Rome: Commission on genetic resources for food and agriculture FAO, 2010. URL: http://www.fao.org/docrep/013/i1500e/i1500e_brief.pdf (accessed 24.08.2018).
3. Roberts E. H. Viability of seeds / E. H. Roberts. – London: Chapman and Hall Ltd., 1972. – 448 p.
4. Walters C. Structural mechanics of seed deterioration: Standing the test of time / C. Walters, D. Ballesteros, V. A. Vertucci // Plant Science. – 2010. V.179. – P. 565–573. doi:10.1016/j.plantsci. 2010.06.016.
5. Justice O. L. Principles and practices of seed storage / O. L. Justice, L. N. Bass – Washington: U. S. Government Printing Office, 1978. – 289 p.
6. Roberts E. H. Predicting the storage life of seeds / E. H. Roberts // Seed Science and Technology. – 1973. – V1. – №3. – P.499-514.
7. Hong T.D. A protocol to determine seed storage behavior / T. D. Hong, R. H. Ellis. – Rome: IPGRI, 1996. – 64 p.
8. Genebank standards for plant genetic resources for food and agriculture. Rome: FAO, 2014.URL: <http://www.fao.org/3/a-i3704e.pdf> (accessed 24.08.2018).
9. Ellis R.H. The quantification of ageing and survival in orthodox seeds /R. H. Ellis, E. H. Roberts // Seed Science and Technology. – 1981. – V 9. –№2.– P.373-409.
10. Perez-Garcia F. High viability recorded in ultra-dry seeds of 37 species of Brassicaceae after almost 40 years of storage / F. Perez Garcia, M. E. Gonzalez-Benito, C. Gomez-Campo // Seed Science and Technology/ – 2007. – 35(1) – P. 143–153. DOI: 10.15258/sst.2007.35.1.13.
11. Vertucci C W. Theoretical basis of protocols for seed storage / C. W Vertucci, E. E. Roos. // Plant Physiology. – 1990. – V.94. – P. 1019-1023.
12. Филипенко Г. И. Хранение ультрасухих семян как способ сохранения генетических ресурсов растений / Г. И. Филипенко, О. Н. Забегаева, Е. А. Баранова // Путь науки. – Волгоград. – 2015. – №10 (20). – С.39-43.
13. Филипенко Г. И. Оптимизация влажности семян масличных культур для увеличения продолжительности их хранения в генетических банках растений / Г. И. Филипенко, О. Н. Забегаева, Е. А. Баранова // Путь науки. – Волгоград. – 2016. – № 11 (33). – Т.1. – С. 50-53.
14. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести // в сб.: Семена сельскохозяйственных культур. Методы анализа. – М.: Стандартиформ, 2011. – 247 с.
15. ГОСТ 12041-82. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения влажности // в сб.: Семена сельскохозяйственных культур. Методы анализа. – М.: Стандартиформ, 2011. – 247 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. The Convention on Biological Diversity. 1993. Preamble. URL: <https://www.cbd.int/convention/articles/default.shtml?a=cbd-00> (accessed: 24.08.2018).
2. FAO. The Second Report on the State of the World's Plant Genetic Resources for Food and Agriculture. Rome: Commission on genetic resources for food and agriculture FAO, 2010. URL: http://www.fao.org/docrep/013/i1500e/i1500e_brief.pdf (accessed 24.08.2018).
3. Roberts E. H. Viability of seeds / E H. Roberts. – London: Chapman and Hall Ltd., 1972. – 448 p.
4. Walters C. Structural mechanics of seed deterioration: Standing the test of time / C. Walters, D. Ballesteros, V. A. Vertucci // Plant Science. – 2010. V.179. – P. 565–573. doi:10.1016/j.plantsci. 2010.06.016.
5. Justice O. L. Principles and practices of seed storage / O. L Justice, L. N. Bass – Washington: U. S. Government Printing Office, 1978. – 289 p.
6. Roberts E. H. Predicting the storage life of seeds / E. H. Roberts // Seed Science and Technology. – 1973. – V1. – №3. – P.499-514.
7. Hong T. D. A protocol to determine seed storage behavior / T. D. Hong, R. H. Ellis. – Rome: IPGRI, 1996. – 64 p.
8. Genebank standards for plant genetic resources for food and agriculture. Rome: FAO, 2014.URL: <http://www.fao.org/3/a-i3704e.pdf> (accessed 24.08.2018).
9. Ellis R. H. The quantification of ageing and survival in orthodox seeds /R. H. Ellis, E. H. Roberts // Seed Science and Technology. – 1981. – V 9. –№2.– P.373-409.
10. Perez-Garcia F. High viability recorded in ultra-dry seeds of 37 species of Brassicaceae after almost 40 years of storage / F. Perez Garcia, M. E. Gonzalez-Benito, C Gomez-Campo // Seed Science and Technology/ – 2007. – 35(1) – P. 143–153. DOI: 10.15258/sst.2007.35.1.13.

11. Vertucci C. W. Theoretical basis of protocols for seed storage / C. W. Vertucci, E. E. Roos. // Plant Physiology. – 1990. – V.94. – P. 1019-1023.
12. Filipenko G. I. Khraneniye ul'trasukhikh semyan kak sposob sokhraneniya geneticheskikh resursov rasteniy [Ultra-dry seeds storage as a way of plant genetic resources conservation] / G. I. Filipenko, O. N. Zabegaeva, E. A. Baranova // Put' nauki [The Way of Science]. – Volgograd. – 2015. – № 10 (20). – P. 39-43. [in Russian].
13. Filipenko G. I. Optimizatsiya vlazhnosti semyan maslichnykh kul'tur dlya uvelicheniya prodolzhitel'nosti ikh khraneniya v geneticheskikh bankakh rasteniy [Optimizing moisture content of oilseeds to improve their longevity in plant gene banks] / G. I. Filipenko, O. N. Zabegaeva, E. A. Baranova // Put' nauki [The Way of Science]. – Volgograd. – 2016. – № 11 (33). – Vol.1. – P. 50-53. [in Russian]. [in Russian].
14. GOST 12038-84. Semena sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. Metody opredeleniya vskhozhesti // v sb.: Semena sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. Metody analiza [Seeds of agricultural crops. Methods for determining germination // in Seeds of agricultural crops. Methods of analysis]. – M.: Stadartinform, 2011. – 247 p. [in Russian].
15. GOST 12041-82. Semena sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. Metody opredeleniya vlazhnosti. // v sb.: Semena sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. Metody analiza [Seeds of agricultural crops. Methods for determining moisture // in: Seeds of agricultural crops. Methods of analysis]. – M.: Stadartinform, 2011. – 247 p. [in Russian].

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.021>**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТЕНТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ МОТИВАЦИИ ДЕТЕЙ К ЛЕЧЕНИЮ НА ОРТОДОНТИЧЕСКОМ ПРИЕМЕ**

Научная статья

Бахур Е.С.¹, Восканян А.Р.², Волобуев В.В.^{3,*}, Митропанова М.Н.⁴² ORCID: 0000-0001-7082-6404;³ ORCID: 0000-0001-9752-6911;⁴ ORCID: 0000-0002-7083-5025,^{1, 2, 3, 4} Кубанский государственный медицинский университет, Краснодар, Россия

*Корреспондирующий автор (vladimir.volobueff[at]yandex.ru)

Аннотация

В статье приводятся результаты исследования по повышению мотивации к ортодонтическому лечению детей, путем демонстрации тематического мультфильма. Использование элементов визуальной педагогики (визуального контента) позволило поднять интерес и повысить уровень мотивации пациентов к дальнейшему ортодонтическому лечению (у 100% детей опытной группы). Отмечено повышение уровня гигиены на 67,6% по сравнению с исходным уровнем, а уровня стоматологического комплаенса – на 30,6%. Это в свою очередь позволило улучшить самооценку детей и уровень коммуникабельности и, в целом, повысить качество жизни.

Ключевые слова: мотивация, комплаенс, визуальный контент, ортодонтия.

USE OF VISUAL CONTENT TO BOOST MOTIVATION OF CHILDREN TO GET ORTHODONTIC TREATMENT

Research article

Bakhur E.S.¹, Voskanyan A.R.², Volobuyev V.V.^{3,*}, Mitropapanova M.N.⁴² ORCID: 0000-0001-7082-6404;³ ORCID: 0000-0001-9752-6911;⁴ ORCID: 0000-0002-7083-5025,^{1, 2, 3, 4} Kuban State Medical University, Krasnodar, Russia

* Correspondent author (vladimir.volobueff[at]yandex.ru)

Abstract

The article presents the results of a study aimed at increasing motivation of children to get orthodontic treatment by means of showing thematic cartoons. Using the elements of visual pedagogics (visual content) allowed raising interest and the level of the patients' motivation for further orthodontic treatment (100% of children in the experimental group). An increase in the level of hygiene was noted in 67.6% compared with the baseline, and the level of dental compliance rose by 30.6%. This, in turn, has improved the children's self-esteem, the level of their sociability and, in general, the quality of life.

Keywords: motivation, compliance, visual content, orthodontics.

Актуальность

Эстетика челюстно-лицевой области играет важную роль в определении внешнего вида лица человека. Внешний вид способствует самоуверенности и, тем самым, обеспечивает социальное признание личности. Эстетические нарушения, в том числе и наличие зубочелюстных аномалий, непосредственно влияют на качество жизни пациентов, оказывая влияние на самовосприятие внешности, особенно на этапе жизни, когда происходит интенсивное социальное и аффективное взаимодействие. Для детей и подростков важна физическая привлекательность, как фактор, влияющий на социальные отношения [11], [13]. Осознание пациентом факта отсутствия гармонии затрудняет общение, способствует появлению застенчивости, дети менее улыбкивы, может формироваться привычка прикрывать рот рукой при смехе и разговоре. У пациентов с нарушением эстетики зубов снижена самооценка [5].

Оценка стоматологического качества жизни определяется субъективными параметрами, определяющими влияние здоровья полости рта на качество жизни человека наряду с оценкой его нужды в стоматологическом лечении [2], [10]. При этом значительная роль отводится ортодонтической патологии, ввиду ее широкого распространения [1].

Как показывают исследования с участием подростков, молодежь, прошедшая ортодонтическое лечение, сообщили о меньшем количестве эстетических неудобств, связанных с улыбкой, и стеснения в общении со сверстниками. По результатам было установлено, что эстетика и социальные аспекты качества здоровья полости рта послужили первоочередной причиной для обращения за ортодонтической помощью [12], [14].

При оценке эффективности ортодонтического лечения используется ряд объективных параметров (антропометрические данные, рентгенологические данные, фотометрия и пр.). Однако, большое значение имеет субъективное восприятие самим пациентом своего состояния [8].

Вместе с тем, определенную проблему представляет низкий уровень мотивации пациентов к стоматологическому лечению, особенно детей [7]. Важную роль в формировании комплаенса играют родители ребенка. Как показывают наши исследования, уровень приверженности к лечению отличается в различных социальных группах, и зависит от ряда сопутствующих факторов: наличие соматической патологии, уровень образованности родителей, степень умственного развития, осведомленность пациента проводимых манипуляциях [3], [4].

Субъективное недовольство имеющимися нарушениями прикуса, провоцирующие эстетические нарушения, является первичным фактором мотивации человека к обращению за ортодонтической помощью [15]. Улучшение эстетических параметров челюстно-лицевой области, достигаемое длительным ортодонтическим лечением, подразумевает особое внимание к психологическому статусу пациента и определяет творческий подход к общению. Способность к адаптации, связанной с определенным типом дискомфорта, и полное согласие с лечением требует высокого уровня комплаентности ортодонтического пациента [9].

В литературе встречается описание методик для повышения мотивации детей к ортодонтическому лечению. Москалёва И.В. с соавт. (2011) [6] предлагают использовать тематические мультфильмы, что позволяет повысить комфорт и интерес ребенка к проводимому лечению.

Цель – оценить уровень комплаенса пациентов перед ортодонтическим лечением и повысить уровень мотивации к лечению, путем использования демонстрационных материалов.

Материалы и методы

В исследовании приняли участие 148 детей в возрасте от 6 до 10 лет, которые обратились в детское стоматологическое отделение стоматологической поликлиники ФГБОУ ВО КубГМУ Минздрава России за ортодонтической помощью. После проведенной комплексной диагностики (исследование диагностических моделей, ортопантомография, фотометрия лица) определено, что всем детям показано ношение съемных пластиночных аппаратов. Проведение стоматологических манипуляций осуществлялось при наличии письменного информированного согласия родителей.

Первым этапом пациентам было предложено заполнить анкету для определения уровня стоматологического комплаенса [3]. Пациенты, набравшие в анкетировании менее 24 баллов (средний и низкий уровень стоматологического комплаенса) продолжили участие в исследовании. В итоге, из них были сформированы опытная (47 человек) и контрольная (39 человека) группы.

Детям опытной группы было разъяснены этапы предстоящего лечения, проведен урок гигиены полости рта и даны стандартные рекомендации по ношению и уходу за ортодонтическим аппаратом. Далее им предлагалось ответить на несколько вопросов, касающихся отношения ребенка к имеющейся ортодонтической патологии и предстоящему лечению (Рис. 1).

PRIVET :) VALERs Сколько тебе лет? _____

Какой твой любимый герой мультфильма? _____

Носил ли ты раньше пластинки? _____ да _____ нет _____

Носит ли кто-то из твоих друзей/братьев, сестер/одноклассников пластинку или брекет? _____ да _____ нет _____

Степняешься ли ты своих зубов? _____ да _____ нет _____

Знаешь ли ты зачем нужны пластинки/брекеты? Если да, то расскажи для чего _____

Привет :) Сколько тебе лет? _____

Нравятся ли тебе твои зубки? _____ да _____ нет _____ я стесняюсь улыбаться _____ мне очень нравится улыбаться _____

Носила ли ты раньше пластинку? _____ да _____ нет _____

Носит ли кто-то из твоих друзей/братьев, сестер/одноклассников пластинку или брекет? _____ да _____ нет _____

Знаешь ли ты зачем нужны пластинки и брекет? _____ да _____ нет _____

Если знаешь, то напши зачем :) _____

Рис. 1 – Вопросы, предлагаемые детям до лечения

Дополнительно для повышения мотивации демонстрировали разработанный нами тематический мультфильм. Главными героями в нем выступали популярные в настоящее время герои комиксов и мультфильмов, что повышало интерес и вызывало желание подражать им (Рис. 2).

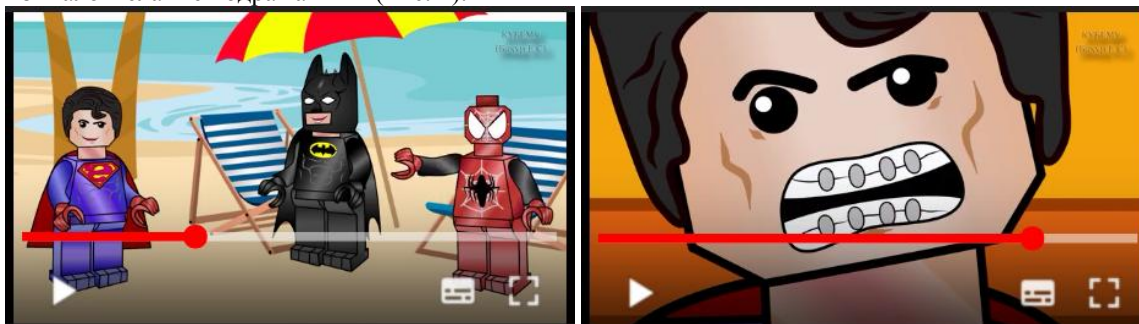


Рис. 2 – Кадры из тематического мультфильма

После просмотра детей просили поделиться впечатлением от мультфильма и указать, изменилось ли их отношение к ортодонтическим аппаратам (Рис. 3).

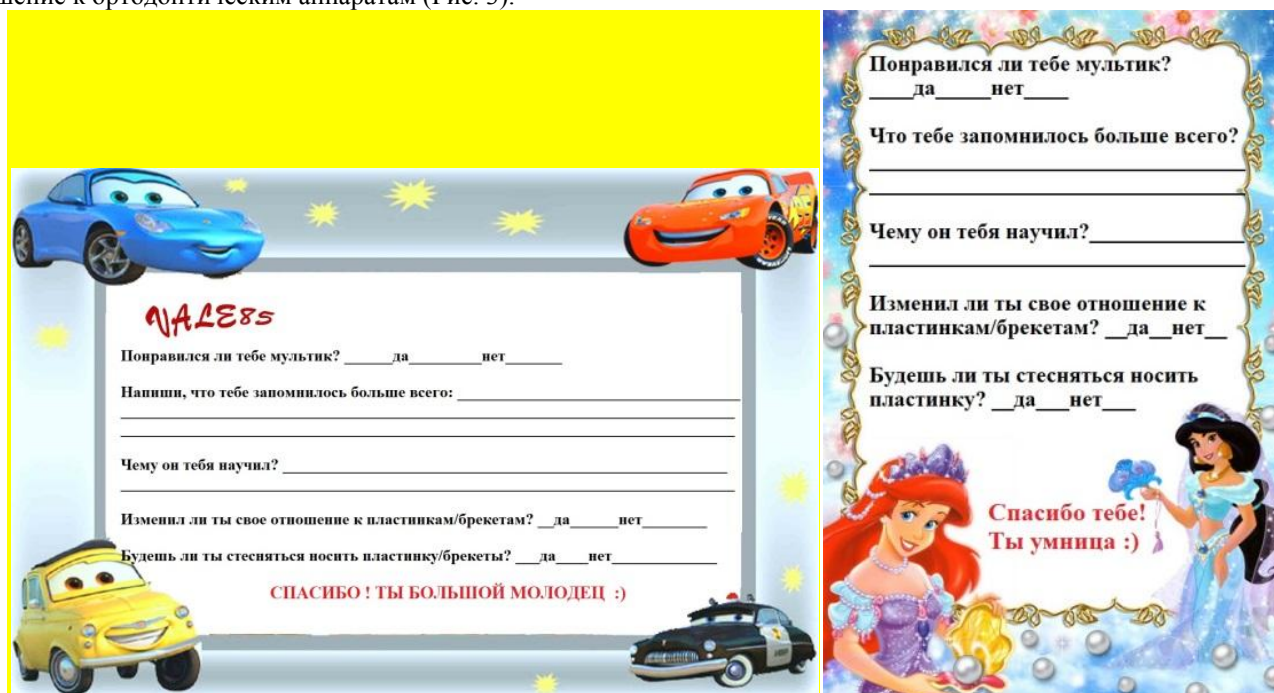


Рис. 3 – Вопросы, предлагаемые детям после просмотра мультфильма

Дети контрольной группы получили аналогичные рекомендации, но без показа тематического мультфильма.

Наблюдение за всеми пациентами проводилось в течение года, с периодическими контрольными посещениями интервалом в 1-1,5 месяца с оценкой уровня гигиены полости рта. В конце периода наблюдения было проведено повторное анкетирование.

Для оценки уровня гигиены полости рта использовали индекс Федорова-Володкиной (1971). Статистическую оценку результатов проводили с использованием программного обеспечения «Microsoft Excel 2010».

Результаты

После проведения диагностических манипуляций нозологические формы ортодонтической патологии составили следующее процентное распределение (Табл. 1).

Таблица 1 – Структура ортодонтической патологии у обследованных детей (%)

Группа Нозология	Опытная (N=47)	Контрольная (N=39)
Дистальная окклюзия	59,57	53,84
Мезиальная окклюзия	34,04	30,77
Глубокая резцовая окклюзия	21,28	23,07
Открытая резцовая дезокклюзия	14,89	12,82
Перекрестная окклюзия	57,45	47,72
Сужение верхнего зубного ряда	53,19	41,03
Сужение нижнего зубного ряда	36,17	30,77
Скученность зубов нижней челюсти	31,91	28,20

При анкетировании по определению исходного уровня стоматологического комплаенса на момент начала лечения выявлено, что в опытной группе среднее значение составило $17,38 \pm 2,73$, а в контрольной – $16,13 \pm 2,95$.

Результаты опроса пациентов опытной группы распределились следующим образом:

- 100% респондентов ранее не лечились у врача-ортодонта;
- 53,2% детей опытной группы отметили, что имеют друзей и одноклассников, которые носят ортодонтические конструкции;
- 89,4% опрошенных стесняются своих зубов;
- 87,2% в исследуемой группе указали, что пластинки необходимы для формирования правильного зубного ряда и красивой улыбки.

Значение уровня гигиены полости рта в данной группе составило, в среднем, $2,38 \pm 0,36$, в контроле – $2,48 \pm 0,51$, что соответствует неудовлетворительной гигиене.

При контрольном приеме через год в опытной группе у 100% детей отмечено улучшение по клинические признакам и результатам дополнительных методов обследования (в т. ч. 3 пациента закончивших лечение). Со слов родителей, дети стали более уверенными в себе, чаще стали улыбаться, улучшилось самовосприятие.

В результате повторного анкетирования среднее значение уровня стоматологического комплаенса повысилось до $25,06 \pm 1,59$, что соответствует высокому уровню. Значение уровня гигиены полости рта улучшилось на 67,6% и составило $1,42 \pm 0,21$ (хорошая гигиена).

В контрольной группе клиническое улучшение отмечено у 82,1% детей, находящихся на лечении (7 детей отказались от лечения ввиду субъективных сложностей). Стоит отметить, что 18 (46,2%) детей, со слов родителей, не регулярно носили аппарат, а 6 пациентам (15,4%) аппарат был изготовлен повторно, ввиду потери предыдущего. Уровень стоматологического комплаенса у данной категории детей составил $21,05 \pm 2,04$ (средний уровень), а уровень гигиены – $1,89 \pm 0,32$ (удовлетворительная гигиена).

Выводы

1. Использование визуального контента (тематические мультфильмы) позволило поднять интерес и повысить уровень мотивации пациентов к дальнейшему ортодонтическому лечению (до 100% в опытной группе).

2. Уровень гигиены у детей опытной группы за период лечения повысился на 67,6% по сравнению с исходным уровнем, а значение уровня стоматологического комплаенса – на 30,6%.

3. Дети контрольной группы менее охотно посещали врача-ортодонта, имели место пропуски приема и утеря ортодонтических аппаратов. Сами аппараты находились в неудовлетворительном гигиеническом состоянии (гигиена улучшилась, в среднем, на 23,4%), родители жаловались на отказ ребенка носить пластинку назначенный промежуток времени (уровень комплаенса повысился на 23,4%).

Низкий уровень мотивации у детей контрольной группы привел к формированию недостаточного благоприятных условий, что в свою очередь может служить преградой для терапевтического сотрудничества.

Благоприятный фон, которого удалось достичь в ходе ортодонтического лечения детей опытной группы, может послужить хорошей основой для взаимодействия пациентов со стоматологами других профилей и достижения максимальной эффективности ортодонтического лечения, что в свою очередь приведет к улучшению самооценки детей, повышению уровня коммуникабельности и, в целом, повышению качества жизни.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Восканян А.Р. Распространенность и характер зубочелюстных аномалий у детей, проживающих в г. Краснодаре и в отдельных территориях Краснодарского края / А.Р. Восканян, Ф.С. Аюпова, В.Я. Зобенко и др. // Вестник Волгоградского государственного медицинского университета. – 2017. – №4 (64). – С. 67-71.

2. Гажва С.И. Качество жизни пациентов с заболеваниями полости рта (обзор литературы) / С.И. Гажва, Ю.В. Гажва, Р.С. Гулуев // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=6466> (дата обращения: 13.08.2018).

3. Гуленко О.В. Уровень стоматологического комплаенса у детей с психоневрологическими расстройствами / О.В. Гуленко, В.В. Волобуев, С.Б. Хагурова и др. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – №3. – С. 571-578.

4. Лисовская Е.Д. Факторы, влияющие на комплаентность стоматологических пациентов / Е.Д. Лисовская // Сибирское медицинское обозрение. – 2015. – №6. – С. 92-95.

5. Митин, Н.Е. Влияние аномалий и деформаций зубочелюстной системы на психоэмоциональное состояние человека / Н.Е. Митин, В.Э. Тихонов, М.Д. Абдиркин и др. // Здоровье и образование в XXI веке. – 2017. – №10 (19). – С. 237-239.

6. Москалёва И.В. Методика повышения уровня мотивации ортодонтического лечения съёмными аппаратами у детей 6-8 лет / И.В. Москалёва, А.С. Корнеева, Л.Н. Пашукевич и др. // Стоматолог. – 2011. – №3. – С. 36-39.

7. Савина Е.А. Взаимосвязь стоматологического статуса, данных самооценки и мотивации к лечению / Е.А. Савина, Н.В. Булкина, В.В. Мусумова и др. // Саратовский научно-медицинский журнал. – 2011. – Т.7. – №1. – С. 326-327.

8. Терехова Т.Н. Качество жизни, связанное с состоянием органов полости рта, пациентов с зубочелюстными аномалиями / Т.Н. Терехова, Т.В. Терехова // Медицинский журнал. – 2016. – №4(58). – С. 125-130.

9. Фирсова И. В. Причины некомплаентного поведения пациентов, проходящих ортодонтическое лечение / И.В. Фирсова, М.В. Вологина, В.В. Бавлакова и др. // Волгоградский научно-медицинский журнал. – 2018. – №1. – С. 30-32.

10. Хайрзаманова К.А. Влияние зубочелюстных аномалий на качество жизни пациентов, находящихся на ортодонтическом лечении / К.А. Хайрзаманова, И.Р. Исхаков, А.И. Исаева и др. // Успехи современной науки и образования. – 2017. – Т.9. – №4. – С. 49-53.

11. Borzabadi-Farahani A. A review of the evidence supporting the aesthetic orthodontic treatment need indices / A. Borzabadi-Farahani // Prog. Orthod. – 2012. – Nov. – №13(3). – P. 304-13. Doi: 10.1016/j.pio.2012.03.003.

12. Claudino D. Malocclusion, dental aesthetic self-perception and quality of life in a 18 to 21 year-old population: a cross section study / D. Claudino, J. Traebert // BMC Oral Health. – 2013. – Jan. - № 13. P 3-9. Doi: 10.1186/1472-6831-13-3.

13. De Paula D.F. Psychosocial impact of dental esthetics on quality of life in adolescents: association with malocclusion, self-image, and oral health-related issues / D.F. De Paula, N.C.M. Santos, E.T. Silva and others // Angle Orthod. – 2009. – №79. – P. 1188-1193.

14. Kiyak H.A. Does orthodontic treatment affect patients' quality of life? / H.A. Kiyak // J. Dent. Educ. – 2008. – №72. – P. 886-894.

15. Prabhu S. Prevalence of malocclusion, aesthetic self-perception and their correlation among 18 to 24 years old college students in Chennai / S. Prabhu, M. Divya, K.V. Sneha and others // J. Oral Hyg. Health – 2017. – Vol. 5. – P. 225-229. Doi: 10.4172/2332-0702.1000225

Список литературы на английском языке / References in English

1. Voskanyan A.R. Rasprostranennost' i karakter zubochelyustny'x anomalij u detej, prozhivayushhix v g. Krasnodare i v otel'ny'x territoriyax Krasnodarskogo kraja [Prevalence and character of dentoalveolar anomalies in children living in Krasnodar and in some territories of Krasnodar region] / A.R. Voskanyan, F.S. Ayupova, V.Ya. Zobenko and others // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo medicinskogo universiteta. [Bulletin of the Volgograd state medical University] – 2017. – №4 (64). – P. 67-71. [in Russian]
2. Gazhva S.I. Kachestvo zhizni pacientov s zabolevaniyami polosti rta (obzor literatury) [Quality of life of patients with oral diseases (literature review)] / S.I. Gazhva, Yu.V. Gazhva, R.S. Guluev // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. [Modern problems of science and education] – 2012. – № 4. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=6466> (data obrashheniya: 13.08.2018). [in Russian]
3. Gulenko O.V. Uroven' stomatologicheskogo komplaensa u detej s psixonevrologicheskimi rasstrojstvami [The level of dental compliance in children with neuropsychiatric disorders] / O.V. Gulenko, V.V. Volobuev, S.B. Xagurova and others // Mezhdunarodny'j zhurnal prikladny'x i fundamental'ny'x issledovanij. [International journal of applied and fundamental research] – 2015. – №3. – P. 571-578. [in Russian]
4. Lisovskaya E.D. Faktory, vliyayushhie na komplaentnost' stomatologicheskix pacientov [Factors affecting the compliance of dental patients] / E.D. Lisovskaya // Sibirskoe medicinskoe obozrenie. [Siberian medical review] – 2015. – №6. – P. 92-95. [in Russian]
5. Mitin N.E. Vliyanie anomalij i deformacij zubochelyustnoj sistemy na psixoe'mocional'noe sostoyanie cheloveka [Influence of anomalies and deformities of the dentition system on the psycho-emotional state of a person] / N.E. Mitin, V.E. Tixonov, M.D. Abdirkin and others // Zdorov'e i obrazovanie v XXI veke. [Health and Education in millenium] – 2017. – №10 (19). – P. 237-239. [in Russian]
6. Moskalyova I.V. Metodika povы'sheniya urovnya motivacii ortodonticheskogo lecheniya s'emny'mi apparatami u detej 6-8 let [Method of increasing the level of motivation of orthodontic treatment with removable devices in children 6-8 years] / I.V. Moskalyova, A.S. Korneeva, L.N. Pashukevich and others // Stomatolog. [Dentist] – 2011. – №3. – P. 36-39. [in Russian]
7. Savina E.A. Vzaimosvyaz' stomatologicheskogo statusa, danny'x samoochenki i motivacii k lecheniyu [The relationship of dental status, self-reported data and motivations for treatment] / E.A. Savina, N.V. Bulkina, V.V. Musumova and others // Saratovskij nauchno-medicinskij zhurnal. [Saratov journal of medical scientific research] – 2011. – T.7. – №1. – P. 326-327. [in Russian]
8. Terexova T.N. Kachestvo zhizni, svyazannoe s sostoyaniem organov polosti rta, pacientov s zubochelyustny'mi anomalijami [Quality of life associated with the state of the oral organs, patients with dentoalveolar anomalies] / T.N. Terexova, T.V. Terexova // Medicinskij zhurnal. [Medical Journal] – 2016. – №4 (58). – P. 125-130. [in Russian]
9. Firsova I. V. Prichiny nekomplaentnogo povedeniya pacientov, proxodyashhix ortodonticheskoe lechenie [Causes of non-compliant behavior of patients undergoing orthodontic treatment] / I.V. Firsova, M.V. Vologina, V.V. Bavlakova and others // Volgogradskij nauchno-medicinskij zhurnal. [Volgograd scientific medical journal] – 2018. – №1. – P. 30-32. [in Russian]
10. Xajrzamanova K.A. Vliyanie zubochelyustny'x anomalij na kachestvo zhizni pacientov, naxodyashhixsya na ortodonticheskom lechenii [Influence of dentoalveolar anomalies on the quality of life of patients undergoing orthodontic treatment] / K.A. Xajrzamanova, I.R. Isxakov, A.I. Isaeva and others // Uspexi sovremennoj nauki i obrazovaniya. [Success of modern science and education] – 2017. – T.9. – №4. – P. 49-53. [in Russian]
11. Borzabadi-Farahani A. A review of the evidence supporting the aesthetic orthodontic treatment need indices / A. Borzabadi-Farahani // Prog. Orthod. – 2012. – Nov. – №13(3). – P. 304-13. Doi: 10.1016/j.pio.2012.03.003.
12. Claudino D. Malocclusion, dental aesthetic self-perception and quality of life in a 18 to 21 year-old population: a cross section study / D. Claudino, J. Traebert // BMC Oral Health. – 2013. – Jan. - № 13. R 3-9. Doi: 10.1186/1472-6831-13-3.
13. De Paula D.F. Psychosocial impact of dental esthetics on quality of life in adolescents: association with malocclusion, self-image, and oral health-related issues / D.F. De Paula, N.C.M. Santos, E.T. Silva and others // Angle Orthod. – 2009. – №79. – P. 1188-1193.
14. Kiyak H.A. Does orthodontic treatment affect patients' quality of life? / H.A. Kiyak // J. Dent. Educ. – 2008. – №72. – P. 886-894.
15. Prabhu S. Prevalence of malocclusion, aesthetic self-perception and their correlation among 18 to 24 years old college students in Chennai / S. Prabhu, M. Divya, K.V. Sneha and others // J. Oral Hyg. Health – 2017. – Vol. 5. – P. 225-229. doi:10.4172/2332-0702.1000225.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.022>**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТИЛЕНОВОГО СИНЕГО В ИНТРАОПЕРАЦИОННОМ ПОИСКЕ
ОКОЛОЩИТОВИДНЫХ ЖЕЛЕЗ**

Научная статья

Зубков А.В.^{1,*}, Краюшкин А.И.², Загребин В.Л.³^{1, 2, 3} Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия

* Корреспондирующий автор (zubkov.a.v.74.ru[at]mail.ru)

Аннотация

Предложена и апробирована оригинальная методика для интраоперационной идентификации околощитовидных желез с применением анилиновых красителей. Данная методика, подразумевает под собой, введение 0,1% водного раствора метиленового синего в нижнюю щитовидную артерию. Методика проста и не требует дополнительных затрат на специальное оборудование и другие дорогостоящие красители. Данный метод может быть взят на повседневное использование в работе хирургами-эндокринологами. Таким образом, простое и недорогое исследование может значительно сократить время оперативного вмешательства, держать под визуальным контролем при резекции щитовидной железы околощитовидные железы и возвратный гортанный нерв.

Ключевые слова: метиленовый синий, околощитовидные железы.**USE OF METHYLENE BLUE IN INTRAOPERATIVE SEARCH OF PARATHYROID GLANDS**

Research article

Zubkov A.V.^{1,*}, Krayushkin A.I.², Zagrebin V.L.³^{1, 2, 3} Volgograd State Medical University

* Corresponding author (zubkov.a.v.74.ru[at]mail.ru)

Abstract

The original technique for intraoperative identification of parathyroid glands with the use of aniline dyes was proposed and tested in this work. This technique implies the introduction of a 0.1% aqueous solution of methylene blue into the lower thyroid artery. The procedure is simple and does not require additional costs for special equipment and other expensive dyes. This method can be taken for everyday use in the work of endocrinology surgeons. Thus, a simple and inexpensive study can significantly reduce the time of surgery, keep the parathyroid glands and the recurrent laryngeal nerve under visual control when resecting the thyroid gland.

Keywords: methylene blue, parathyroid glands.**Введение**

Паратиреоидная хирургия одна из сложных отраслей хирургии. Анатомия околощитовидных желез (ОЩЖ) является элементом теоретического базиса эндокринной хирургии, владение которым позволяет снизить время оперативного вмешательства и значительно сократить число операционных осложнений. Знание эмбриогенеза ОЩЖ, является наилучшим проводником в их идентификации при нормальной локализации и при эктопиях [1], [3], [9].

При выполнении операции на ОЩЖ преследуется одна цель – удаление патологически измененных ОЩЖ и оставление интактных ОЩЖ. В паратиреоидной хирургии всегда стоит вопрос, какая из ОЩЖ патологически изменена и что сделать, для того, чтобы найти все ОЩЖ.

Тут находится самый большой вопрос в паратиреоидной хирургии, почему так важен опыт хирурга, для успешно проведенной операции на ОЩЖ и знание эмбриогенеза и мест типичной локализации ОЩЖ. В процессе эмбриогенеза ОЩЖ мигрируют из одной части шеи в другую. Таким образом, они находятся не всегда там, как бы предполагалось. В связи со сложным процессом миграции, ОЩЖ имеют наиболее переменную анатомию в организме человека. Поэтому ОЩЖ могут быть расположены в различной части шеи, от угла нижней челюсти вплоть до перикарда.

ОЩЖ развиваются из третьего и четвертого жаберных карманов наряду с другими органами шеи. Нижние ОЩЖ, формируются из третьего жаберного кармана, который также отвечает за эмбриогенез тимуса. Их обозначают как (ОП) или тимические. Верхние ОЩЖ, развиваются из четвертого жаберного кармана, совместно с щитовидной железой (ЩЖ), их обозначают (ОИВ) или щитовидные.

В процессе развития тимус и ЩЖ мигрируют из верхней части шеи в нижнюю часть, и увлекают вместе с собой и ОЩЖ. В связи с этим нижние ОЩЖ, как правило, остаются рядом с ЩЖ, а верхние мигрируют вместе с тимусом, и нередко обнаруживаются в переднем средостении.

Таким образом, при нормальных условиях эмбриогенеза, нижние ОЩЖ, занимают свое типичное место, которое находится во фронтальной плоскости в радиусе 2 см от точки пересечения нижней щитовидной артерии и верхнего гортанного нерва. Но они могут быть обнаружены и за грудиной. Типичное место расположения верхних ОЩЖ – место в радиусе между перекрестом верхнего гортанного нерва и нижних щитовидных артерий между трахеей и ЩЖ или сочленения перстневидного хряща с передним рогом щитовидного хряща. То есть, как правило, все четыре ОЩЖ находятся вокруг задней стороны ЩЖ. Но так происходит не всегда [3], [9], [10].

Сложный процесс миграции ОЩЖ во время внутриутробного развития, иногда затрудняет интраоперационную идентификацию желез. Верхняя ОЩЖ может вовлекаться в ткань щитовидной железы во время слияния ультимобранхиальных желез со срединным зачатком. Это объяснение не может применено к нижним ОЩЖ, которые не возникают из четвертого жаберного кармана. Однако описаны неоспоримые случаи включения нормальных или патологически измененных нижних ОЩЖ в нижние полюса ЩЖ. Частота интратиреоидных эктопий нижних и

верхних ОЩЖ находится в пределах от 0,5 до 4%. Нижние ОЩЖ приобретают высокие или низкие эктопии. Это связано с ходом миграции зачатка тимуса и ОЩЖ, протяженностью от угла нижней челюсти до перикарда. Факторы, замедляющие или препятствующие к опусканию паратимуса, приводят к высоким эктопиям по ходу каротидного футляра, от угла нижней челюсти до нижнего полюса доли ЩЖ. Частота таких эктопий не превышает 1–2%. Частота низких эктопия составляет от 4 до 5% случаев. Данная эктопия связана с задержкой нижних ОЩЖ и дислокацией их в переднее средостение на различную глубину.

Кроме врожденных эктопий, существуют и приобретенные. Возникающие вследствие миграции ОЩЖ под влиянием давления растущей опухоли. Чему также способствуют восходящее движение гортани и глотки в процессе глотания и присасывающее действие вследствие отрицательного внутригрудного давления. Таким образом, при опухолевой трансформации, ОЩЖ могут покидать места типичной локализации и перемещаться в эктопические места. Эти дислокации зависят от первичной топографии железы до возникновения в ней опухоли. Все это должно не уходить от внимания хирурга.

По данным различных источников, внутривенное капельное применение метиленового синего, нередко вызывает негативную неврологическую симптоматику, кардиотоксическое действие, аллергические реакции. Псевдоцианоз лишает анестезиологов возможности оценить истинный цвет кожных покровов. Также цвет кожи снижает социальную адаптацию и изменение психического статуса пациента.

Принимая во внимание то, что в 80% околощитовидных желез кровоснабжаются из ветвей нижней щитовидной артерии, нами была предложена идея селективного введения метиленового синего в нижнюю щитовидную артерию, для интраоперационного поиска ОЩЖ. Тем самым снижалось распределение и концентрация красителя в организме. В связи с чем, общие отрицательные последствия от воздействия метиленового синего были исключены [2], [4], [6], [7].

Цель

Определить возможность селективного использования метиленового синего для интраоперационной идентификации ОЩЖ для сокращения времени поиска ОЩЖ и развития осложнений во время операции.

Материалы и методы

В исследование были включены 60 пациентов с различными заболеваниями ЩЖ и ОЩЖ. Среди них 85% составили женщины (n=51) и 15% мужчин (n=9). В зависимости от возраста они были разделены на 5 возрастных групп (таблица №1).

Таблица 1 – Распределение пациентов по возрастным группам

Пол Возрастные группы	Мужчины		Женщины		Всего	
	Абс.	%	Абс.	%	Абс.	%
25-44 лет	2	22,22	7	13,73	9	15
44-60 лет	3	33,33	24	47,05	27	45
60-75 лет	3	33,33	12	23,53	15	25
75-90 лет	1	11,11	8	15,69	9	15
Более 90 лет	0		0		0	
Итого	9	100	51	100	60	100

На амбулаторном этапе лечения все больные были обследованы. При узловых и многоузловых образованиях ЩЖ, всем больным была выполнена тонкоигольная аспирационная биопсия для верификации диагноза. Достигнуто состояние эутиреоза у больных с диффузным токсическим и узловым токсическим зобом. И при поступлении на плановое оперативное лечение были распределены по следующим нозологиям, с учетом увеличения щитовидной железы по О.В. Николаеву, 1955 г. (таблица №2)

Таблица 2 – Распределение больных по нозологиям

Нозологическая форма	Пол	Степень увеличения ЩЖ по О.В. Николаеву					Число наблюдений	
		I	II	III	IV	V	Абс.	%
Узловой зоб	Муж.		1				1	1,7
	Жен.	3	2	1	1	1	8	13,3
Многоузловой зоб	Муж.	2			1		3	5
	Жен.	1	10	4	4	2	21	35
ДТЗ	Муж.	1		2			3	5
	Жен.	4	6	3	1	2	16	26,7
Рак ЩЖ	Муж.		1				1	1,7
	Жен.	1	3		1		5	8,3
Аденома ОЩЖ	Муж.		1				1	1,7
	Жен.			1			1	1,7
Всего		12	24	11	8	5	60	100

Больные после подготовки к оперативному лечению были оперированы под эндотрахеальным наркозом. В стандартной укладке больного, с валиком под лопатками и с запрокидыванием головы на 210°. Поперечным разрезом на 1,0–1,5 см выше яремной вырезки грудины. После обнажения и мобилизации ЩЖ приступали к идентификации ОЩЖ. На данном этапе выделялась нижняя щитовидная артерия рядом с капсулой ЩЖ. Под визуальным контролем возвратного гортанного нерва, у капсулы ЩЖ, на нижнюю щитовидную артерию накладывалась лигатура. Иглой для инъекций 22G вводили 1 мл 0,1% водного раствора метиленового синего в нижнюю щитовидную артерию. После чего ОЩЖ интенсивно окрашивались в темно-фиолетовый цвет. После обнаружения ипсилатеральных желез, данная процедура производилась на противоположной стороне для выявления ОЩЖ.

Объем и характер операций выполнен с учетом нозологии и степени зобной трансформации ЩЖ и патологии ОЩЖ. Во время оперативного вмешательства были выполнены следующие виды оперативных пособий: от органосохраняющих резекций до тиреоидэктомии с лимфодиссекцией. Таблица №3. С последующим гистологическим анализом препаратов. Послеоперационный период протекал гладко, без осложнений. В послеоперационном периоде не было зафиксировано специфических осложнений, таких как кровотечение, парезы и параличи гортанных нервов, гипопаратиреоз. Средний койко- день составил 4,7 дней.

Таблица 3 – Объем оперативного вмешательства в зависимости от диагноза

Диагноз	Объем операции	Мужчины		Женщины	
		Абс.	%	Абс.	%
Узловой зоб	Субтотальная резекция доли			3	5
	Резекция перешейка			1	1,7
	Гемитиреоидэктомия с перешейком	1	1,7	4	6,7
Многоузловой зоб	Гемитиреоидэктомия и субтотальная резекция противоположной доли	1	1,7	8	13,4
	Субтотальная резекция ЩЖ	1	1,7	6	10
	Тиреоидэктомия	1	1,7	7	11,7
Диффузный токсический зоб	Субтотальная резекция ЩЖ	1	1,7	4	6,7
	Тиреоидэктомия	2	3,4	12	20
Рак щитовидной железы	Гемитиреоидэктомия с перешейком			1	1,7
	Гемитиреоидэктомия с субтотальной резекцией противоположной доли			1	1,7
	Субтотальная резекция ЩЖ			1	1,7
	Тиреоидэктомия	1	1,7	1	1,7
	Тиреоидэктомия с лимфодиссекцией			1	1,7
Аденома околощитовидной железы	Удаление аденомы околощитовидной железы	1	1,7	1	1,7
Всего:		9	15,3	51	84,7

Результаты и обсуждение

В период с января по июнь 2015 года, в хирургическом отделении, были прооперированы 60 пациентов. Страдающие различными заболеваниями ЩЖ и ОЩЖ. Во время оперативного вмешательства нами удалось обнаружить 256 ОЩЖ. В процессе идентификации ОЩЖ учитывались их количество и расположение по отношению к ЩЖ. Изучая количественный состав, были получены следующие данные: в 3% случаев нами было обнаружено 3 ОЩЖ, в 84% наблюдений – 4, в 10% случаев – 5 ОЩЖ, 6 ОЩЖ было обнаружено в 3%. Изучая топографическое отношение ОЩЖ к соседним анатомическим образованиям, в частности к ЩЖ, как справа, так слева от средней линии, нами установлено, что в 6,3% случаев ОЩЖ располагались выше верхнего полюса ЩЖ. В 29,4% случаев ОЩЖ были выявлены в области верхней трети доли ЩЖ. В области средней трети боковой доли ЩЖ – в 16,2% случаев. В 42,7% наблюдений ОЩЖ находились на уровне нижней трети боковой доли ЩЖ. В 6,4% наблюдений, ОЩЖ были обнаружены ниже нижнего полюса ЩЖ. В процессе изучения количественного состава ОЩЖ, была выявлена тенденция к увеличению количества ОЩЖ от верхнего к нижнему полюсу ЩЖ.

По данным различных литературных источников, кровоснабжение околощитовидных желез осуществляется преимущественно из бассейна нижней щитовидной артерии. Однако, в приведенных в литературе данных в 15%

случаях кровоснабжение осуществляется из верхней щитовидной артерии и в 5% из анастомозов двух артериальных систем щитовидной железы. Принимая во внимание данный факт, всем больным, вовремя оперативного вмешательства, в нижнюю щитовидную артерию вводился 1 мл 0,1% водного раствора метиленового синего. В результате чего окрасилось 87,2% (224) ОЩЖ, 12,8% ОЩЖ (32) не окрасились. В виду того, что их кровоснабжение осуществлялось из других источников.

Выводы

Селективное использование метиленового синего, т.е. введение его в нижнюю щитовидную артерию, для интраоперационной идентификации ОЩЖ, позволяет сократить время поиска ОЩЖ и избежать различных осложнений во время операции. Данная методика проста в использовании и безопасна для пациента, не требует больших финансовых затрат. Указанный метод можно использовать в повседневной практике хирурга-эндокринолога.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Загребин В.Л. Предпосылки к изучению морфологии околощитовидных желез / Загребин В.Л., Зубков А.В., Краюшкин А.И. и др. // Волгоградский научно-медицинский журнал. 2015. № 1 (45). С. 11-16.
2. Зубков А.В. Метод фиксации околощитовидных желез раствором азиды натрия / Зубков А.В., Краюшкин А.И., Загребин В.Л. // Вестник Волгоградского государственного медицинского университета. 2017. № 2 (62). С. 109-110.
3. Краюшкин А.И. Новые аспекты в изучении морфологии околощитовидных желез как условие оптимизации оперативной техники при паратиреоидэктомии с учетом комплексного подхода / Краюшкин А.И., Загребин В.Л., Перепелкин А.И. и др. // Российский медико-биологический вестник им. академика И.П. Павлова. 2015. № 2. С. 144-148.
4. Романчишен А.Ф. Применение хромолимфографии для выбора объема операций у больных раком щитовидной железы // Эндокринная хирургия, 2014, №1. С 47-52.
5. Ярчевский Г.Ф. Контрастная тиреоидлимфография. Вопросы клинической и экспериментальной онкологии. М., 1978; с.279-283.
6. Ewing P. The mediastinum / Ewing P., Hardy J.D. // In Glenn's Thoracic and Cardiovascular Surgery Volume 1. 5th edition. Edited by: Baue A.E., Geha A.S., Hammond G.L., Laks H., Naunheim K.S. Connecticut: Appleton and Lange; 1991:569-594.
7. Henry J.-F. Applied embryology of the thyroid and parathyroid glands // Surgery of the thyroid and parathyroid glands. Philadelphia: Elsevier Science (USA), 2003.- P. 12-23.
8. Mariani G. Preoperative localization and radioguided parathyroid surgery / Mariani G., Gulec S.A., Rubello D. and others // J Nucl Med 2003, 44:1443-1458.
9. Randolph G.W. Surgery of the thyroid and parathyroid glands. Philadelphia: Elsevier Science (USA), 2003. — 620 p.
10. Organ C. H. Jr. The history of parathyroid surgery. 1850-1996: the excelsior surgical society 1998 Edward D. Churchill Lecture // J. Am. Col. Surg. 2000. V. 191. P. 284.
11. Wang C. The anatomic basis of parathyroid surgery // Ann. Surg. — 1976. — V. 183, — № 3. — P. 271—275.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Zagrebin V.L. Predposylki k izucheniyu morfologii okoloshchitovidnykh zhelez [Prerequisites for Study of Morphology of Parathyroid Glands] / Zagrebin V.L., Zubkov A.V., Krayushkin A.I. and others // Volgogradskiy nauchno-meditinskiy zhurnal [Volgograd Scientific Medical Journal]. 2015. No. 1 (45). P. 11-16. [in Russian]
2. Zubkov A.V. Metod fiksatsii okoloshchitovidnykh zhelez rastvorom azida natriya [Method of Parathyroid Glands Fixation with Sodium Azide Solution] / Zubkov A.V., Krayushkin A.I., Zagrebin V.L. // Volgogradskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta [Bulletin of Volgograd State Medical University]. 2017. No. 2 (62). P. 109-110. [in Russian]
3. Krayushkin A.I. Novyye aspekty v izuchenii morfologii okoloshchitovidnykh zhelez kak usloviye optimizatsii operativnoy tekhniki pri paratireoidektomii s uchetom kompleksnogo podkhoda [New Aspects in Study of Morphology of Parathyroid Glands as Condition for Optimization of Surgical Techniques in Parathyroidectomy, Considering Complex Approach] / Krayushkin A.I., Zagrebin V.L., Perepelkin A.I. and others // Rossiyskiy mediko-biologicheskiy vestnik im. akademika I.P. Pavlova [Pavlov Russian Medical Biological Bulletin]. 2015. No. 2. P. 144-148. [in Russian]
4. Romanchyshen A.F. Primeneniye khromolimfografii dlya vybora ob'yema operatsiy u bol'nykh rakom shchitovidnoy zhelezy [Application of Chromolymphography for Choice of Volume of Operations in Patients with Thyroid Cancer] // Endokrinnaya khirurgiya [Endocrine Surgery], 2014, №1. С 47-52. [in Russian]
5. Yarchevsky G.F. Kontrastnaya tireoidlimfografiya [State Philharmonic Society. Contrast thyroid lymphography] // Voprosy klinicheskoy i eksperimental'noy onkologii [Issues of clinical and experimental oncology]. М., 1978; p.279-283. [in Russian]
6. Ewing P. The mediastinum / Ewing P., Hardy J.D. // In Glenn's Thoracic and Cardiovascular Surgery Volume 1. 5th edition. Edited by: Baue A.E., Geha A.S., Hammond G.L., Laks H., Naunheim K.S. Connecticut: Appleton and Lange; 1991:569-594.
7. Henry J.-F. Applied embryology of the thyroid and parathyroid glands // Surgery of the thyroid and parathyroid glands. Philadelphia: Elsevier Science (USA), 2003.- P. 12-23.
8. Mariani G. Preoperative localization and radioguided parathyroid surgery / Mariani G., Gulec S.A., Rubello D. and others // J Nucl Med 2003, 44:1443-1458.
9. Randolph G.W. Surgery of the thyroid and parathyroid glands. Philadelphia: Elsevier Science (USA), 2003. — 620 p.
10. Organ C. H. Jr. The history of parathyroid surgery. 1850-1996: the excelsior surgical society 1998 Edward D. Churchill Lecture // J. Am. Col. Surg. 2000. V. 191. P. 284.
11. Wang C. The anatomic basis of parathyroid surgery // Ann. Surg. — 1976. — V. 183, — № 3. — P. 271—275.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.023>**ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЛГОРИТМА МЕСТНЫХ САНАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ У ДЕТЕЙ С ЭМПИЕМОЙ ПЛЕВРЫ**

Научная статья

Слесарев В.В.*

ORCID: 0000-0001-7908-9607,

Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М. Ф. Владимирского, Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (vyach[at]inbox.ru)

Аннотация

С целью улучшения результатов лечения детей с эмпиемой плевры и оценки эффективности различных методик местных санационных мероприятий проведен анализ результатов лечения при данной патологии у детей, которым выполнялось дренирование плевральной полости и торакоскопическая санация. С 2014 по 2018 гг. в отделении детской хирургии ГБУЗ МО МОНИКИ им. М.Ф.Владимирского находились на обследовании и лечении 56 детей с деструктивной пневмонией, осложненной эмпиемой плевры. Всем детям произведено дренирование плевральной полости с подключением системы аспирации. У 5 пациентов проводилась видеоторакоскопическая санация плевральной полости. Адекватное и своевременное дренирование плевральной полости в сочетании с ферментной и антибактериальной терапией показало себя эффективным методом лечения эмпиемы плевры. При отсутствии расправления легкого после дренирования, формировании осумкованных гнойных полостей на 10-12 сутки рационально применение торакоскопической санации плевральной полости.

Ключевые слова: эмпиема плевры, пневмония, дренирование, торакоскопия, дети.

DETERMINATION OF LOCAL SANITATION ACTIVITIES ALGORITHM IN CHILDREN WITH THE EMPIEMA OF PLEUR

Research article

Slesarev V.V.*

ORCID: 0000-0001-7908-9607,

Vladimirsky Moscow Regional Research Clinical Institute, Moscow, Russia

* Corresponding author (vyach[at]inbox.ru)

Abstract

In order to improve the results of treatment of children with pleural empyema and to evaluate the effectiveness of various methods of local sanatorium interventions, the results of treatment in this pathology in children who were treated with drainage of the pleural cavity and thoracoscopic sanitation were analyzed. Fifty six children with destructive pneumonia complicated by empyema of the pleura were on examination and treatment from 2014 to 2018 in the Department of Pediatric Surgery in Vladimirsky Moscow Regional Research Clinical Institute. All children were treated with draining of the pleural cavity with an aspiration system connected. Five patients underwent videotoracoscopic sanitation of the pleural cavity. Adequate and timely drainage of the pleural cavity in combination with enzyme and antibacterial therapy has proved to be an effective method of treating pleural empyema. In the absence of pulmonary dilatation after drainage, formation of confined purulent cavities for 10-12 days, rational use of thoracoscopic sanitation of the pleural cavity is rational.

Keywords: empyema of the pleura, pneumonia, drainage, thoracoscopy, children.

Актуальность

В структуре гнойной хирургической инфекции у детей одно из основных мест занимает деструктивная пневмония и ее осложнения. В последние годы отмечается рост числа детей с гнойно-деструктивными процессами в легких [1]. Развитие гнойно-деструктивных осложнений у пациентов с пневмонией связано с запоздалым и неадекватным лечением в стационарах общего профиля, а также с развивающейся резистентностью микрофлоры к антибиотикам. Одним из опасных осложнений пневмонии у детей остается эмпиема плевры, которая, по данным литературы, встречается в 16-50% эпизодов [1], [2], [3].

Традиционно для лечения эмпиемы плевры используют дренирование плевральной полости с подключением системы аспирации (активной или пассивной) с дальнейшим промыванием и введением в плевральную полость ферментных препаратов [4]. Хотя в зарубежной литературе есть данные, указывающие на возможность лечения эмпиемы плевры без дренирования плевральной полости, используя только антибиотики [5], [6]. В последние годы при эмпиеме плевры стала широко применяться торакоскопическая санация плевральной полости [7], [8], [9], особенно при неэффективном дренировании и развитии фиброторакса. Многие авторы указывают на сокращение длительности заболевания и сроков стационарного лечения при использовании торакоскопической санации [7], [9], [10], [11], [12]. В то же время, ряд проведенных рандомизированных клинических исследований не выявил достоверных различий по течению заболевания, срокам госпитализации и исходам между дренированием с введением в плевральную полость фибринолитиков и торакоскопической санацией при эмпиеме плевры у детей [13], [14].

Материалы и методы

В период с 2014 по 2018 гг. в отделении детской хирургии МОНИКИ им. М.Ф.Владимирского находилось на лечении 56 детей с деструктивной пневмонией, осложненной эмпиемой плевры. Возраст детей составил от 1,5 лет до 16 лет (в среднем $5,2 \pm 1,4$ года). Чаще всего эмпиема плевры развивалась у детей раннего (от 1 до 3 лет) возраста (37 детей - 66%). У 12 детей отмечался двусторонний процесс (21%). У 24 пациентов эмпиема плевры сочеталась с

пневмотораксом (42,8%). У 12 детей (21,4 %) сформировались бронхо-плевральные свищи. Все больные поступали из стационаров Московской области, где они получали лечение по поводу пневмонии. При развитии эмпиемы плевры проводили дренирование плевральной полости с подключением пассивной аспирации. У 48 больных (86%) дренирование выполнено в стационаре по месту жительства, у остальных – при поступлении в отделении детской хирургии МОНИКИ. Для ферментной терапии использовали трипсин в дозировке 10 мг, который растворяли в 10-20 мл 0,9% раствора натрия хлорида и вводили в дренаж 1 раз в день. Всем пациентам назначали антибактериальную терапию. В начальном периоде болезни, до получения результатов посевов плеврального выпота и крови, назначали антибиотики из группы цефалоспоринов 3 поколения и аминогликозиды. После получения данных по чувствительности микрофлоры проводили коррекцию антибиотикотерапии. Для контроля эффективности проводимого лечения всем детям проводили обзорную рентгенографию грудной клетки (1 раз в 7 дней) и УЗИ плевральной полости (1 раз в 3-4 дня) в динамике. У 6 пациентов для выявления осумкованных гнойных полостей выполняли компьютерную томографию грудной клетки. У 5 пациентов с развитием фибротракса и формированием отграниченных гнойных полостей в связи неэффективностью дренирования на протяжении 10-15 дней выполняли торакоскопию с разделением спаек, удалением фибрина и санацией плевральной полости.

Результаты и обсуждение

Средняя продолжительность торакоскопической санации составила 45 мин. Интраоперационных осложнений не было. У всех больных после операции отмечали положительную динамику, уменьшение признаков дыхательной недостаточности, явлений интоксикации. В то же время у 3 пациентов сразу после операции отмечали формирование бронхо-плевральных свищей, что потребовало продленного сохранения дренажа до полного прекращения продуваний (от 12 до 16 суток). Дренаж удаляли при отсутствии отделяемого и продуваний, в среднем на $12 \pm 2,9$ суток болезни. При этом средняя продолжительность стационарного лечения детей только с традиционным дренированием и с применением торакоскопической санацией достоверно не отличалась - в среднем $19 \pm 3,4$ и $21 \pm 3,7$ дней ($p > 0,05$). Также не отмечено достоверных различий по срокам нормализации температуры тела ($11 \pm 2,8$ и $10 \pm 2,2$ суток соответственно, $p > 0,05$), длительности стояния дренажа ($12 \pm 3,1$ и $13 \pm 3,4$ суток соответственно, $p > 0,05$). Кроме того, следует учитывать большую инвазивность торакоскопической методики санации плевральной полости и необходимость ее выполнения под наркозом, в отличие от обычного дренирования плевральной полости, которое проводится под местной анестезией.

Традиционный метод лечения эмпиемы плевры путем дренирования плевральной полости у детей остается эффективным методом лечения данной патологии в сочетании с адекватной антибактериальной терапией. Правильно и своевременно поставленный дренаж с подключением системы аспирации и введением в плевральную полость ферментных препаратов в большинстве случаев дает выраженный положительный эффект в течение нескольких дней. При отрицательной динамике, отсутствии расправления легкого после дренирования, формировании осумкованных гнойных полостей на 10-12 сутки болезни рационально применение торакоскопической санации плевральной полости с удалением фибрина и разрушением шварт с последующим дренированием плевральной полости. В более поздние сроки на стадии формирования плотного фибрина торакоскопическая санация может сопровождаться кровотечением. В этот период она становится технически намного сложнее и чревата развитием осложнений. В соответствии с результатами наших исследований, в таких случаях более оправдано применение дренирования плевральной полости с введением в дренаж ферментных препаратов до прекращения гнойного отделяемого. При необходимости (неполное расправление легкого, появление осумкованных полостей с жидкостью и воздухом) возможна установка дополнительных дренажей под контролем УЗИ с целью максимальной санации плевральной полости и расправления легкого.

Применение дифференцированного подхода к лечению эмпиемы плевры у детей в течение последних 5 лет позволило нам сократить сроки госпитализации с $27 \pm 3,9$ до $19 \pm 3,5$ дней ($p < 0,05$) и снизить летальность с 4,6% до 0%. У всех детей в данном исследовании наступило выздоровление без хронизации процесса. При выписке на контрольных рентгенограммах у 39 детей (69%) сохранялся невыраженный фибриноторакс, который не требовал дополнительных лечебных мероприятий и самостоятельно рассасывался в течение 2-3 недель, что подтверждено при контрольном обследовании в поликлинике.

Выводы

1. Адекватное и своевременное дренирование плевральной полости под местной анестезией с введением в дренаж ферментных препаратов является эффективным методом лечения эмпиемы плевры у детей.
2. Торакоскопическая санация плевральной полости с удалением фибрина должна применяться по строгим показаниям на 10-12 сутки болезни при отрицательной динамике, отсутствии расправления легкого после дренирования, формировании осумкованных гнойных полостей.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Krenke K. Clinical characteristics of 323 children with parapneumonic pleural effusion and pleural empyema due to community acquired pneumonia / Krenke K., Urbankowska E., Urbankowski T. and others // J Infect Chemother. 2016 May;22(5):292-7.
2. Byington C.L. An epidemiological investigation of a sustained high rate of pediatric parapneumonic empyema: Risk factors and microbiological associations / Byington C.L., Spencer L.Y., Johnson T.A., et al // Clin Infect Dis 2002;34:434-40.
3. Tan T.Q. Clinical characteristics of children with complicated pneumonia caused by Streptococcus pneumoniae / Tan T.Q., Mason Jr. E.O., Wald E.R., et al. // Pediatrics 2002;110(1 Pt 1):1-6.
4. Islam S. APSA Outcomes and Clinical Trials Committee, 2011-2012. The diagnosis and management of empyema in children: a comprehensive review from the APSA Outcomes and Clinical Trials Committee / Islam S., Calkins C.M., Goldin A.B. // J Pediatr Surg. 2012 Nov;47(11):2101-10.

5. Carter E. Management of children with empyema: pleural drainage is not always necessary / Carter E., Waldhausen J., Zhang W., et al. // *Pediatr Pulmonol* 2010;45:475-80.
6. Moral L. Complicated pleural infection: Analysis of 2 consecutive cohorts managed with a different policy. / Moral L., Loeda C., Gómez F. and others // *An Pediatr (Barc)*. - 2016 Jan;84(1):46-53.
7. Слепцов А.А. Торакоскопическая санация плевральной полости при гнойно-воспалительных заболеваниях легких у детей / Слепцов А.А., Саввина В.А., Эрдынеев Т.Э. и др. // *Российский вестник детской хирургии, анестезиологии и реаниматологии*. – 2015. – Том V. №1. – С.74-77.
8. Хаспеков Д.В. Современные методы диагностики и лечения деструктивной пневмонии у детей / Хаспеков Д.В., Ольхова Е.Б., Топилин О.Г. и др. // *Российский вестник детской хирургии, анестезиологии и реаниматологии*. – 2015. Том V, №2. С. 7-12.
9. Di Napoli G. VATS: first step in the parapneumonic empyema / Di Napoli G, Ronzini M, Paradies G. // *G Chir*. 2014 May-Jun;35(5-6):146-8.
10. Разумовский А.Ю. Современные подходы в лечении детей с эмпиемой плевры / Разумовский А.Ю., Шарипов А.М., Митупов З.Б. и др. // *Эндоскопическая хирургия*. – 2011. Том 17. - №4. – С. 14-18.
11. Redden M.D. Surgical versus non-surgical management for pleural empyema / Redden M.D., Chin T.Y., Van Driel M.L. // *Cochrane Database Syst Rev*. 2017. Mar 17;3:CD010651.
12. Стальмахович В.Н. Видеоторакоскопия - эффективный метод лечения пиофибриноторакса при бактериальной деструкции легких у детей / Стальмахович В.Н., Кайгородова И.Н., Дюков А.А. и др. // *Российский вестник детской хирургии, анестезиологии и реаниматологии*. – 2015. Том V, №1. С. 57-60.
13. Sonnappa S. Comparison of urokinase and video-assisted thoracoscopic surgery for treatment of childhood empyema / Sonnappa S., Cohen G., Owens C.M. and others // *Am J Respir Crit Care Med*. - 2006 Jul 15;174(2):221-7.
14. Marhuenda C. Urokinase versus VATS for treatment of empyema: a randomized multicenter clinical trial / Marhuenda C., Barceló C., Fuentes I. and others // *Pediatrics*. - 2014 Nov;134(5):1301-7.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Krenke K. Clinical characteristics of 323 children with parapneumonic pleural effusion and pleural empyema due to community acquired pneumonia / Krenke K., Urbankowska E., Urbankowski T. and others // *J Infect Chemother*. 2016 May;22(5):292-7.
2. Byington C.L. An epidemiological investigation of a sustained high rate of pediatric parapneumonic empyema: Risk factors and microbiological associations / Byington C.L., Spencer L.Y., Johnson T.A., et al // *Clin Infect Dis* 2002;34:434-40.
3. Tan T.Q. Clinical characteristics of children with complicated pneumonia caused by *Streptococcus pneumoniae* / Tan T.Q., Mason Jr. E.O., Wald E.R., et al. // *Pediatrics* 2002;110(1 Pt 1):1-6.
4. Islam S. APSA Outcomes and Clinical Trials Committee, 2011-2012. The diagnosis and management of empyema in children: a comprehensive review from the APSA Outcomes and Clinical Trials Committee / Islam S., Calkins C.M., Goldin A.B. // *J Pediatr Surg*. 2012 Nov;47(11):2101-10.
5. Carter E. Management of children with empyema: pleural drainage is not always necessary / Carter E., Waldhausen J., Zhang W., et al. // *Pediatr Pulmonol* 2010;45:475-80.
6. Moral L. Complicated pleural infection: Analysis of 2 consecutive cohorts managed with a different policy. / Moral L., Loeda C., Gómez F. and others // *An Pediatr (Barc)*. - 2016 Jan;84(1):46-53.
7. Sleptsov A.A. Torakoskopicheskaya sanatsiya plevral'noy polosti pri gnoyno-vospalitel'nykh zabolovaniyakh legkikh u detey [Thoracoscopic Sanation of Pleural Cavity for Purulent-Inflammatory Diseases of Lungs in Children] / Sleptsov A.A., Savvina V.A., Erdyneev T.E. and others // *Rossiyskiy vestnik detskoy khirurgii, anesteziologii i reanimatologii* [Russian bulletin of pediatric surgery, anesthesiology and resuscitation]. – Vol. V. No. 1. – P.74-77. [in Russian]
8. Khaspekov D.V. Sovremennyye metody diagnostiki i lecheniya destruktivnoy pnevmonii u detey [Modern Methods of Diagnosis and Treatment of Destructive Pneumonia in Children] / Khaspekov D.V., Olkhova E.B., Topilin O.G. and others // *Rossiyskiy vestnik detskoy khirurgii, anesteziologii i reanimatologii* [Russian Bulletin of Pediatric Surgery, Anesthesiology and Resuscitation]. – 2015. Volume V, No.2. P. 7-12. [in Russian]
9. Di Napoli G. VATS: first step in the parapneumonic empyema / Di Napoli G, Ronzini M, Paradies G. // *G Chir*. 2014 May-Jun;35(5-6):146-8.
10. Razumovsky A.Yu. Sovremennyye podkhody v lechenii detey s empiemoy plevry. Endoskopicheskaya khirurgiya [Modern Approaches in Treatment of Children with Pleural Empyema. Endoscopic surgery] / Razumovsky A.Yu., Sharipov A.M., Mitupov Z.B. and others – 2011. Volume 17. – No.4. – P. 14-18. [in Russian]
11. Redden M.D. Surgical versus non-surgical management for pleural empyema / Redden M.D., Chin T.Y., Van Driel M.L. // *Cochrane Database Syst Rev*. 2017. Mar 17;3:CD010651.
12. Stalmakhovich V.N. Videotorakoskopiya - effektivnyy metod lecheniya piofibrinotoraksa pri bakterial'noy destruktzii legkikh u detey [Videothoracoscopy as Effective Method for Treatment of Piofibrinotorax in Bacterial Destruction of Lungs in Children] / Stalmakhovich V.N., Kaigorodova I.N., Dyukov A.A. and others // *Rossiyskiy vestnik detskoy khirurgii, anesteziologii i reanimatologii* [Russian bulletin of pediatric surgery, anesthesiology and resuscitation]. – 2015. Volume V, No.1. P. 57-60. [in Russian]
13. Sonnappa S. Comparison of urokinase and video-assisted thoracoscopic surgery for treatment of childhood empyema / Sonnappa S., Cohen G., Owens C.M. and others // *Am J Respir Crit Care Med*. - 2006 Jul 15;174(2):221-7.
14. Marhuenda C. Urokinase versus VATS for treatment of empyema: a randomized multicenter clinical trial / Marhuenda C., Barceló C., Fuentes I. and others // *Pediatrics*. - 2014 Nov;134(5):1301-7.

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.75.9.024>**КОРРЕКЦИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОЙ ГЕМОФИЛЬТРАЦИЕЙ ПЕРЕКИСНОГО ОКИСЛЕНИЯ ЛИПИДОВ ПРИ АБДОМИНАЛЬНОМ СЕПСИСЕ**

Научная статья

Фомин А.М.*

ORCID: 0000-0001-6010-9583,

Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского», Москва, Россия

* Корреспондирующий автор (amf05[at]mail.ru)

Аннотация

Продолжительная гемофильтрация была использована в комбинированной терапии 27 больных абдоминальным сепсисом, у которых развивалась полиорганная недостаточность или септический шок. Были исследованы показатели оксидативного стресса. Установлены усиление перекисного окисления липидов и падение содержания α -токоферола. Продолжительная гемофильтрация улучшала показатели антиоксидантной защиты. Рассчитанный коэффициент окислительного стресса «К» в сыворотке и эритроцитах, в норме приближающийся к единице, исходно увеличен в 2,8 и 2,59 раза, соответственно. В плазме и в эритроцитах после проведения продолжительной гемофильтрации этот показатель существенно улучшился, но оставался повышенным 1,28 и 1,72 раза.

Ключевые слова: абдоминальный сепсис, гемофильтрация, окислительный стресс, α -токоферол.

CORRECTION OF PROLONGED HEMOFILTRATION OF LIPID PEROXIDATION IN ABDOMINAL SEPSIS

Research article

Fomin A.M.*

ORCID: 0000-0001-6010-9583,

M.F. Vladimirsky Moscow Regional Research and Clinical Institute, Moscow, Russia

* Corresponding author (amf05[at]mail.ru)

Abstract

Continuous hemofiltration was used in combination therapy of 27 patients with abdominal sepsis, with developing multichannel insufficiency or septic shock. Indicators of oxidative stress were studied. The enhancement of lipid peroxidation and the decrease in the content of α -tocopherol are established. Continuous hemofiltration improved the performance of antioxidant protection. The calculated coefficient of oxidative "K" stress in the serum and erythrocytes, normally approaching unity, was initially increased by 2.8 and 2.59 times, respectively. This index improved significantly after prolonged hemofiltration but remained elevated 1.28 and 1.72 times in plasma and erythrocytes.

Keywords: abdominal sepsis, hemofiltration, oxidative stress, α -tocopherol.

Усиление свободнорадикальных реакций, проявляющиеся окислительным стрессом с перекисным окислением жиров и ослаблением антиоксидантной защиты, наблюдается при различных патологических состояниях человека. При тяжелых гипоксических поражениях клеток и тканей наблюдается избыточная активация перекисного окисления липидов [4,6,9]. Избыточное усиление ПОЛ было выявлено у пациентов с гнойными заболеваниями абдоминальной области [1,5]. Известно, существуют естественные системы антиоксидантной направленности, которые постепенно истощаются. Данных о влиянии продолжительной (постоянной) гемофильтрации (ГФ) на показатели оксидативного стресса и компоненты антиоксидантной системы у больных абдоминальным сепсисом в изученной литературе нам не встретилось.

Материал и методы

Продолжительная гемофильтрация использована в интенсивной терапии 27 больных, поступивших в реанимационное отделение института из стационаров подмосковного региона в связи с развитием гнойно-септических осложнений и абдоминального сепсиса. Мужчин было 18, женщин - 9. Большинство пациентов было до 50 лет, что составило 66,7%. Перечень заболеваний, осложненных абдоминальным сепсисом, отражен в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень заболеваний с абдоминальным сепсисом

Заболевание	Число больных	
	Абс.	%
Острый аппендицит	11	40,7
Акушерско-гинекологическая патология	4	14,8
Повреждения органов брюшной полости	3	11,1
Язвенная болезнь желудка и двенадцатиперстной кишки	4	14,8
Осложнения плановых операций	3	11,1
Спаечная тонкокишечная непроходимость	1	3,7
Панкреатит	1	3,7
Итого	27	100

Острый аппендицит чаще всего сопровождается абдоминальным сепсисом. Далее по частоте развития абдоминального сепсиса и синдрома полиорганной дисфункции занимают острая акушерско-гинекологическая патология и язвенная болезнь желудка и двенадцатиперстной кишки.

При обследовании у пациентов выявлены клиничко-лабораторные признаки полиорганной дисфункции. Церебральная недостаточность и острое почечное повреждение наблюдались у всех пациентов, причем у (25,9%) пациентов развилась олигоанурия. Печеночная недостаточность была у 11 (40,7 %) пациентов, дыхательная недостаточность (РДСВ) - у 5 (18,5%) больных. Острая сердечная недостаточность зарегистрирована у 6 (22,2%) пациентов абдоминальным сепсисом. Сочетанное поражение органов и систем существенным образом усиливало тяжесть состояния пациентов. У пациентов диагностирован сепсис на основании критериев «Сепсис-3» [10], септический шок развился у 6 (22,2%) пациентов.

Всем больным была выполнена релапаротомия, тщательной лаваж брюшной полости и назоинтестинальной интубации. В последующем применяли программную санацию брюшной полости, этиотропную антибиотикотерапию, иммунотерапию, энтеральное зондовое питание.

В раннем послеоперационном периоде применяли продолжительную гемофильтрацию (ГФ). ГФ проводили на аппарате «Окто Нова» «Asahi Kasei Medical» (Япония), используя гемофильтры «Rexeed-21A» той же фирмы. Всего проведено 67 гемофильтраций, средняя продолжительность ГФ 23 часа $15 \pm 49,8$ мин, средний объем ГФ – $67,2 \pm 5,3$ литра из расчета 35 мл/кг веса/сутки. Во всех случаях ГФ использовали вено-венозный сосудистый доступ, наиболее часто применяли трехпросветный катетер, который устанавливали в центральную вену (яремную или бедренную). При необходимости, особенно при РДСВ осуществляли дегидратацию в пределах 3 л. При всех ГФ использовали замещающий раствор вводили после гемофильтра. Для замещения применяли полиэлектrolитный двухкомпонентный бикарбонатный диализный раствор «Аккусол 4+» фирмы «Nikkiso» в мешках по 5 литров.

Исследование показателей оксидативного стресса проводили у 22 пациентов перед началом гемофильтрации и при ее завершении.

Кровь забирали в пробирки с ЭДТА, центрифугировали, отделяли плазму от эритроцитарной массы. Эритроцитарную массу дважды промывали физиологическим раствором.

Уровень гидроперекисей липидов (ГП) исследовали в эритроцитах и в плазме по методике В. В. Гавриловой, М. И. Мишкорудной [3]. Там же исследовали уровень малонового диальдегида спектрофлуорометрическим методом по способу K. Yagi, уровень α -токоферол (ТФ) исследовали спектрофлуорометрическим методом по способу G.Storer [10].

Общие липиды определяли унифицированными методами. Кроме того, оценку окислительного стресса проводили с помощью расчета коэффициента окислительного стресса К по модифицированной формуле [7]:

$$K = \left(\frac{ГП_i}{ГП_n} \times \frac{МДА_i}{МДА_n} \right) : \left(\frac{ТФ_i}{ТФ_n} \right),$$

Показатель с индексом «i» равен показателям полученным у пациентов, а цифры с индексом «n» - нормальным значениям. Полученные при исследовании данные обработаны с использованием вариационной статистики.

Результаты исследования и их обсуждение

При анализе результатов исследования, приведенных в таблице № 2, у пациентов абдоминальным сепсисом выявлено развертывание окислительного стресса в крови — проявляющиеся нарастанием эритроцитарных и сывороточных показателей гидроперекисей липидов.

Если пересчитать значения гидроперекисей липидов на 1 г липидов сывотки, физиологическая норма этого показателя составит 0,26, то у пациентов как до ГФ, так и после ГФ этот показатель будет значительно повышен и составляет 0,46 и 0,44 соответственно. При расчете уровня гидроперекисей липидов на 1 мг эритроцитов, физиологическая норма составит 1,63. У больных пациентов абдоминальным сепсисом как до ГФ, так и после ГФ этот показатель значительно повышен и составляет 2,35 и 2,19 соответственно. После ГФ наблюдается тенденция к улучшению этого показателя. Таким образом, если рассматривать состояние эритроцитарной мембраны как отражение функционального состояния клеточных мембран в других органах, то данному показателю наблюдается активация оксидативного стресса.

При рассмотрении второго вторичного продукта окислительного стресса, нарастание малонового диальдегида (МДА) видно нет его накопления и в плазме и в эритроцитах. Уменьшение значений эритроцитарного МДА после ГФ сопровождается снижением коэффициента МДА/холестерин, физиологическая норма которого составляет 1,63, этот показатель снижается при ГФ с 1,71 до 1,38.

Исходное значимое накопление МДА у пациентов абдоминальным сепсисом связано с большим потреблением одного из значимых антиоксидантов α -токоферола, при этом снижены эритроцитарные и плазменные уровни. Гемофильтрация сопровождается повышением плазменного уровня α -токоферола, и это связано с перераспределением α -токоферола в организме.

Известно, что об уровне резервов в организме витамина Е можно предполагать по оценке количества α -токоферола в эритроцитах и по коэффициенту соотношения α -токоферол/общие липиды (индекс Хорвитта), полученные результаты позволяют заключить, что ГФ способствует улучшению тканевых запасов организма витамином Е и тем самым нормализации обмена в мембранах клетки.

Несомненно представляет интерес оценить вклад α -токоферола в поддержание гомеостаза окислительного стресса у пациентов с сепсисом при органной дисфункции и вклад ГФ на эти взаимоотношения. В связи с этим нами для плазмы и эритроцитов рассчитаны степени потребности и обеспеченности, где за 100% взята величина физиологической нормы.

Таблица 2 – Динамика показателей окислительного стресса при продолжительной гемофильтрации (M±m)

Показатель	Физиологическая норма	Больные	
		Перед гемофильтрацией	По окончании гемофильтрации
Липиды общие, г/л	5,98±0,18	5,17±0,32*	5,18±0,33*
Общий холестеринерин, ммоль/л	4,9±0,09	2,53±0,12*	3,12±0,09**
Эритроцитарный холестерин, мг/мл	0,99±0,033	0,98±0,06	0,96±0,043
Сывороточные гидроперекиси, единиц оптической плотности.	1,56±0,11	2,40±0,18	2,27±0,15
Эритроцитарные гидроперекиси, единиц оптической плотности	1,61±0,11	2,30±0,25*	2,14±0,16
Сывороточный МДА (нм/л)	3,28±0,09	4,17±0,23	3,70±0,16
Эритроцитарный МДА, нм/л	1,62±0,16	1,68±0,16	1,32±0,1*
Сывороточный α-ТФ, мкм/л	21,3±0,6	14,9±1,2*	19,7±1,1**
Эритроцитарный α-ТФ, мкм/л	4,15±0,17	2,37±0,20*	2,6±0,29*
α-ТФ / ОбЛип	3,54	2,86*	3,8
Плазменная степень потребности в α-ТФ	100%	130%	165%
Эритроцитарная степень потребности в α-ТФ	100%	249%	210%
Плазменная степень обеспеченности α-ТФ	100%	55%	82%
Эритроцитарная степень обеспеченности α-ТФ	100%	25%	31%
Плазменная степень недостаточности α-ТФ	0	45%	18%
Эритроцитарная степень недостаточности α-ТФ	0	75%	69%
Коэффициент окислительного стресса для сыворотки	≈ 1	2,80	1,28
Коэффициент окислительного стресса для эритроцитов	≈ 1	2,59	1,72

Примечание. α-ТФ- α-токоферол, ОбЛип – общие липиды, символ «*» — (p<0,05) достоверность различий между физиологической нормой и больными; ** — между значениями до и после гемофильтрации.

Степень потребности в α-токофероле оказалась повышенной для сывороточного и плазменного α-токоферола. По окончании ГФ данный показатель более значимо снизился в плазме и незначительно — в эритроцитах.

Степень обеспеченности α-ТФ оказалась более низкой в эритроцитах. По окончании гемофильтрации она заметно повысилась в плазме и очень незначительно увеличилась в эритроцитах. Отсюда степень недостаточности в α-ТФ до ГФ была почти вдвое выше в эритроцитах и почти не изменилась в них после гемофильтрации, тогда как заметно поднялась после ГФ в плазме. Последнее свидетельствует о перераспределении α-токоферола после ГФ, но не обеспечивает потребность организма в нем. Эти результаты дают основание для рекомендации о введении α-токоферола пациентам абдоминальным сепсисом как до ГФ, так и после нес.

О глубоком нарушении метаболизма холестерина свидетельствуют данные о резком снижении уровня общего холестерина в сыворотке. Вероятно, понижение уровня холестерина в плазме объясняет стабильное содержание холестерина в эритроцитах.

Рассчитанный коэффициент окислительного стресса К в сыворотке и эритроцитах, в норме приближающийся к единице, исходно увеличен в 2,8 и 2,59 раза, соответственно. После проведения продолжительной гемофильтрации этот показатель существенно улучшился, но оставался повышенным для сыворотки 1,28 и для эритроцитов 1,72 раза. Коррекция окислительного стресса более быстро происходит в сыворотке, чем в эритроцитах.

По нашему мнению, улучшение показателей окислительного стресса у пациентов с абдоминальным сепсисом после гемофильтрации необходимо связать с тем, что при гемофильтрации наблюдается снижение метаболитов перекисного окисления. Редукция метаболитов перекисного окисления временно протезирует антиоксидантную систему пациента. Видно, что после ГФ маркеры окислительного стресса и антиоксидантной резистентности не соответствуют физиологическим параметрам, что диктует патогенетическую необходимость назначения препаратов повышающих антиоксидантную защиту.

Ранее в исследованиях было показано, что в процессе ГФ наблюдается улучшение показателей общей и системной гемодинамики, в том числе улучшение кровоснабжения печени [2]. Мы считаем, улучшением метаболических процессов в печени объясняется факт увеличения содержания общего холестерина у пациентов с абдоминальным сепсисом после гемофильтрации.

Выводы

1. У пациентов абдоминальным сепсисом наблюдаются активация перекисного окисления липидов и значимое уменьшение содержания в организме α-токоферола. Использование продолжительной гемофильтрации в интенсивной терапии больных абдоминальным сепсисом позволяет усилить антиоксидантную толерантность, но не устранить ее дефицит.

2. Динамика взаимоотношений между показателями общего холестерина, показателями перекисного окисления липидов и α-токоферола демонстрирует патогенетическую целесообразность проведения гемофильтрации у больных абдоминальным сепсисом и раскрывает один из механизмов ее эффективности.

3. Полученные результаты патогенетически обосновывают применение в интенсивной терапии пациентов абдоминальным сепсисом препаратов с антиоксидантной направленностью.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Список литературы / References

1. Абакумов М.М. Раннее применение плазмафереза в комплексной терапии медиастенита / М.М.Абакумов, И.В.Александрова, С.И.Рей и др. // Хирургия. - 2008. - №2. - С.4-9.
2. Ватазин А.В. Послеоперационный перитонит. Хирургические концепции и методы экстракорпоральной гемокоррекции / А.В.Ватазин, А.М.Фомин, Е.Е.Круглов, А.Б. Зулькарнаев // М:Бином.- 2014. - 416с.
3. Гаврилов В.Б. Спектрофотометрическое определение содержания гидроперекисей липидов в плазме крови / В.Б.Гаврилов, М.И.Мишкорудная //Лабораторное дело. - 1983.- №3. - С.33-36.
4. Матвеев С.Б Влияние гипохлорида натрия на эндогенную интоксикацию при алкогольном абстинентном синдроме / С.Б.Матвеев, Е.А.Лужников, Е.В.Клычникова, Л.Ф.Панченко и др. // Наркология. - 2014. Т.13. -№4(148).- С.43-46.
5. Матвеев С.Б Интегральная оценка эндогенной интоксикации у больных гнойным медиастенитом / С.Б.Матвеев, И.В.Александрова, С.И.Рей и др. // Клиническая лабораторная диагностика. - 2008.- №8.- С.12-13.
6. Панченко Л.Ф Состояние окислительного стресса у больных с хронической недостаточностью кровообращения при токсической энцефалопатии / Л.Ф.Панченко, А.П.Баранов, Б.В.Давыдов, А.В. Струтынский // Патогенез. - 2015. - Т.13.- №3. - С.23-25.
7. Панченко Л.Ф., Давыдов Б.В., Теребилина Н.Н., Баронец В.Ю., Журавлева А.С. Окислительный стресс при алкогольной болезни печени/ Л.Ф.Панченко, Б.В.Давыдов, Н.Н.Теребилина и др. // Биомедицинская химия. - 2018. - Т.59. - Вып.4. - С.452-458.
8. Панченко Л.Ф. Содержание маркеров эндотелиальной дисфункции и медиаторов воспаления у больных алкоголизмом с хронической сердечной недостаточностью на конечных стадиях развития / Л.Ф.Панченко, С.В.Пирожков, В.Ю.Баронец и др. // Наркология. - 2018. - Т.17. - №2. - С.20-28.
9. True S.M. The Third International Consensus Definitions for Sepsis and Septic Shock (Sepsis-3)/ S.M.True, C.S.Deutschman, C.Seymour // JAMA. - 2016. - V.315. - №8. - P.801-810.
10. A simple fluorometric assay for type B monoamine oxidase activity in rat tissues / R.Yagi , O.Suzuki , E.Noguchi // Journal of biochemistry. -1976. -V.79. - №6. - P.1297.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Abakumov M.M. Raneye primeneniye plazmaferaza v kompleksnoy terapii mediastenita [Early the use of plasmapheresis in complex mediastinitis therapy] / M.M.Abakumov, I.V.Aleksandrova, S.I.Rey and others // Khirurgiya [Surgery]. - 2008. - №2. - S.4-9. [in Russian]
2. Vatazin A.V. Posleoperatsionnyy peritonit. Khirurgicheskiye kontseptsii i metody ekstrakorporal'noy gemokorreksii [Postoperative peritonitis. Surgical concepts and methods of extracorporal hemocorrection] / A.V.Vatazin, A.M.Fomin, Ye.Ye.Kruglov, A.B. Zul'karnayev // M:Binom.- 2014. - 416s. [in Russian]
3. Gavrilov V.B. Spektrofotometricheskoye opredeleniye soderzhaniya gidroperekisey lipidov v plazme krovi [Spectrophotometric determination of the content of lipid hydroperoxides in blood plasma] / V.B.Gavrilov, M.I.Mishkorudnaya //Laboratornoye delo [Laboratory work]. - 1983. - №3. - S.33-36. [in Russian]
4. Matveyev S.B Vliyaniye gipokhlorida natriya na endogennuyu intoksikatsiyu pri alkogol'nom abstinentsnom syndrome / S.B.Matveyev, Ye.A.Luzhnikov, Ye.V.Klychnikova, L.F.Panchenko and others [Influence of sodium hypochlorite on endogenous intoxication in alcohol withdrawal syndrome] // Narkologiya [Narcology]. - 2014. - Т.13. -№4 (148). - S.43-46. [in Russian]
5. Matveyev S.B. Integral'naya otsenka endogennoy intoksikatsii u bol'nykh gnoynym medistenitom [Integral assessment of endogenous intoxication in patients with purulent mediastinitis] / S.B.Matveyev, I.V.Aleksandrova, S.I.Rey and others// Klinicheskaya laboratornaya diagnostika [Clinical laboratory diagnostics]. - 2008. - №8.- S.12-13. [in Russian]
6. Panchenko L.F. Sostoyaniye okislitel'nogo stressa u bol'nykh s khronicheskoy nedostatochnost'yu krovoobrashcheniya pri toksicheskoy entsefalopatii [The state of oxidative stress in patients with chronic circulatory insufficiency with toxic encephalopathy] / L.F.Panchenko, A.P.Baranov, B.V.Davydov, A.V. Strutyynskiy // Patogenez [Pathogenesis]. - 2015. - Т.13. - №3. - S.23-25. [in Russian]
7. Panchenko L.F. Zhuravleva A.S. Okislitel'nyy stress pri alkogol'noy bolezni pecheni [Oxidative stress in alcoholic liver disease]/ L.F.Panchenko, B.V.Davydov, N.N.Terebilina and others // Biomeditsinskaya khimiya [Biomedical Chemistry]. - 2018. - Т.59. - Vyp.4. - S.452-458. [in Russian]
8. Panchenko L.F. Soderzhaniye markerov endotelial'noy disfunktsii i mediatorov vospaleniya u bol'nykh alkogolizmom s khronicheskoy serdechnoy nedostatochnost'yu na konechnykh stadiyakh razvitiya [The content of markers of endothelial dysfunction and inflammatory mediators in patients with alcoholism and chronic heart failure at the final stages of development] / L.F.Panchenko, S.V.Pirozhkov, V.YU.Baronets and others // Narkologiya [Narcology]. - 2018. - Т.17. - №2. - S.20-28. [in Russian]
9. True S.M. The Third International Consensus Definitions for Sepsis and Septic Shock (Sepsis-3)/ S.M.True, C.S.Deutschman, C.Seymour // JAMA. - 2016. - V.315. - №8. - P.801-810.
10. A simple fluorometric assay for type B monoamine oxidase activity in rat tissues / R.Yagi , O.Suzuki , E.Noguchi // Journal of biochemistry. -1976. -V.79. - №6. - P.1297.