

Министерство образования и науки
Российской Федерации

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал
Северо-Кавказского федерального
университета

ISSN 2308–4758



Выпуск № 3, 2015 г.

Выходит 4 раза в год

	«Наука. Инновации. Технологии» Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета
Учредитель	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северо-Кавказский федеральный университет»
Главный редактор	д-р геогр. наук, профессор В. С. Белозеров
Редакционный совет журнала	А. А. Левитская, председатель, ректор СКФУ, канд. филол. наук, доцент; И.А. Евдокимов, заместитель председателя, проректор по научной работе СКФУ, д-р техн. наук, профессор; В.С. Белозеров, главный редактор, д-р геогр. наук, профессор; М.Ч. Залиханов, д-р геогр. наук, профессор, академик РАН (Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик); А.Г. Храмцов, д-р техн. наук, профессор, академик РАН; Ю.Ю. Балега, д-р физ.-мат. наук, член-корр. РАН (САО РАН, п. Нижний Архыз); С.В. Рязанцев, д-р экон. наук, член-корр. РАН (ИСПИ РАН, г. Москва); И.М. Агибова, д-р пед. наук, профессор; Т.П. Бондарь, д-р мед. наук, профессор; А.А. Лиховид, д-р геогр. наук, профессор; В.С. Тикунов, д-р геогр. наук, профессор (МГУ им. Ломоносова, г. Москва).
Редакционная коллегия	М.Т. Абшаев, д-р физ.-мат. наук, профессор (Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик); И.В. Бегдай, канд. техн. наук, доцент; В.С. Белозеров, д-р геогр. наук, профессор (главный редактор); Т. П. Бондарь, д-р мед. наук, профессор; В.Б. Бородулин, д-р мед. наук, профессор (Саратовский ГМУ Росздрава, г. Саратов); О.А. Бутова, д-р мед. наук, профессор; Т.И. Герасименко, д-р геогр. наук, профессор (Оренбургский гос. университет, г. Оренбург); В.А. Гридин, д-р геол.-минерал. наук, профессор; Л.И. Губарева, д-р биол. наук, профессор; Т.И. Джандарова, д-р биол. наук, доцент; Ю.И. Диканский, д-р физ.-мат. наук, профессор; Л.А. Диневич, д-р физ.-мат. наук, профессор (Тель-Авивский университет, г. Тель-Авив); К.В. Ерин, д-р физ.-мат. наук, профессор; А.И. Жакин, д-р физ.-мат. наук, профессор (Юго-Западный гос. университет, г. Курск); А.Р. Закинян, канд. физ.-мат. наук, доцент; А.О. Иванов, д-р физ.-мат. наук, профессор (Уральский федеральный университет им. Б. Ельцина); А.А. Коляда, д-р физ.-мат. наук, доцент (Белорусский гос. университет, г. Минск); А.А. Лиховид, д-р геогр. наук, профессор; А.Д. Лодыгин, д-р техн. наук, доцент; А.В. Лысенко, д-р геогр. наук, доцент; И.Н. Молодикова, канд. геогр. наук (Центрально-Европейский университет, г. Будапешт); В.И. Наац, д-р физ.-мат. наук, профессор; Т.Г. Нефедова, д-р геогр. наук, вед. науч. сотрудник РАН (ИГ РАН, г. Москва); П.М. Полян, д-р геогр. наук, вед. науч. сотрудник РАН (ИГ РАН, г. Москва); В.В. Разумов, д-р геогр. наук, профессор; Л.Д. Тимченко, д-р ветеринар. наук, профессор; Л.Д. Цатурян, д-р мед. наук, профессор (Ставропольский гос. мед. университет, г. Ставрополь); Н.И. Червяков, д-р техн. наук, профессор; В.А. Шальнев, д-р геогр. наук, профессор; Н.А. Щитова, д-р геогр. наук, профессор; А.С. Молахосеини, канд. наук, доцент (Исламский университет Азад, Керман, Иран).
Свидетельство о регистрации	ПИ № ФС77–52723 от 8.02.2013.
Подписной индекс	Объединенный каталог. ПРЕССА РОССИИ. Газеты и журналы: 94011 Журнал включен в БД «Российский индекс научного цитирования». Журнал «Вестник Ставропольского государственного университета» перерегистрирован в журнал «Наука. Инновации. Технологии» в связи с переименованием учредителя.
Адрес Телефон Сайт E-mail	355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1 (8652) 33-07-32 www.ncfu.ru vsbelozerov@yandex.ru
ISSN	2308–4758
©	ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет», 2015

	«Science. Innovations. Technologies» North Caucasus Federal University
Founder	Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education «North Caucasus Federal University»
Editor in chief	V. S. Belozеров, Doctor of Geographical Sciences, professor
Editorial Council	A.A. Levitskaya, chairman, Rector SKFU, PhD. Philology Sciences, Associate Professor; I.A. Evdokimov, Vice Chairman, Dr. Technical Sciences, Professor; V.S. Belozеров, Chief Editor, Doctor of Geographical Sciences, professor; M.Ch. Zalikhanov, Dr. of Geographical Sciences, professor, academician of the Russian Academy of Sciences (Mountain Geophysical Institute, Nalchik); A.G. Hramtsov, Dr. Technical Sciences, Professor, academician of the Russian Academy of Sciences; Y.Y. Balega, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (SAO RAS, p. Lower Arhiz); S.V. Ryazantsev, Dr. of Economic Sciences, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (ISPR RAS, Moscow); I.M. Agibova, Dr. Pedagogical Sciences, Professor; T.P. Bondar', Dr. Medical Sciences, Professor; A.A. Likhovid, Dr. Doctor of Geographical Sciences, professor; V.S. Tikunov, Doctor of Geographical Sciences, professor (Lomonosov Moscow State University, Moscow).
Editorial Board	M.T. Abshaev, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor (Mountain Geophysical Institute, Nalchik); I.V. Begday, Ph.D., Associate Professor; V.S. Belozеров, Dr. of Geographical Sciences, professor, editor in chief; T. P. Bondar', MD, professor; Borodulin V.B., MD, Professor (Saratov State Medical University, Saratov); O. A. Butova, MD, professor; Gerasimenko T.I., Dr. of Geographical Sciences, Professor (Orenburg State University, Orenburg); Gridin V.A., Dr. of geological-mineralogical Sciences, Professor; Gubareva L.I., Sc.D., Professor; Dzhandarova T.I., Sc.D., Associate Professor; Y. I. Dikanskiy, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor; Dinevich L.A., Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Tel-Aviv University, Tel-Aviv); K. V. Erin, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor; Zhakin A.I., Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Southwest State University, Kursk); A. R. Zakinyan, candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor; Ivanov A.O., Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Yeltsin's Ural Federal University); Kolyada A.A., Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor (Belarusian State University, Minsk); A. A. Likhovid, Dr. of Geographical Sciences, professor; A. D. Lodygin, Dr. of Technical Sciences, associate professor; A. V. Lysenko, Dr. of Geographical Science, associate professor; Molodikova I.N., Ph.D. (Central European University, Budapest); Naats V.I., Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor; Nefedova T.G., Dr. of Geographical Sciences, Leading Researcher, Russian Academy of Sciences (IG RAS, Moscow); Polyan P.M., Dr. of Geographical Sciences, Leading Researcher, Russian Academy of Sciences (IG RAS, Moscow); Razumov V.V., Dr. of Geographical Sciences, Professor; Timchenko L.D., Dr. of Veterinary Sciences, Professor; Tsaturyan L.D., MD, Professor (Stavropol State Med. University, Stavropol); N.I. Chervyakov, Dr. of Technical Sciences, professor; V.A. Shalnev, Dr. of Geographical Sciences, Professor; N.A. Shitova, Dr. of Geographical Sciences, Professor; A.S. Molahosseini, assistant professor, PH.D (Islamic Azad University, Kerman).
Certificate	ПИ № ФС77–52723 dated February 8th 2013.
The Index	The Journal is included in the DB «Russian index of the scientist quoting». The journal «Bulletin of the Stavropol state University» renamed in the journal «Science. Innovations. Technologies» due to renaming of the founder.
Address Phone Site E-mail	355009, Stavropol, Pushkin street, 1 8 (8652) 33-07-32 www.ncfu.ru vsbelozеров@yandex.ru
ISSN	2308–4758
©	FGAOU VPO «North Caucasus Federal University», 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Лавриненко А.В. Метод преобразования кода системы остаточных классов в позиционный с коррекцией ошибок на основе искусственных нейронных сетей	7
Ляхов П.А., Валуева М.В. Применение сглаживающих фильтров для очистки от шума изображений в оттенках серого	37
Наац И.Э., Наац В.И., Рыскаленко Р.А. Расчетно-аналитические модели для уравнений параболического типа с приближенными данными на основе методов прикладного гармонического анализа и вариационного метода взвешенной невязки	51
Попов И.П. Построение абстрактной модели силового поля типа электромагнитного. Часть 2	63

НАУКИ О ЗЕМЛЕ**Верисокин А.Е., Зиновьева Л.М.**

Особенности технологии промывки и освоения горизонтальных скважин после селективного гидроразрыва пласта на месторождениях Западной Сибири 79

Зольникова Ю.Ф.

Научные и общественные организации региона Кавказских Минеральных Вод на рубеже XIX–XX вв. И их вклад в развитие курортов 91

Каторгин И.Ю., Шкарлет К.Ю., Седых Р.Ю.

Геоинформационный анализ экологической стабильности бассейна реки Ташла 97

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ**Иванов В.М.**

Особенности постэмбрионального биогенеза у белых крыс линии Вистар при воздействии на них оксидами азота 109

Кришторп В.В., Грибкова Е.С., Кормилицына Н.К.

Кластерный анализ показателей сердечно-сосудистой системы как способ выявления адаптационных стратегий к экзаменационному стрессу бакалавров ИВГУ. 121

Мельченко Е.А. Применение атомно-силовой микроскопии при

исследовании биофизических свойств мембран эритроцитов 131

**Перхурова В.Д., Цатурян Л.Д.,
Елисеева Е.В.**

Функциональные возможности сердечно-со-
судистой системы у студентов с различным
уровнем нейротизма при выполнении физи-
ческой нагрузки 137

**Селимов М.А., Демченков Е.Л., Нагдалян А.А.,
Гатина Ю.С.**

Особенности исследования морфологии ано-
мальных форм эритроцитов методами атом-
но-силовой микроскопии 145

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ 159

**ТРЕБОВАНИЯ
К ОФОРМЛЕНИЮ И СДАЧЕ РУКОПИСЕЙ
В РЕДАКЦИЮ 171**

ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ», №3, 2015

УДК 681.3

Лавриненко А. В. [Lavrinenko A. V.]

МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КОДА СИСТЕМЫ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ В ПОЗИЦИОННЫЙ С КОРРЕКЦИЕЙ ОШИБОК НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Method of conversion from residue number system to positional with error correctness based on artificial neural networks

Как предложенный метод представления чисел, обеспечивающий лучшие надежные характеристики, система остаточных классов широко применяется для синтеза отказоустойчивых модульных нейрокомпьютеров. Однако высокая эффективность вычисления немодульных операций, являющихся ключевыми компонентами системы остаточных классов, все еще не достигнута из-за необходимости использования дорогостоящих и сложных операторов, которые требуют большого количества вычислительных ресурсов и много времени на выполнение. В данной работе рассмотрены весьма эффективные обратные конвертируемые преобразователи кода системы остаточных классов на основе искусственных нейронных сетей с расширением кодового слова по контрольным основаниям избыточной системы остаточных классов, обеспечивающие определение, местонахождение и коррекцию ошибок в модулярных конструкциях, что позволило заменить дорогостоящие операции, такие как операции вычисления проекций при использовании обобщенной позиционной системы счисления

Ключевые слова: система остаточных классов, китайская теорема об остатках, обобщенная позиционная система счисления, отказоустойчивость, искусственные нейронные сети, синдром ошибки.

Residue number system (RNS) is widely used for failure-tolerant modular neurocomputers development as a method of number representation that allows better reliability. However, high performance of non-modular operations that are key components of RNS has not been achieved yet because of the necessity to use complex operators that are time- and resource-consuming. This work researches effective reverse converters of RNS based on artificial neural networks with code expansion with bases of redundant RNS that allows detection and error correctness in modular systems what allows to substitute resource-consuming operations such as calculating projections for mixed radix conversion.

Key words: residue number system, Chinese remainder theorem, mixed radix conversion, failure-tolerance, artificial neural networks, error correctness.

Проблема высокой надежности не только передачи и обработки информации, но и ее преобразования из одного формата в другой особенно актуальна в современных системах, работающих в реальном времени, где ошибки работы оборудования должны быть обнаружены

и исправлены немедленно. В связи с этим наиболее перспективным путем решения рассматриваемой проблемы является придание вычислительным устройствам свойства устойчивости к отказам и сбоям в процессе функционирования [1, 2]. Принято считать вычислительную систему отказоустойчивой (fault-tolerant system), если при возникновении отказа она сохраняет свои функциональные возможности в полном (fail-save) или уменьшенном (fail-soft) объеме. При этом отказоустойчивость обеспечивается сочетанием избыточности системы и наличием механизма обнаружения ошибок, а также процедур для автоматического восстановления ее правильного функционирования. Fail-save устойчивость к отказам характеризует способность вычислительной системы обеспечивать корректную работу, несмотря на возникновение отказа или сбоя, но с понижением качества, то есть при нахождении в состоянии постепенного снижения эффективности [3, 4].

Избыточная модулярная арифметика, или избыточная система остаточных классов (RRNS), обладает уникальными свойствами относительно обнаружения и коррекции ошибок [5–8]. Во-первых, в ней отсутствует значимость порядка цифр в записи числа, а во-вторых, и коды, и проверяемые числа представляются в виде остатков, что позволяет считать такие коды полностью арифметическими. На основании этих свойств можно сделать вывод о том, что применение модулярной арифметики позволяет эффективно решать проблему построения отказоустойчивых систем и служит мощным инструментом для автоматического обнаружения и коррекции ошибок.

RRNS привлекает многих исследователей в качестве основы для проектирования отказоустойчивых вычислительных структур, и интерес к ней в последнее десятилетие резко возрастает, что подтверждается большим числом публикаций, посвященных практическому применению RRNS в цифровых системах связи, глобальных системах связи [7], в беспроводных сетях, в отказоустойчивых структурах гибридной памяти [9–10] и других.

Свойство корректирующих кодов в СОК применяется при обнаружении и коррекции ошибок на основе метода проекций [1–3]. Проекцией числа A по основанию p_i называется число A_i , полученное из A вычерки-

ванием соответствующего остатка α_i . По своей сути алгоритм определения ошибочной цифры и соответствующего ей модуля на основе проекций довольно прост. Необходимо вычислить проекции числа $\bar{A}'$ по каждому из модулей системы, а затем сравнить их с величиной P . Если какая-либо из проекций $\bar{A}'_i$ окажется меньше значения P , т. е. будет правильным числом, то ошибка произошла в соответствующем модуле p_i . Иными словами, если полученное в результате вычислений число $\bar{A}'$ является правильным, то все его проекции должны быть неправильными числами. Таким образом, метод проекций позволяет установить в цифре, по какому из модулей системы произошла ошибка, т. е. обеспечивает ее локализацию. Однако и сам алгоритм определения ошибочной цифры, и последующая ее коррекция на основе метода проекций представляются малоэффективными и затратными с точки зрения практической реализации. А именно, вычисление каждой из проекций требует выполнения операции восстановления числа из модулярного представления в двоичное и последующих вычислений над числами большой разрядности, что вносит значительный вклад как в аппаратные затраты, так и в задержку работы устройства. Кроме того, такой метод подразумевает исправление лишь ошибочного остатка, а не всего числа, приводя к необходимости восстанавливать число с уже правильными значениями всех остатков. В связи с этим возникает необходимость искать другие методы реализации механизма обнаружения и коррекции ошибок в СОК.

Одной из альтернатив методу проекций для обнаружения и коррекции ошибок в СОК является синдромное декодирование с вычислением так называемых синдромов ошибки по контрольным основаниям системы. В основе этого метода чаще всего лежит так называемая операция расширения системы оснований. Это немодульная операция, позволяющая по известным остаткам числа, соответствующим некоторым модулям СОК, определить значения остатков этого же числа для других оснований. Обычно для реализации операции расширения системы оснований используют ОПСС, переход к которой носит итеративный характер и может привести к ухудшению быстродействия всего устройства.

Методы и алгоритмы коррекции ошибок в избыточной системе остаточных классов.

Развитие высокопроизводительных и надежных вычислительных систем, обладающих свойством отказоустойчивости, базируется на идеях создания вычислительных средств с параллельной структурой, использующих параллельное представление и обработку данных. К их числу относятся непозиционные коды – коды, основанные на модулярной арифметике, то есть коды, в которых данные представляются в системе остаточных классов (СОК) [1–2].

Если фиксированный ряд положительных чисел $p_1, p_2, \dots, p_n$, назвать основаниями (модулями) СОК, то под системой остаточных классов понимается такая непозиционная система счисления, в которой любое целое положительное число A представляется в виде набора остатков (вычетов) от деления представляемого числа на выбранные основания системы

$$A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \quad (1)$$

где α_i – наименьшие неотрицательные вычеты (остатки) числа по модулям $p_1, p_2, \dots, p_n$. Цифры α_i данного представления по выбранным модулям образуются следующим образом

$$\alpha_i = res + A \pmod{p_i} = A - [A/p_i] p_i, (\forall i \in [1, n]), \quad (2)$$

где $[A/p_i]$ – целочисленное частное, p_i – основания (модули) – взаимно-простые числа.

В теории чисел доказано, что если $\forall i \neq j (p_i, p_j) = 1$, то в соответствии с Китайской теоремой об остатках, представление (1) является единственным, при условии

$$0 \leq A \leq P$$

где $P = p_1 p_2 \dots p_n = \prod_{i=1}^n p_i$ – диапазон представления чисел, то есть существует число A , для которого

$$\begin{aligned}
 A &\equiv \alpha_1 \pmod{p_1}; \\
 A &\equiv \alpha_2 \pmod{p_2}; \\
 &\dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\
 A &\equiv \alpha_n \pmod{p_n}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Основным преимуществом такого представления является тот факт, что выполнение операций сложения, вычитания и умножения реализуется очень просто, по формуле

$$\begin{aligned}
 A * B &= (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) * (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) = \\
 &= ((\alpha_1 * \beta_1) \bmod p_1, (\alpha_2 * \beta_2) \bmod p_2, \dots, (\alpha_n * \beta_n) \bmod p_n),
 \end{aligned} \tag{4}$$

где $*$ обозначает одну из операций: сложение, умножение или вычитание.

Эти операции носят название модульных, так как для их выполнения в СОК достаточно одного такта обработки численных значений, причем эта обработка происходит параллельно, и величина числа в каждом разряде не зависит от других разрядов.

Если в представление (1) добавить разряд a_{n+1} , тогда получено

$$A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n+1}) \tag{5}$$

которое соответствует некоторому числу из диапазона $[0, R)$, где $R = P p_{n+1}$. При передаче информации или выполнении каких-либо операций будем пользоваться теми же представлениями (1), которым соответствуют числа, заключенные в некоторую часть данного диапазона $[0, R)$; это дает возможность корректировать ошибки.

Если представление (5) удовлетворяет условию:

$$0 \leq A < \frac{R}{p_{n+1}} = P_{n+1} \tag{6}$$

то число A однозначно определяется n -разрядным представлением $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n+1})$. Поэтому разряд с основанием p_{n+1} можно считать избыточным. Оценим корректирующие возможности кодов СОК с одним и двумя избыточными разрядами по основаниям p_{n+1} и p_{n+2} .

Введем понятие ошибки. Под одиночной ошибкой будем понимать искажение какой-либо одной цифры представления (5), причем искажение ограничивается лишь величиной основания. Под k -кратной ошибкой будем понимать искажение k цифр представления (5).

Пусть $A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, \alpha_{n+1})$ – переданное сообщение. Для принятого сообщения введем обозначение $\bar{A} = (\bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2, \dots, \bar{\alpha}_n, \bar{\alpha}_{n+1})$. Сообщение назовем безошибочным, если $0 \leq \bar{A} < P_{n+1}$. Если же $\bar{A} \geq P_{n+1}$, то соответствующее представление назовем ошибочным.

Если передано сообщение (5), то принятым может оказаться, вообще говоря, любое из R сообщений. При этом P_{n+1} из них будут приняты как безошибочные и $R - P_{n+1}$ – как ошибочные, тогда число $R - P_{n+1}$ показывает суммарное количество обнаруживаемых возможных ошибок. Отношение

$$\frac{R - p_{n+1}}{R} = \frac{p_{n+1} - 1}{p_{n+1}}$$

может служить мерой обнаруживающих способностей кода СОК. При упорядоченной СОК, когда основания расположены по возрастанию их величины, т.е. $p_1 < p_2 < \dots < p_{n+1}$, тогда числа $P_1, P_2, \dots, P_{n+1}$ будут удовлетворять неравенствам $P_1 > P_2 > \dots > P_{n+1}$. В [1–4] показано, что наличие одного избыточного основания p_{n+1} является достаточным для обнаружения всех одиночных ошибок, т.е. если $\bar{\alpha}_i = \alpha_i$ при $i \neq k$ и $\bar{\alpha}_k \neq \alpha_k$ ($i = 1, 2, \dots, n + 1$), то имеет место неравенство $\bar{A} \geq P_{n+1}$, которое обнаруживает ошибку. Необходимо отметить, что введение одного контрольного основания позволяет обнаруживать не только любую одиночную ошибку (в цифре по одному основанию) но и 95% двойных (в цифрах по двум основаниям) [1–2].

Процесс обнаружения ошибочности полученного представления может быть проведен в процессоре, работающем в СОК. Для этого достаточно перевести полученное представление в обобщенную позиционную систему счисления (ОПСС) с теми же основаниями, что и в данной СОК.

Если окажется, что старшая цифра ОПСС $a_{n+1} = 0$, то представление безошибочное, если же $a_{n+1} \neq 0$, то полученное представление ошибочно. Если известен разряд СОК, в котором имеется ошибка, то ее легко исправить с помощью алгоритмов, изложенных в [1–3].

Таким образом, искажение цифры по одному какому-либо основанию переводит это число в неправильное, и тем самым нелегитимный диапазон позволяет обнаруживать наличие ошибки. Введение только одного контрольного основания не позволяет в общем случае локализовать ошибочный разряд. Для корректной локализации ошибочного разряда и гарантированного исправления всех одиночных ошибок необходимо введение двух контрольных разрядов p_{n+1}, p_{n+2} . Наличие любых избыточных разрядов является достаточным так же для обнаружения любой двоичной ошибки [1–2].

Пусть $A = (a_1, a_2, \dots, a_n, a_{n+1}, a_{n+2})$ – переданное сообщение или результат вычислений в СОК, а $\bar{A} = (\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_n, \bar{a}_{n+1}, \bar{a}_{n+2})$ – принятое сообщение либо полученный результат вычислений в СОК, тогда одиночная ошибка может быть всегда исправлена, если числовые значения A передаваемых сообщений или точные результаты вычислений в СОК удовлетворяют неравенствам $0 \leq A < p_1, p_2, \dots, p_n$, т. е. A входит в допустимую область. Рассмотрим всевозможные $(n+2)$ разрядные представления A_i , составленные из принятого сообщения вычеркиванием одной цифры (их будет $n+2$). Если в принятом сообщении нет ошибок, то для всех значений $i = 1, 2, \dots, n+2$ будет $\bar{A}_i = A_i < p_1, p_2, \dots, p_n$. Если же в принятом сообщении содержится одиночная ошибка, то, за исключением одного, все $(n+1)$ -разрядные представления $\bar{A}_i$ будут содержать одну ошибочную цифру, следовательно для $(n+1)$ -го значения i будет выполнено неравенство $\bar{A}_i > p_1, p_2, \dots, p_n$, т. е. $\bar{A}_i$ входит в недопустимую область, и лишь для одного значения i , например, для $i = k$ будет $\bar{A}_k < p_1, p_2, \dots, p_n$. Последнее соответствует случаю, когда вычеркнута ошибочная цифра, но тогда, поскольку $A < p_1, p_2, \dots, p_n$, получим $\bar{A}_n = A_n = A$.

Теперь уже можно найти истинное значение цифры a_k , для этого достаточно найти остаток от деления A_k на P_k . Далее вычисляем значения $(n+1)$ -разрядных представлений $\bar{A}_n = \bar{A} - rP_i$, где $[\bar{A}/p_i]$, т. е. для выполнения значений A достаточно из числа $\bar{A}$ вычитать число P_i до тех пор пока не получится число, лежащее в диапазоне $[0, P_i)$ [1–2].

При наличии двойной ошибки, по крайней мере, одно из $(n + 1)$ -разрядных представлений будет содержать одиночную ошибку и, следовательно, соответствующее ему числовое значение $\bar{A}_i$ выйдет из заданного диапазона $[0; p_1 \cdot p_2 \cdots p_n]$.

Таким образом, кодирование информации в СОК является устойчивым по отношению к возможным случайным искажениям и отказам, что позволяет при необходимости осуществлять коррекцию данных.

Описанное выше свойство корректирующих кодов применяется при обнаружении и коррекции ошибок на основе метода проекций [1–4]. Проекцией числа A по основанию p_i , называется число A_i , полученное из A вычеркиванием соответствующего остатка a_i . По своей сути алгоритм определения ошибочной цифры и соответствующего ей модуля на основе проекций довольно прост. Необходимо вычислить проекции числа $\bar{A}'$ по каждому из модулей системы, а затем сравнить их с величиной P . Если какая-либо из проекций $\bar{A}'_i$ окажется меньше значения P , т. е. будет правильным числом, то ошибка произошла в соответствующем модуле p_i . Иными словами, если полученное в результате вычислений число $\bar{A}'$ является правильным, то все его проекции должны быть неправильными числами. Таким образом, метод проекций позволяет установить в цифре, по какому из модулей системы произошла ошибка, т. е. обеспечивает ее локализацию. Однако, как и сам алгоритм определения ошибочной цифры, так и последующая ее коррекция на основе метода проекций представляются малоэффективными и затратными с точки зрения практической реализации. А именно, вычисление каждой из проекций требует выполнения операции восстановления числа из модулярного представления в двоичное и последующих вычислений над числами большой разрядности, что вносит значительный вклад как в аппаратные затраты, так и в задержку работы устройства. Кроме того, такой метод подразумевает исправление лишь ошибочного остатка, а не всего числа, приводя к необходимости восстанавливать число с уже правильными значениями всех остатков. В связи с этим возникает необходимость искать другие методы реализации механизма обнаружения и коррекции ошибок в СОК.

Одной из альтернатив методу проекций для обнаружения и коррекции ошибок в СОК является синдромное декодирование с вычислением

так называемых синдромов ошибки по контрольным основаниям системы. В основе этого метода чаще всего лежит так называемая операция расширения системы оснований. Это немодульная операция, позволяющая по известным остаткам числа, соответствующим некоторым модулям СОК, определить значения остатков этого же числа для других оснований. Обычно для реализации операции расширения системы оснований используют ОПСС, переход к которой носит итеративный характер и может привести к ухудшению быстродействия всего устройства.

Суть метода синдромного декодирования заключается в следующем. Пусть в результате вычислений в СОК получено некоторое число $A' = (\alpha'_1, \alpha'_2, \dots, \alpha'_n)$. Для определения правильности числа A' необходимо по известным остаткам $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ определить значения его остатков по контрольным основаниям $\alpha'_{n+1}, \alpha'_{n+2}, \dots, \alpha'_{n+r}$. Затем следует сравнить значения $\alpha'_{n+1}, \alpha'_{n+2}, \dots, \alpha'_{n+r}$ с $\alpha_{n+1}, \alpha_{n+2}, \dots, \alpha_{n+r}$ — остатками по тем же модулям, но образованными уже в ходе вычислений над входными данными, аналогичных тем, в результате которых было получено само число A' . Сравнение остатков по контрольным основаниям можно осуществить их вычитанием:

$$\delta_{n+i} = |\alpha'_{n+i} - \alpha_{n+i}|_{n+i}$$

где $i = 1, \dots, r$.

Числа δ_{n+i} называются синдромами ошибки, т.е. позволяют определить правильность результата вычислений в СОК. В предположении, что в полученном числе A' оказались искаженными не больше чем l остатков, для кода, имеющего минимальное расстояние $d_{\min} = 2l + 1$, можно сформулировать следующие свойства синдромов ошибки:

- 1) если все значения синдромов равны нулю:
 $\delta_{n+i} = \alpha_{n+2} = \dots = \alpha_{n+r}$, то ошибки не возникло и вектор A' является кодовым словом;
- 2) если j значений синдромов ($1 \geq j \geq l$) не равны нулю, то ошибки произошли в соответствующих остатках по кон-

трольным модулям, при этом вектор A' не является кодовым словом;

- 3) если более чем l значений синдромов не равны нулю, то произошла по меньшей мере одиночная ошибка в векторе A' .

Для иллюстрации данного механизма обнаружения и исправления ошибок с применением корректирующих кодов в модулярной арифметике рассмотрим случай построения отказоустойчивой системы с исправлением одиночных ошибок. При этом код должен иметь минимальное расстояние $d_{\min} = 3$, которое достигается введением в СОК двух контрольных модулей p_{n+1} и p_{n+2} . Обычно значения синдромов ошибки δ_{n+1} и δ_{n+2} используют как для обнаружения, так и для коррекции обнаруженных ошибок. Это становится возможным благодаря тому, что каждой паре значений $\{\delta_{n+1}, \delta_{n+2}\}$ соответствует единственное значение вектора ошибки, а значит, и корректирующего слова для ее исправления. Таким образом, коррекция ошибки при использовании данного метода осуществляется сложением числа, содержащего ошибку, и корректирующего слова, вычисленного по значениям синдромов δ_{n+1} и δ_{n+2} . Стоит также отметить, что при коррекции в данном случае складываются обычные двоичные числа, а поэтому нет необходимости в каких-либо дополнительных преобразованиях.

Так как модулярная арифметика является параллельной структурой, желательно иметь и параллельную вычислительную базу. В качестве параллельной базы выбраны искусственные нейронные сети (ИНС) на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) *Xilinx* [11].

Поэтому возникает необходимость разработки эффективных методов нейросетевой модулярной реализации основных вычислительных блоков отказоустойчивых систем, позволяющих избежать снижения быстродействия при их проектировании, с одной стороны, и минимизировать аппаратную избыточность – с другой.

Актуальность данных исследований состоит в том, что реализация синдромного кодирования на основе совместного применения СОК

и ИНС позволяет по-новому взглянуть на существующие и новые принципы построения как отдельных отказоустойчивых вычислительных узлов, так и систем в целом, в том числе и систем повышенной надежности и производительности.

Метод и алгоритм построения нейронной сети для преобразования кода системы остаточных классов в позиционный код с коррекцией ошибок.

Преобразование остаточного кода в позиционный код основано на использовании ОПСС.

Принцип обнаружения, локализации и исправления ошибки основан на функциональном объединении всех трех операций в одну операцию. Данный метод основан на определении цифр по избыточным основаниям на основании цифр по рабочим основаниям и сравнении их с изначально известными цифрами по избыточным основаниям

Вычисление α_{n+1} и α_{n+2} проведем на основе метода расширения системы оснований, который базируется на использовании китайской теоремы об остатках и обобщенной позиционной системе счисления. Пусть задана система оснований $p_1, p_2, \dots, p_n$ с диапазоном $P = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n$, ортогональными базисами $\bar{B}_1, \bar{B}_2, \dots, \bar{B}_n$, веса которых $m_1, m_2, \dots, m_n$ и определяются из сравнения $\frac{m_i B_i}{p_i} \equiv 1 \pmod{p_i}, i = \overline{1, n}$. Расширим систему оснований, добавляя основание p_{n+1} , тогда диапазон системы станет $P_{n+1} = p_{n+1} \cdot P$, ортогональные базисы системы $\bar{B}_1, \bar{B}_2, \dots, \bar{B}_{n+1}$, их веса $\bar{m}_1, \bar{m}_2, \dots, \bar{m}_{n+1}$, причем $\bar{B}_i = \bar{m}_i \frac{P_{n+1}}{p_i}, i = \overline{1, n+1}$. Задача состоит в определении цифры α_{n+1} числа A по основанию p_{n+1} .

Тогда число A в системе оснований $p_1, p_2, \dots, p_{n+1}$ будет иметь вид

$$A = \sum_{i=1}^{n+1} a_i \bar{B}_i \pmod{P_{n+1}}, \quad (7)$$

где $P_{n+1} = \prod_{i=1}^{n+1} p_i$ – диапазон расширенной системы оснований;
 $\bar{B}_i$ – ортогональные базисы расширенной системы оснований.

Представим ортогональные базисы $\bar{B}_i$ в обобщенной позиционной системе счисления, тогда

$$\bar{B}_i = \bar{b}_{i1} + \bar{b}_{i2}p_1 + \bar{b}_{i3}p_1p_2 + \dots + \bar{b}_{in}p_1p_2\dots p_n \quad (8)$$

где $\bar{b}_{ij}$ – коэффициенты ОПСС; $i, j = 1, 2, \dots, n$.

На основании (8) запишем выражение (7) в виде

$$A = (a_1(\bar{b}_{11}, \bar{b}_{12}, \dots, \bar{b}_{1n}) + a_2(\bar{b}_{21}, \bar{b}_{22}, \dots, \bar{b}_{2n}) + \dots + a_n(\bar{b}_{n1}, \bar{b}_{n2}, \dots, \bar{b}_{nn})) \bmod P_{n+1}. \quad (9)$$

Из выражения (9) можно определить коэффициенты α_i числа A , тогда

$$\alpha_i = \sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^n a_i \bar{b}_{ij} \bmod p_i \quad (10)$$

где α_i – вычеты числа A по $\bmod p_i$;
 $\bar{b}_{ij}$ – ортогональные базисы, представленные в ОПСС.

Так как результат образования цифры в СОК по новому основанию p_{n+1} зависит только от информационных разрядов, то операцию расширения вычетов можно проводить сразу по нескольким дополнительно введенным основаниям.

Пример 1. Пусть задана система оснований (модулей) СОК $p_1 = 2$, $p_2 = 3$, $p_3 = 5$. Расширим систему оснований, добавляя $p_4 = 7$, $p_5 = 11$. Тогда на основании (8) определим $\bar{b}_{ij}$

$$\begin{array}{cccccc} \bar{b}_{11} = 1 & \bar{b}_{12} = 1 & \bar{b}_{13} = 2 & \bar{b}_{14} = 3 & \bar{b}_{15} = 5 & \\ \bar{b}_{21} = 0 & \bar{b}_{22} = 2 & \bar{b}_{23} = 1 & \bar{b}_{24} = 2 & \bar{b}_{25} = 7 & \\ \bar{b}_{31} = 0 & \bar{b}_{32} = 0 & \bar{b}_{33} = 1 & \bar{b}_{34} = 4 & \bar{b}_{35} = 2 & \\ \bar{b}_{41} = 0 & \bar{b}_{42} = 0 & \bar{b}_{43} = 0 & \bar{b}_{44} = 4 & - & \\ \bar{b}_{51} = 0 & \bar{b}_{52} = 0 & \bar{b}_{53} = 0 & - & \bar{b}_{55} = 7 & \end{array} \quad (11)$$

Таблица 1. Процесс вычисления цифр ОПСС

Вычеты числа A по модулю p_i	Модули				
	$p_1 = 2$	$p_2 = 3$	$p_3 = 5$	$p_4 = 7$	$p_5 = 11$
1	1	1	2	3	5
2	0	4	2	4	14
3	0	0	2	8	4
$ A _{p_4 = 7}$	0	0	0	$4 A _7$	–
$ A _{p_5 = 11}$	0	0	0	–	$7 A _{11}$
Коэффициенты ОПСС числа A	$a_1 = 1$	$a_2 = 2$	$a_3 = 2$	$a_4 = 2 + 4 A _7$	$A_5 = 2 + 7 A _{11}$

Пусть задано число $A = 17 = (1, 2, 2, |A|_7, |A|_{11})$, необходимо найти остатки по основаниям $p_4 = 7, p_5 = 11$ (табл. 1).

После сложения цифр по модулю p_i получим

$$A = [1, 2, 2, 2 + 4|A|_7, 2 + 7|A|_{11}],$$

но так как $a_4 = 2 + 4|A|_7$, а $a_5 = 2 + 7|A|_{11}$,
и по условию $a_4 = 0$ и $a_5 = 0$, тогда

$$4|A|_7 = -2 \text{ или } |A|_7 = -\frac{2}{4}_7 = -2\frac{1}{4}_7 = -4,$$

$$7|A|_{11} = -2 \text{ или } |A|_{11} = -\frac{2}{7}_{11} = -2\frac{1}{7}_{11} = -5.$$

Мультипликативные величины $\frac{1}{4}_7 = 2$ и $\frac{1}{7}_{11} = 8$

Так как $|A|_7 = -4$, а $|A|_{11} = -5$ возьмем их дополнения, т. е. $|A|_7 = 7 - 4 = 3$, а $|A|_{11} = 11 - 5 = 6$.

Тогда расширенное представление числа будет равно информационному числу, т. е. $A = (1, 2, 2, 3, 6)$ и это говорит о том, что число A безошибочное.

Преимущества предложенного метода расширения системы вычетов состоит в том, что:

- все вычисления выполняются в параллельных каналах по отдельным модулям, причем каждый модуль отождествляется с отдельным каналом;
- не требуется вычисления большого количества дополнительных величин, необходимо только наличие констант и мультипликативных величин по расширенным основаниям;
- возможно получение расширенного представления вычетов числа сразу по нескольким дополнительным основаниям, что не влияет на быстродействие всей операции расширения.

Применим этот метод для обнаружения, локализации и исправления ошибки.

Коррекция ошибок в СОК основана на представлении числа в расширенной системе. В качестве расширенных оснований возьмем избыточные (контрольные) основания. Допустим, что в процессе обработки и хранения данных в вычислительной системе остатки чисел по избыточным основаниям, с одной стороны, абсолютно верны, а с другой сторо-

ны, они вычисляются на основе остатков по избыточным (информационным) основаниям непосредственно перед контролем данных. Если вычисленные избыточные остатки равны исходным, то ошибки в информационных основаниях не произошло, в противном случае – ошибка по информационным основаниям произошла. На основании этой информации устраняется ошибка и определяется неисправный модуль.

Введем ограничение на абсолютную верность избыточных оснований, которую можно обеспечить известными структурными технологиями (например, использованием обычных корректирующих кодов или мажоритарной схемы).

Пример 2. Исходные данные такие же, как и в примере 1.

Допустим, произошла ошибка по третьему информационному основанию, тогда ошибочное число $\bar{A}$ будет иметь вид $\bar{A} = (1, 2, \underline{3}, 3, 6)$. Ошибочная цифра подчеркнута.

Избыточные разряды по четвертому и пятому основаниям равны соответственно 3 и 6, и они абсолютно верны.

На основании информационных остатков определим синдромы ошибок δ_i .

Алгоритм коррекции ошибок базируется на методе обнаружения, исправления и локализации ошибок в СОК.

Контролируемое число $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n, \alpha_{n+1}, \alpha_{n+2}$ делится на две части: информационную, в которую входят остатки по информационным основаниям $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$, и контрольную часть, в которую входят остатки по избыточным (контрольным) основаниям $\alpha_{n+1}, \alpha_{n+2}$.

Далее по остаткам информационных каналов определяем остатки по избыточным основаниям. Воспользуемся таблицей 1, тогда третья строка будет иметь вид не $[0, 0, 2, 8, 4]$, а $[0, 0, 3, 12, 6]$.

При выполнении операции, согласно таблице 1, получим

$$4|A|_7 + 6 = 0, 7|A|_{11} + 4 = 0.$$

Отсюда

$$\alpha_{n+1} = |A|_7 = \left| -\frac{6}{4} \right|_7 = \left| -\frac{3}{2} \right|_7 = -3 \left| \frac{1}{2} \right|_7 = |-12|_7 = -5.$$

$$\alpha_{n+2} = |A|_{11} = \left| -\frac{4}{7} \right|_{11} = -4 \left| \frac{1}{7} \right|_{11} = |-32|_{11} = -10.$$

Используя найденные остатки, определяем синдром ошибки:

$$\delta_1 \equiv \alpha_{n+1} - \alpha'_{n+1} \pmod{p_{n+1}} = |3 - (-5)|_7 = 2, \quad (12)$$

$$\delta_2 \equiv \alpha_{n+2} - \alpha''_{n+1} \pmod{p_{n+2}} = |6 - (-10)|_{11} = 5. \quad (13)$$

По величинам δ_1, δ_2 формируются константы ошибок таким образом, что при их сложении с информационными разрядами контролируемого числа A , имевшая место ошибка в числе устраняется. Заметим, что если контролируемое число не будет содержать ошибки, то величины δ_1, δ_2 равны нулю.

Для локализации ошибки необходимо провести сравнение разрядов исходного числа с исправленным числом, и по тому разряду, где сравнение не выполняется, определить ошибочный разряд.

Определим константы ошибок для данного примера и сведем их в таблицу 2.

В соответствии с (12), (13) $\delta_1 = 2, \delta_2 = 5$ по таблице 2 определяется величина ошибки $(0, 0, 4)$, которая складывается с контролируемым числом

$$\bar{A} = (1, 2, 3) + (0, 0, 4) = (1, 2, 2).$$

По величине ошибки $(0, 0, 4)$ локализуется ошибочный разряд, им будет разряд по $\text{mod } p_3$. Использование синдрома ошибки позволяет все процедуры по обнаружению, локализации и исправлению ошибок объединить в одну процедуру, что позволяет уменьшить время коррекции ошибок и повысить эффективность.

Таблица 2.

Константы ошибок для СОК с основаниями

$p_1 = 2, p_2 = 3, p_3 = 5, p_4 = 7, p_5 = 11.$

Ошибка по основанию p_1	δ_1, δ_2	Ошибка по основанию p_2	δ_1, δ_2	Ошибка по основанию p_3	δ_1, δ_2
0, 0, 0	0, 0	0, 0, 0	0, 0	0, 0, 0	0, 0
1, 0, 0	6, 7 1, 4	0, 1, 0	1, 2 3, 10	0, 0, 1	4, 9
					6, 6
				0, 0, 2	3, 4 5, 1
		0, 2, 0	4, 1 6, 9	0, 0, 3	4, 7
					2, 10
				0, 0, 4	1, 5 3, 2

Нейронная сеть для преобразования кода системы остаточных классов в позиционный с коррекцией ошибок.

На рис. 1 приведена нейронная сеть для обратного конвертированного преобразования и коррекции ошибок в системе остаточных классов. Нейронная сеть состоит из входного слоя нейронов 2, 23, входного слоя 24, предназначенного для хранения остатков числа по рабочим и контрольным основаниям в течение времени обнаружения ошибки, вход которой соединен со входами 1 ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$) и входами 25 ($\alpha_{n+1}, \alpha_{n+2}$) нейронной сети; нейронной сети 8, предназначенной для вычисления остатков чисел по контрольным основаниям, входы которой соединены с выходами нейронов 2, хранящими остатки по рабо-

чим основаниям; нейронных сетей конечного кольца 10, 11, предназначенных для вычисления синдромов ошибки по контрольным основаниям, первые входы которых соединены соответственно с выходами нейронной сети вычисления остатков по контрольным основаниям, а вторые – соответственно с выходами нейронов 23, хранящими остатки по контрольным основаниям, входы которых подключены к шине 25; блок памяти 14, предназначенный для хранения констант, вход которого соединен с выходами нейронных сетей конечного кольца 10, 11; нейронных сетей конечного кольца 21, предназначенных для получения исправленного числа путем суммирования неправильного числа с константой ошибки, первые входы которых соединены, соответственно, с выходами блока памяти, шины 15, которые являются выходными шинами 16, 17 и 18, формирующие номера неисправных модулей и входом элемента ИЛИ 19, выход которого формирует сигнал «есть ошибка» выход 20, а вторые с выходами нейронов 2, а выходные сигналы 22 нейронных сетей конечного кольца 21 являются выходами нейронной сети исправления ошибок.

Работа нейронной сети для обнаружения, локализации и исправления ошибок в системе остаточных классов осуществляется следующим образом.

На входы 1, 25 нейронов 2 и 23 нейронной сети для обнаружения, локализации и исправления ошибки в системе остаточных классов подается контролируемое число $A = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n, \alpha_{n+1}, \alpha_{n+2})$. С выходов нейронов 2 остатки по рабочим основаниям с весовыми коэффициентами w_{ij} 3 поступают на вход нейронной сети 8 вычисления остатков по контрольным модулям. Нейронная сеть 8 состоит из совокупности нейронных сетей конечного кольца 4, 5, 6. Весовые коэффициенты w_{ij} 3 и w_{ij} 7 нейронов нейронных сетей конечного кольца, выполняющие роль распределенной памяти, определяются соответственно $w_{ij} = \bar{b}_{ij}$ и $w_{jk} = 1$. Нейронные сети конечного кольца 4, 5 и 6 реализуют вычислительную модель, представленную в таблице 3.

Выходные сигналы НСКК 5 и 6 последней строки поступают на вход НСКК 27 и 26, с весовыми коэффициентами w_{kl} 29,

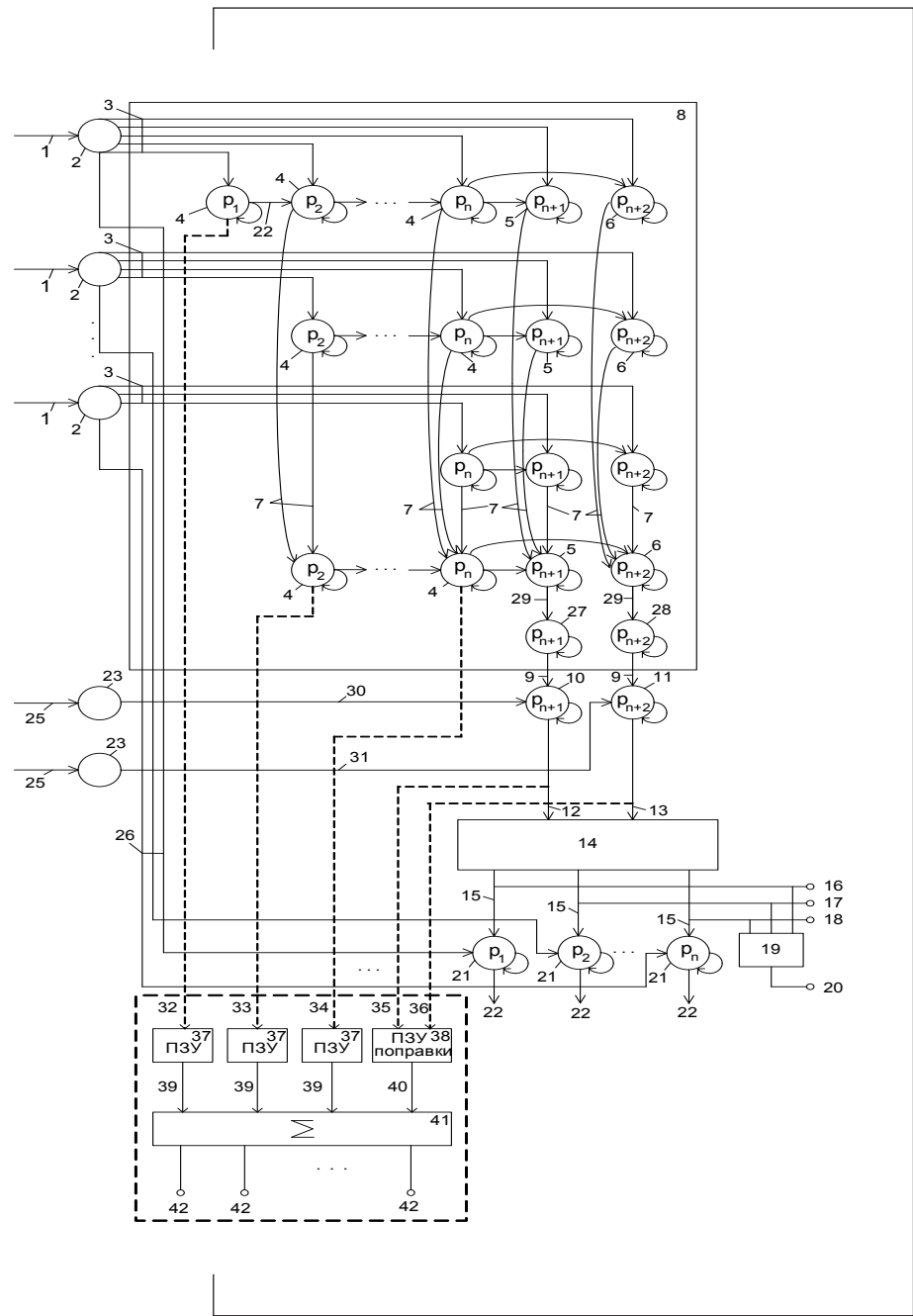


Рис. 1. Нейронная сеть для преобразования кода системы остаточных классов в позиционный с коррекцией ошибок.

$$\text{равные } \left| \frac{1}{\bar{b}_{i(n+l)}} \right|_{p_{n+l}},$$

где l – количество расширяемых модулей и принимает значение 1, 2, ...

Выходные сигналы 9 НСКК 27 и 28 будут отрицательными значениями $-\alpha'_{n+1}$ и $-\alpha'_{n+2}$, которые поступают на входы 9 НСКК 10 и 11, а на вторые входы поступают значения α_{n+1} и α_{n+2} по шинам соответственно 30 и 31. НСКК 10 и 11 реализуют вычислительную модель

$$\delta_1 = \alpha_{n+1} - (-\alpha'_{n+1});$$

$$\delta_2 = \alpha_{n+2} - (-\alpha'_{n+2}).$$

Выходные значения НСКК 10 и 11 по шинам 12 и 13, соответствующим синдромам ошибки, поступают на входы блока памяти 14 и выбирают оттуда соответствующую константу, согласно таблице 3. Эти константы с выхода блока памяти 14 по шинам 15 поступают на соответствующую шину 16, 17 и 18, которые показывают номер неисправного модуля, а также на вход элемента ИЛИ 19, выход 20 которого показывает наличие ошибки. На входы НСКК 21 поступает сигнал с выхода блока памяти, а на вторые входы поступают, соответственно, выходные сигналы рабочих каналов, нейроны 2, выходная шина 26, где суммируются с константами ошибок, подобранными таким образом, что при ее сложении с контролируемым числом A имевшая место ошибка в числе устраняется. На выходе НСКК 21 выходная шина 22 формирует исправленное число, представленное в СОК.

Работа нейронной сети в режиме преобразования остаточного кода в позиционный с коррекцией ошибок осуществляется следующим образом.

На входы 1, 25 нейронной сети для обнаружения, локализации и исправления ошибок в системе остаточных классов подается преобразуемое число, представленное в системе остаточных классов $A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \tilde{\alpha}_i, \dots, \alpha_n, \alpha_{n+1}, \alpha_{n+2})$. На выходе нейронной сети фор-

мируются коэффициенты ОПСС, поступающие по шинам 32–34, соответственно по модулям $p_1 p_2 \dots p_n$, а на выходах 35, 36 – синдромы ошибок, которые соответственно являются адресами ПЗУ 37 для хранения произведений $a_1 p_1 p_2 \dots p_{i-1}$ и ПЗУ 38 для хранения констант поправок, представленных в двоичном коде. На рис. 1 введенные шины 32–34 показаны пунктирными линиями. С выхода ПЗУ выбранные значения по шинам 39, 40 поступают на сумматор 41, на выходе которого формируется исправленное число, представленное в позиционной системе счисления. Таким образом нейронная сеть формирует исправленное число в СОК и в позиционной системе счисления.

Для реализации такого решения в нейронную сеть для обнаружения, локализации и исправления ошибок в системе остаточных классов введены n – постоянных запоминающих устройств 37, где n – число модулей системы остаточных классов, в которых хранятся произведения $a_1 p_1 p_2 \dots p_{i-1}$, определяемые формулой обобщенной позиционной системы счисления, и постоянное запоминающее устройство 38 для хранения констант поправок, определяемых синдромом ошибки, равной разности цифр $\delta_1 = (a_{n+1} - \dot{a}_{n+1})$ и $\delta_2 = (a_{n+2} - \dot{a}_{n+2}) \bmod p_{n+2}$, где a_{n+1} и a_{n+2} – известные значения по избыточным основаниям p_{n+1} и p_{n+2} , $\dot{a}_{n+1}$ и $\dot{a}_{n+2}$ – вычисленные значения по избыточным основаниям, которые могут содержать ошибочные разряды.

Адресом запоминающих устройств 37 и 38 являются коэффициенты обобщенной позиционной системы счисления, которые вычисляются при расширении оснований системы остаточных классов с целью определения остатков по контрольным модулям. В режиме обнаружения, локализации и обнаружения ошибок используются только переносы из младших разрядов в старшие и разряды ОПСС по контрольным модулям для вычисления синдрома ошибок, а в режиме преобразования кода системы остаточных классов в позиционный код будут использованы разряды ОПСС по рабочим и контрольным основаниям.

Итак, исходными данными для получения позиционного исправленного представления числа являются коэффициенты обобщенной позиционной системы счисления $a_1 a_2 \dots a_n$ и синдромы ошибок δ_1 и δ_2 . Рассмотрим *метод коррекции ошибок*.

Пусть имеем набор модулей $p_1, p_2, \dots, p_n, p_{n+1}, p_{n+2}$, в котором $p_1, p_2, \dots, p_n$ – рабочие основания, а p_{n+1}, p_{n+2} – контрольные основания. Рассмотрим число $A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, \alpha_{n+1}, \alpha_{n+2})$, в котором остатки $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – остатки по рабочим основаниям. Пусть по одному из рабочих оснований произошла ошибка. Тогда полученное число $\tilde{A} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \tilde{\alpha}_i, \dots, \alpha_n, \alpha_{n+1}, \alpha_{n+2})$, $i = 1, 2, \dots, n + 2$ будет отличаться от исходного числа одним из остатков $\tilde{\alpha}_i \neq \alpha_i$. Отбросим в числе $\tilde{A}$ все остатки по контрольным основаниям (сужение диапазона):

$$\tilde{A}_n = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \tilde{\alpha}_i, \dots, \alpha_n),$$

а затем произведем расширение диапазона по значениям информационных остатков:

$$\tilde{A}' = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \tilde{\alpha}_i, \dots, \alpha_n, \acute{\alpha}_{n+1}, \acute{\alpha}_{n+2}).$$

Очевидно, что остатки $(\acute{\alpha}_{n+1}, \acute{\alpha}_{n+2})$, определенные по остаткам рабочих оснований в представлении числа $\tilde{A}_n$, в случае наличия ошибки $\tilde{\alpha}_i \neq \alpha_i$ не будут равны остаткам $(\alpha_{n+1}, \alpha_{n+2})$ в представлении числа $\tilde{A}$, что обеспечивается Китайской теоремой об остатках (КТО) и избыточностью СОК. Более того, это гарантирует однозначную определенность при различных величинах и местоположениях ошибок.

Для пояснения, рассмотрим пример 3. Пусть задана система оснований $p_1 = 2, p_2 = 3, p_3 = 5, p_4 = 7, p_5 = 11$, в которой представлено число $A = (1, 2, 2, 3, 6)$. Два последних основания будем считать контрольными.

По основанию $p_1 = 2$ может быть только одна ошибка, в результате которой будет получено число $\tilde{A} = (0, 2, 2, 3, 6)$. Сократив основания до информационных, получим $\tilde{A}_n = (0, 2, 2)$. При расширении диапазона вышеуказанным методом получим $\tilde{A}'_n = (0, 2, 2, 2, 2)$. Аналогичным способом определим остатки по расширенным основаниям по последним контрольным модулям при возникновении ошибок по остальным рабочим основаниям и результаты сведем в таблицу 3. Из полученной таблицы

Таблица 3.

Расширенные основания по контрольным основаниям

Величина ошибки	Исходные (α_4, α_5)	Полученные при расширении диапазона (α_4, α_5)
$\Delta\alpha_1 = 1, \alpha_1 = 0$	(3, 6)	(2, 2)
$\Delta\alpha_2 = 1, \alpha_2 = 0$	(3, 6)	(6, 5)
$\Delta\alpha_2 = 2, \alpha_2 = 1$	(3, 6)	(0, 7)
$\Delta\alpha_3 = 1, \alpha_3 = 3$	(3, 6)	(5, 5)
$\Delta\alpha_3 = 2, \alpha_3 = 4$	(3, 6)	(4, 0)
$\Delta\alpha_3 = 3, \alpha_3 = 0$	(3, 6)	(2, 1)
$\Delta\alpha_3 = 4, \alpha_3 = 1$	(3, 6)	(1, 7)

видно, что, для каждой пары значений остатков по контрольным основаниям (α_4, α_5) и $(\acute{\alpha}_4, \acute{\alpha}_5)$, можно однозначно указать местоположение ошибки. Так как рабочий диапазон представления чисел $P_k = 30$, а число всевозможных ошибок по информационным основаниям $N_{\Delta\alpha} = 7$, то необходимо помнить $P_k N_{\Delta\alpha} = 210$ корректирующих чисел вида $\Delta A = (0,0, ..., \Delta\alpha_i, ..., 0)$ для каждой возможной комбинации ошибок во всем основном диапазоне представления чисел. Аргументами выбора того или иного корректирующего числа ΔA будут являться пары коэффициентов контрольных оснований (α_4, α_5) и $(\acute{\alpha}_4, \acute{\alpha}_5)$.

Таблица 4. Местоположение ошибки

Величина ошибки	Исход- ные (α_4, α_5)	Получен- ные при расши- рении диапа- зона ($\acute{\alpha}_4, \acute{\alpha}_5$)	Величина ошибки	Исход- ные (α_4, α_5)	Получен- ные при расши- рении диапа- зона ($\acute{\alpha}_4, \acute{\alpha}_5$)
$\Delta\alpha_4 = 1, \alpha_4 = 4$	(4, 6)	(3, 6)	$\Delta\alpha_5 = 1, \alpha_4 = 7$	(3, 7)	(3, 6)
$\Delta\alpha_4 = 2, \alpha_4 = 5$	(5, 6)	(3, 6)	$\Delta\alpha_5 = 2, \alpha_4 = 8$	(3, 8)	(3, 6)
$\Delta\alpha_4 = 3, \alpha_4 = 6$	(6, 6)	(3, 6)	$\Delta\alpha_5 = 3, \alpha_4 = 9$	(3, 9)	(3, 6)
$\Delta\alpha_4 = 4, \alpha_4 = 0$	(0, 6)	(3, 6)	$\Delta\alpha_5 = 4, \alpha_4 = 10$	(3, 10)	(3, 6)
$\Delta\alpha_4 = 5, \alpha_4 = 1$	(1, 6)	(3, 6)	$\Delta\alpha_5 = 5, \alpha_4 = 0$	(3, 0)	(3, 6)
$\Delta\alpha_4 = 6, \alpha_4 = 2$	(2, 6)	(3, 6)	$\Delta\alpha_5 = 6, \alpha_4 = 1$	(3, 1)	(3, 6)
			$\Delta\alpha_5 = 7, \alpha_4 = 2$	(3, 2)	(3, 6)
			$\Delta\alpha_5 = 8, \alpha_4 = 3$	(3, 3)	(3, 6)
			$\Delta\alpha_5 = 9, \alpha_4 = 4$	(3, 4)	(3, 6)
			$\Delta\alpha_5 = 10, \alpha_4 = 5$	(3, 5)	(3, 6)

В случае возникновения ошибки по одному из контрольных оснований расширение диапазона автоматически исправит ошибку, т.к. восстановление дополнительных оснований производятся по информационным, которые по условию являются безошибочными. Таким об-

разом, в данном случае пара (α_4, α_5) , $(\dot{\alpha}_4, \dot{\alpha}_5)$ также однозначно определит местоположение ошибки (таблица 4). Число $P_k N_{\Delta\alpha} = 30 \cdot 16 = 480$, т. е. необходимо помнить 480 корректирующих чисел вида $\Delta A = (0, 0, \dots, \Delta\alpha_i, \dots, 0)$ при выбранной системе оснований для коррекции одиночных ошибок по контрольным основаниям.

Рассмотрим численный пример коррекции преобразованного остаточного кода в позиционный двоичный код для набора оснований $p_1 = 2$, $p_2 = 3$, $p_3 = 5$, $p_4 = 7$, $p_5 = 11$, $p_6 = 13$, где $p_1 - p_4$ – информационные (рабочие) основания, а $p_5 - p_6$ – контрольные.

Предположим, что в результате сбоя или отказа вместо правильного числа $A = (1, 1, 2, 5, 0, 5)$ было получено $\tilde{A} = (1, 1, 0, 5, 0, 5)$, т. е. ошибка произошла по основанию p_3 . Тогда при переводе из СОК в ОПСС коэффициенты ОПСС (адреса ПЗУ) будут равны $a_1 = 1$, $a_2 = 0$, $a_3 = 4$, $a_4 = 4$, а остатки СОК по контрольным модулям – $\alpha_1 = 2$ и $\alpha_5 = 2$.

Определим синдром ошибки $\delta_1 = 0 - 2 = 9$, $\delta_2 = 5 - 2 = 3$.

В соответствии с выражением $A = a_1 + a_2 p_1 + a_3 p_1 p_2 + a_4 p_1 p_2 p_3$ на вход выходного сумматора будут поступать значения $a_1 = 1$, $a_2 = 0$, $a_3 p_1 p_2 = 4 \cdot 2 \cdot 3 = 24$ и $a_4 p_1 p_2 p_3 = 4 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5 = 120$.

В результате поступивших значений на выходе сумматора будет число, равное $1 + 24 + 120 = 145$.

Величина поправки, представленная в СОК, определяет величину коррекции в ПСС, т. к. $\delta_1 = 9$, а $\delta_2 = 3$, то по таблице 6 находим $A_n = 42$ (в таблице 5 обведено контуром), тогда на выходном сумматоре по модулю $P = p_1 p_2 p_3 p_4 = 210$. Получим позиционное откорректированное число $A = |145 + 42|_{210} = 187$. Это соответствует правильному представлению в СОК, как $(1, 1, 2, 5, 0, 5)$.

Таким образом, синтезированная нейронная сеть для преобразования кода системы остаточных классов в позиционный с коррекцией ошибок характеризуется минимальными аппаратными затратами. Предложенный подход предполагает использование до 70% аппаратной избыточности для обнаружения и исправления 100% одиночных ошибок и обнаружения всех двукратных ошибок. Аналогичный подход в позиционной системе счисления потребует 200% аппаратной избы-

Таблица 5. Таблица поправок в СОК и в ПСС

Основание	Глубина ошибки	Разность минимального следа и остатка по контрольным основаниям		Поправка в ПСС по модулю 210
		$a_5 - \dot{a}_5$	$a_6 - \dot{a}_6$	
2	1	5	12	105
		6	1	105
3	1	7	8	140
		8	10	70
3	2	3	3	70
		4	5	140
5	1	6	4	126
		7	6	84
5	2	2	10	42
		3	12	168
5	3	8	1	168
		9	3	42
5	4	4	7	84
		5	9	126
7	1	1	10	120
		2	12	120
7	2	3	9	180
		4	11	30
7	3	4	6	60
		5	8	150
7	4	6	5	150
		7	7	60
7	5	7	2	30
		8	4	180
7	6	9	1	120
		1	3	120
11	1	1	0	0
		1	0	0

Основание	Глубина ошибки	Разность минимального следа и остатка по контрольным основаниям		Поправка в ПСС по модулю 210
		$a_5 - \dot{a}_5$	$a_6 - \dot{a}_6$	
11	2	2	0	0
		2	0	0
11	3	3	0	0
		3	0	0
11	4	4	0	0
		4	0	0
11	5	5	0	0
		5	0	0
11	6	6	0	0
		6	0	0
11	7	7	0	0
		7	0	0
11	8	8	0	0
		8	0	0
11	9	9	0	0
		9	0	0
11	10	10	0	0
		10	0	0
13	1	0	1	0
		0	1	0
13	2	0	2	0
		0	2	0
13	3	0	3	0
			3	0
13	4	0	4	0
			4	0
13	5	0	5	0
			5	0
13	6	0	6	0
			6	0
13	7	0	7	0
			7	0

Основание	Глубина ошибки	Разность минимального следа и остатка по контрольным основаниям		Поправка в ПСС по модулю 210
		$a_5 - \dot{a}_5$	$a_6 - \dot{a}_6$	
13	8	0	8	0
			8	0
13	9	0	9	0
			9	0
13	10	0	10	0
			10	0
13	11	0	11	0
			11	0
13	12	0	12	0
			12	0

точности. Время преобразования в позиционный код определяется как

$$t_{\text{ПСС}} = (n + 1)(t_p) + t_{\text{ПЗУ}} + T_{\Sigma},$$

(14)

где

n

–

число каналов,

t_p

–

время вычисления модульным сумматором,

$t_{\text{ПЗУ}}$

–

время выборки из ПЗУ коэффициентов ОПС,

T_{Σ}

–

время суммирования коэффициентов ОПС.

Для 14 каналов время преобразования составит $t_{\text{ПСС}} = 88,8$ нс при аппаратных затратах 14 RAMB36, 14RAM18 и 1063 SLISEL.

Заключение.

С помощью метода расширения базы разработан метод построения нейронной сети для преобразования кода системы остаточных классов в позиционный с коррекцией ошибок. Предложенный подход предполагает использование до 70% аппаратной избыточности для обнаружения и исправления 100% одиночных ошибок и обнаружения всех двукратных ошибок. Аналогичный подход в позиционной системе счисления потребует 200% аппаратной избыточности. Выигрыш в быстродействии по сравнению с известной схемой Гарнера, осуществляющее такое преобразование за $2(n - 1)$ циклов, равен двум.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Omondi A., Premkumar B. Residue Number Systems: Theory and Implementation. London: Imperial College Press, 2007. 296 p.
2. Szabo N.S., Tanaka R.T. Residue arithmetic and Its Application to Computer Tecnology. McGraw-Hill, 1967.
3. Червяков Н.И. Нейрокомпьютеры и их применение: учеб. пособие для студентов по направлению подгот. бакалавров и магистров «Прикладная математика и информатика» / Н.И. Червяков [и др.]; под ред. А.И. Галушкина, Н.И. Червякова. М., 2003. Сер. кн. 11 Нейрокомпьютеры и их применение: науч. сер. Том «Нейрокомпьютеры в остаточных классах».
4. Макоха А.Н., Сахнюк П.А., Червяков Н.И. Дискретная математика: учебное пособие. М., 2005.
5. Червяков Н.И. Математическая модель нейронной сети для коррекции ошибок в непозиционном коде расширенного поля Галуа / Н.И. Червяков, И. А. Калмыков, Ю.О. Щелкунова, В.В. Бережной. URL: <http://www.radiotec.ru/catalog.php?cat=jr7&art=4044>.
6. Калмыков И. А. Архитектура отказоустойчивой нейронной сети для цифровой обработки сигналов / И. А. Калмыков, Н. И. Червяков, Ю. О. Щелкунова, А. А. Шилов, В. В. Бережной // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2004. № 12. С. 51–60.

7. Yang L-L. And Hanzo L. Redundant Residue Number System Based Error Correction Codes. In VTC'2001. Atlantic City, USA, 07–10 Oct 2001. P. 1472–1476.
8. Goh V. T. and Siddiqi M. U. Multiple error detection and correction based on Redundant Residue Number System // IEEE Transactions on Communications. Vol. 56. 2008. №3. P. 325–330.
9. James Jilu and Pe Ameenudeen. A novel method for error correction using Redundant Residue Number System in digital communication systems. IEEE 2015 International Conference on Advances in Computing, Communication and Informatics (ICACCI), 2015. P. 1793–1798.
10. Nor Zaidi Haron and Said Hamdioui. Redundant Residue Number System Code for Fault-Tolerant Hybrid Memories // ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems. Vol. 7. 2011. №1. Article 4.
11. Червяков Н. И., Сахнюк П. А., Шапошников А. В. Пути эффективного использования иерархических структур фрагментов нейронных сетей ПЛИС XILINX при аппаратной реализации цифровых фильтров с параллельной обработкой данных // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2001. № 10. С. 26–33.

УДК 004.922

Ляхов П. А. [Lyakhov P. A.],
Валуева М. В. [Valueva M. V.]**ПРИМЕНЕНИЕ СГЛАЖИВАЮЩИХ
ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ОТ ШУМА
ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОТТЕНКАХ СЕРОГО*****Application of smoothing filters for cleaning
of noise of grayscale images**

В статье рассматривается применение сглаживающих фильтров для очистки от шума изображений в оттенках серого. Задача восстановления искаженного изображения имеет большое значение в различных областях: астрономии, медицине, физике, биологии, географии, археологии и многих других. В данной работе произведено сравнение эффективности разных фильтров, таких как простой, биномиальный и Гауссов. Моделирование проводилось в математическом пакете MATLAB, в качестве исходных данных использовались изображения в оттенках серого, размером 256×256 пикселей. Использовались маски фильтров размером 3×3 и 5×5 . Результаты моделирования показали, что для улучшения изображений, которые несильно зашумлены, лучше применять фильтр Гаусса размерностью 5×5 , а для сильно зашумленных изображений достаточно использовать простой сглаживающий фильтр той же размерности.

Ключевые слова: цифровое изображение, шум, сглаживающий фильтр, простой фильтр, биномиальный фильтр, фильтр Гаусса.

The article observes the use of smoothing filters for cleaning of noised grayscale images. The problem of recovery of the distorted images is very important in various fields of astronomy, medicine, physics, biology, geography, archeology and many others. In this paper we compared the efficiency of different types of filters: simple, binomial and Gaussian. The simulation was performed in mathematical package MATLAB and as the initial data we used grayscale images in size 256×256 pixels. We used filter masks in size 3×3 and 5×5 . On the basis of the experiment, conclusions are drawn, what filters it is better to use at different intensity of the image distortion. The simulation results showed that for improving images with not much noise is better to use 5×5 Gaussian filter dimension, but for very noisy images is enough to use a simple smoothing filter with the same dimension.

Keywords: digital image, noise, smoothing filter, simple filter, binomial filter, Gaussian filter.

Методы цифровой обработки изображений широко используются на практике: в астрономии, медицине, физике, биологии, гео-

*

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 14–07–31004–мол–а.

графии, археологии и т. д. [1–3]. В частности, актуальна проблема очистки изображений от *шума* – случайного изменения значений интенсивности [4]. Некоторыми распространенными типами шума являются:

- 1) *«соль и перец»* – случайные изолированные черные или белые точки на изображении;
- 2) *импульсный* – случайные изолированные белые точки на изображении;
- 3) *Гауссов* – изменение интенсивности по нормальному закону распределения.

Для улучшения качества зашумленного изображения (очистки от шума) применяют сглаживающие фильтры: простой, Гауссов, медианный, биномиальный [5, 6]. В данной статье рассмотрены фильтры, которые улучшают зашумленные изображения в оттенках серого.

Обработка изображений в оттенках серого.

Изображение представляет собой двумерную функцию $f(x, y)$, где x и y – это пространственные координаты, а амплитуда f в любой точке с парой координат (x, y) называется *интенсивностью*, или *уровнем серого цвета* изображения в этой точке. Цифровое изображение состоит из конечного числа элементов, каждый из которых расположен в конкретном месте и имеет определенное значение. Эти элементы принято называть *элементами изображения* или *пикселями*. Для цифровых изображений в оттенках серого интенсивность представляется с помощью чисел без знака, изменяющихся в диапазоне от 0 до 255, с 8-битовым представлением [7–9].

Огромное значение для обработки изображений имеет их представление в *частотной области*. Его базисными изображениями являются *периодические структуры*, а «координатное преобразование», которое позволяет перейти к нему, известно как *преобразование Фурье* (передаточная функция) [6, 10, 11].

Периодическая структура прежде всего характеризуется расстоянием между двумя максимумами, или длиной повторения, *длиной волны* λ .

Направление структуры наилучшим образом описывается вектором, нормальным к линиям постоянных уровней яркости. Если зададим длину этого вектора k равной $1/\lambda$, то длина волны и направление могут быть выражены одним вектором, *волновым числом* k .

Полное описание периодической структуры задается как

$$g(k) = r \cos(2\pi k^T x - \varphi), \quad (1)$$

где r – амплитуда,
 $\varphi = 2\pi k \Delta x$ – фазовый угол,
 Δx – расстояние от начала координат до первого максимума [6].

СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Простой фильтр. Простой сглаживающий фильтр заменяет значение каждого пикселя исходного изображения средним значением соседних пикселей, включая себя. Этот фильтр основан на ядре, которое представляет форму и размер учитываемой окрестности. Часто используют простой фильтр с размерностью ядра 3×3 :

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

хотя могут быть использованы и ядра большей размерности, для более сильного сглаживания [5].

Передаточная функция простого фильтра имеет вид

$$\hat{r}^R(k) = \frac{1}{R^2} (1 + 2 \cos(\pi k_x)) (1 + 2 \cos(\pi k_y)), \quad (2)$$

где R – размер фильтра [6].
 На рис. 1 изображен график передаточной функции (2).

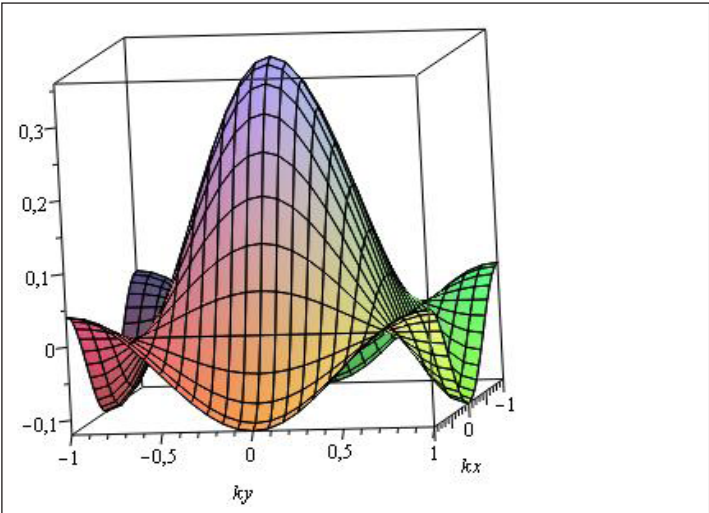


Рис. 1. График передаточной функции простого фильтра для $R = 5$.

Биномиальный фильтр.

Биномиальные фильтры содержат значения дискретного биномиального распределения. Эти фильтры строятся с помощью последовательной свертки с маской $1/2$ [11], что эквивалентно вычислительной схеме треугольника Паскаля (табл. 1).

Таблица 1. Схема треугольника Паскаля

R	f		σ^2
0	1	1	0
1	1/2	1 1	1/4
2	1/4	1 2 1	1/2
3	1/8	1 3 3 1	3/4
4	1/16	1 4 6 4 1	1

где R – порядок бинома,
 f – масштабный множитель 2^{-R} ,
 σ^2 – дисперсия

Двумерные биномиальные фильтры могут быть составлены из горизонтального и вертикального одномерных фильтров:

$$B^R = B_x^R B_y^R. \quad (3)$$

Передаточная функция биномиального фильтра имеет вид

$$\hat{b}^R(k) = \cos^R(\pi k_x / 2) \cos^R(\pi k_y / 2), \quad (4)$$

где R – порядок бинома [6].

На рис. 2 изображен график передаточной функции (4).

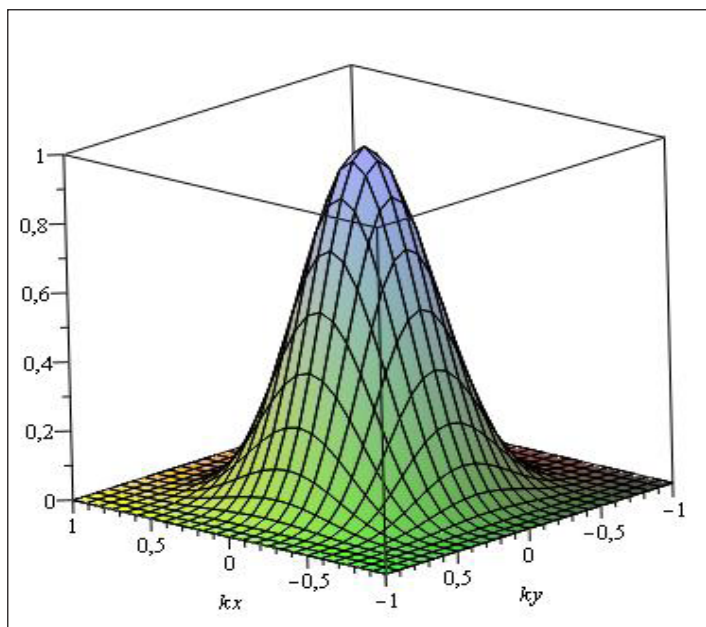


Рис. 2. График передаточной функции биномиального фильтра для $R = 4$.

Фильтр Гаусса.

Другой метод сглаживания изображений обрабатывает входное изображение фильтром Гаусса [4, 5]. Двумерная функция Гауссова (рис. 3) фильтра выглядит следующим образом:

$$G(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2}. \quad (5)$$

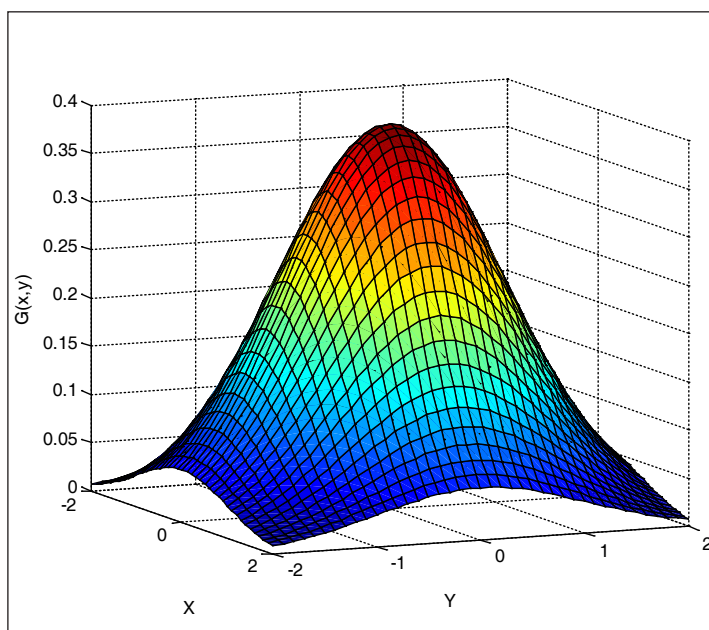


Рис. 3. График двумерной функции фильтра Гаусса.

Передаточная функция фильтра Гаусса имеет вид

$$\hat{h}(k) = \frac{1}{2} (\cos(\pi k_x) + \cos(\pi k_y)). \quad (6)$$

На рис. 4. изображен график передаточной функции (6).

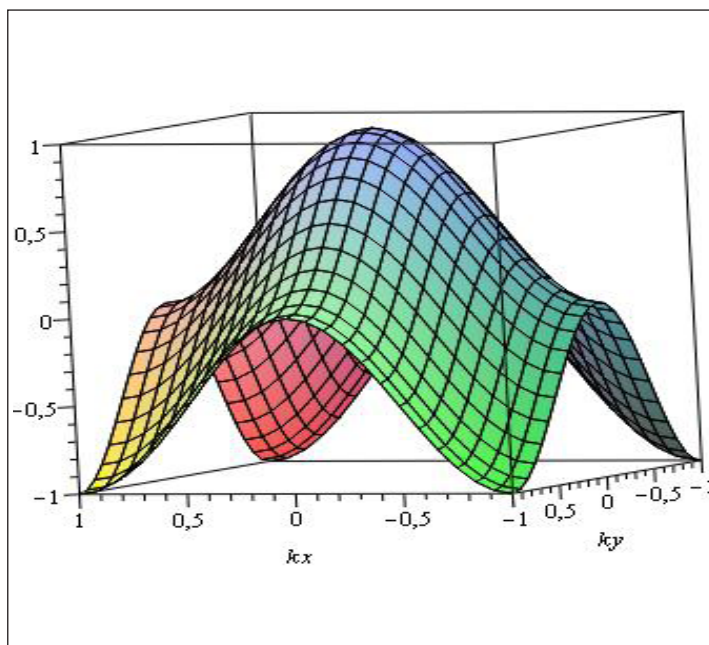


Рис. 4. График передаточной функции фильтра Гаусса.

Моделирование.

Моделирование производилось в математическом пакете MATLAB [7]. В качестве исходных данных были взяты четыре изображения (рис. 5).

Для искажения изображений использовался Гауссов шум с дисперсиями:

$$\sigma_1^2 = 0,05, \sigma_2^2 = 0,25, \sigma_3^2 = 0,45.$$

Очистка изображений от шума проводилась фильтрами из таблицы 2. Далее в тексте они используются как фильтры (1–6) соответственно.



Рис. 5.

Исходные изображения.

Таблица 2. Использованные сглаживающие фильтры

№ фильтра	Название	Размер-ность	Вид
1	Простой фильтр	3 × 3	$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$
2		5 × 5	$\frac{1}{25} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$
3	Бино-миальный фильтр	3 × 3	$\frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$
4		5 × 5	$\frac{1}{256} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix}$
5	Гауссов фильтр	3 × 3	$\frac{1}{15} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$
6		5 × 5	$\frac{1}{351} \begin{bmatrix} 1 & 5 & 8 & 5 & 1 \\ 5 & 21 & 34 & 21 & 5 \\ 8 & 34 & 55 & 34 & 8 \\ 5 & 21 & 34 & 21 & 5 \\ 1 & 5 & 8 & 5 & 1 \end{bmatrix}$

Пример восстановления искаженного изображения с помощью фильтра–6 показан на рис. 6. На рис. 6а – 6в представлены зашумленные изображения, а на рис. 6г – 6е – восстановленные.

Для оценки качества работы фильтров была использована числовая характеристика PSNR, или пиковое отношение сигнал-шум, между двумя изображениями (оригиналом и полученным изображением). Вычисляется данная характеристика по формуле

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{R^2}{MSE} \right) \quad (7)$$

где

$$MSE = \frac{\sum_{M,N} [I_1(m,n) - I_2(m,n)]^2}{M \cdot N} -$$

среднеквадратическая ошибка сравнения качества восстановленного изображения;

R – максимальное колебание входного сигнала изображения. Так как величина $PSNR$ имеет логарифмическую природу, единицей ее измерения является децибел (Дб). Чем больше величина $PSNR$, тем лучше качество восстановленного изображения, для тождественно равных изображений $PSNR = \infty$. При исследовании алгоритмов сжатия и очистки от шума изображений в оттенках серого практически пригодной считается величина $PSNR$, изменяющаяся в пределах от 20 Дб до 50 Дб [12, 13].

Результаты эксперимента представлены в таблице 3.

Из таблицы 3 видно, что при шуме с дисперсиями $\sigma_1^2 = 0,05$ и $\sigma_2^2 = 0,25$ лучший результат показал фильтр 6. При увеличении дисперсии шума до $\sigma_3^2 = 0,45$, этот фильтр уже не является самым эффективным из рассмотренных, и лучшим оказался фильтр 2.

Таблица 3. Сравнение качества восстановленных изображений PSNR, Дб

Дисперсия, $\sigma^1 \sigma^2$	№ филь-тра	№ изображения				Сред-нее значение
		1	2	3	4	
0,05	1	24,13	23,05	22,26	21,77	22,80
	2	24,42	22,75	21,35	20,75	22,32
	3	23,70	23,23	22,75	22,30	23,00
	4	24,70	23,38	22,45	21,94	23,12
	5	23,97	23,24	22,66	22,19	23,02
	6	24,89	23,40	22,52	22,02	23,21
0,25	1	12,03	12,10	12,36	12,05	12,14
	2	12,10	12,12	12,30	11,96	12,12
	3	11,94	12,10	12,38	12,08	12,13
	4	11,98	12,14	12,39	12,07	12,15
	5	12,01	12,11	12,39	12,08	12,15
	6	12,19	12,13	12,40	12,08	12,20
0,45	1	7,00	7,91	7,83	7,55	7,57
	2	7,07	7,95	7,85	7,57	7,61
	3	6,94	7,90	7,83	7,55	7,56
	4	6,92	7,93	7,84	7,56	7,56
	5	7,00	7,91	7,83	7,56	7,58
	6	6,97	7,93	7,84	7,56	7,58

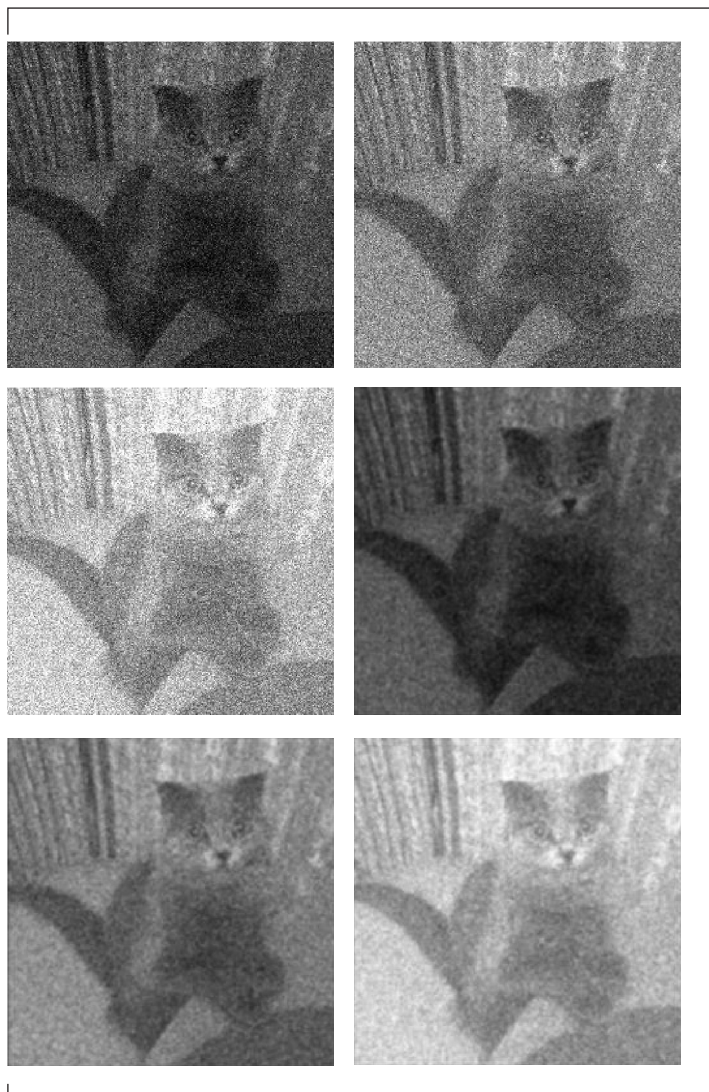


Рис. 6.

Пример очистки изображения от шума с помощью фильтр Гауссова размерностью 5×5 :

- а) зашумленное изображение с дисперсией $\sigma_1^2 = 0,05$;
- б) зашумленное изображение с дисперсией $\sigma_2^2 = 0,25$;
- в) зашумленное изображение с дисперсией $\sigma_3^2 = 0,45$;
- г) зашумленное изображение с дисперсией $\sigma_1^2 = 0,05$, очищенное от шума;
- д) зашумленное изображение с дисперсией $\sigma_2^2 = 0,25$, очищенное от шума;
- е) зашумленное изображение с дисперсией $\sigma_3^2 = 0,45$, очищенное от шума.

Заключение.

В работе исследован вопрос о применении сглаживающих фильтров для очистки от шума изображений в оттенках серого.

Результаты моделирования показали, что для улучшения изображений, которые несильно зашумлены, лучше применять фильтр Гаусса размером 5×5 , а для сильно зашумленных изображений достаточно использовать простой сглаживающий фильтр той же размерности.

Интересным направлением дальнейших исследований является изучение вопроса об очистке изображений от шума в конкретных областях: медицинской диагностике, биологии, обработка спутниковых снимков, археологические исследования и т. д.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дороничева А.В., Савин С.З. Методы распознавания медицинских изображений для задач компьютерной автоматизированной диагностики // Современные проблемы науки и образования [Электронный ресурс]. URL: <http://www.science-education.ru/118-14414>.
2. Применение радарной интерферометрии при изучении подработанных территорий / Ж.З. Толеубекова, Д.В. Мозер, А.К. Омарова, А.С. Туякбай // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь. 2012. Т. 1.
3. Быков А. Л., А. С. Костюк, В. Л. Быков Применение материалов аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата для картографического обеспечения археологических работ // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь. 2013. № 1. Т. 4.

4. Jain Ramesh, Kasturi Rangachar, Brian G. Schunck. Machine vision. Published by McGraw-Hill, Inc., 1995. 549 p.
5. Shih Frank Y. Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques. NY: WILEY, 2010. 537 p.
6. Яне Б. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2007. 584 с.
7. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М.: Техносфера, 2006. 616 с.
8. Bovik A.I. Handbook of image and video processing. Texas: Elsevier, 2005. 1372 p.
9. Карташев В. Г. Основы теории дискретных сигналов и цифровых фильтров. М.: Высш. шк., 1982.
10. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. 790 с.
11. Хемминг Р. В. Цифровые фильтры / пер. с англ.; под ред. А. М. Трахтмана. М.: Сов. радио, 1980.
12. Salomon D. Data Compression. London: Springer-Verlag, 2007. 1092 p.
13. Huynh-Thu Q., Ghanbari M. Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment // Electronics Letters. Vol. 44. 2008. № 13. P. 800–801.

УДК 517.972:519.633 **Наац И. Э. [Naats I. E.],**
Наац В. И. [Naats V. I.],
Рыскаленко Р. А. [Ryskalenko R. A.]

**РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
ДЛЯ УРАВНЕНИЙ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО
ТИПА С ПРИБЛИЖЕННЫМИ
ДАННЫМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ
ПРИКЛАДНОГО ГАРМОНИЧЕСКОГО
АНАЛИЗА И ВАРИАЦИОННОГО МЕТОДА
ВЗВЕШЕННОЙ НЕВЯЗКИ**

**Computational and analytical models for
equations of parabolic type with approximate
data on the basis of methods of applied
harmonic analysis and variational method
of weighted residuals**

Рассматривается нестационарное уравнение массопереноса примесей в атмосфере, которое является линейным дифференциальным уравнением параболического типа. При этом предполагается, что данная математическая модель требует привлечения приближенно заданных исходных данных или полуэмпирических функций для их определения. Для решения этой задачи в работе выполняется построение регуляризирующих численных методов и соответствующих расчетно-аналитических моделей на основе методов прикладного гармонического анализа и вариационного метода взвешенной невязки.

Ключевые слова: уравнение массопереноса, расчетно-аналитическая модель, методы прикладного гармонического анализа, регуляризирующие численные методы, вариационный метод взвешенной невязки.

Considered non-stationary equation of mass transfer of impurities in the atmosphere, which is a linear differential equation of parabolic type. It is assumed that the mathematical model requires attracting approximately given initial data or semiempirical functions for their determination. To solve this problem in the work builds regulating numerical methods and related computational and analytical models based on the methods of applied harmonic analysis and variational method of weighted residuals.

Key words: the equation of mass transfer, computational and analytical model, methods of applied harmonic analysis, regularization numerical methods, variational method of weighted residuals.

При разработке численных методов и соответствующих расчетно-аналитических моделей для решения различных функциональных уравнений используются обычно те или иные методы теории прибли-

жения функций, в соответствии с которыми искомые функции могут быть представлены соответствующими обобщенными полиномами. Последующее построение решающего алгоритма сводится к нахождению более простых уравнений для вычисления коэффициентов аппроксимационных полиномов. Подобный подход в ряде случаев приводит к определенным затруднениям с точки зрения устойчивости вычислительных процессов, особенно тогда, когда исходные данные в задаче являются приближенно заданными функциями. Это замечание относится прежде всего к решению дифференциальных уравнений, поскольку операции дифференцирования на приближенных данных являются некорректными в математическом отношении. Аналогичные задачи возникают в математическом моделировании реальных явлений, описываемых дифференциальными уравнениями и требующих привлечения эмпирических данных или полуэмпирических расчетных формул. К подобным задачам можно, в частности, отнести задачу моделирования пространственно временной изменчивости поля концентрации загрязняющих веществ, распространяющихся в приземном слое атмосферы [1, 2, 3].

Целью настоящей работы является построение регулирующих численных методов и соответствующих расчетно-аналитических моделей для решения нестационарного уравнения переноса субстанции при использовании в нем приближенных исходных данных, характеризующих турбулентное состояние пограничного слоя атмосферы.

Постановка задачи.

Изложение предлагаемых ниже методов регуляризации осуществляется на примере уравнения параболического типа, каким и является так называемое полуэмпирическое уравнение переноса вида [1]:

$$\begin{aligned} \dot{u}(x, y, z, t) = & - \left[\frac{\partial}{\partial x} (V_x u) + \frac{\partial}{\partial y} (V_y u) + \frac{\partial}{\partial z} (V_z u) \right] + \\ & + \left[\frac{\partial}{\partial x} (K, u'_x) + \frac{\partial}{\partial y} (K, u'_y) + \frac{\partial}{\partial z} (K, u'_z) \right] + S(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (1)$$

В этом уравнении $(x, y, z, t) \in \Omega = \Omega_x + \Omega_y + \Omega_z$, $u(x, y, z, t)$ – концентрация загрязняющих примесей в атмосфере, $V_x(x, y, z, t)$, $V_y(x, y, z, t)$, $V_z(x, y, z, t)$ – компоненты вектора скорости ветра $\vec{V}$ в направлении координатных осей $\vec{Ox}$, $\vec{Oy}$, $\vec{Oz}$ соответственно, $K(x, y, z, t)$ – коэффициент турбулентной диффузии, $S(x, y, z, t)$ – источник примесей, в точке пространства $P(x, y, z)$ в момент времени t . При этом u соответствует u' . Множество исходных данных в рассматриваемой модели в дальнейшем обозначим через $\tilde{B} = \{\tilde{V}, \tilde{K}\}$ и считаем состоящим из функций, не дифференцируемых в обычном смысле. Подобное предположение естественно делает задачу решения (1) на множестве $\tilde{B}$ неопределенной. Последующее изложение предлагаемого подхода к нахождению приближенных решений модели (1) на множестве $\tilde{B}$ осуществляем в предположении, что эти решения описываются тригонометрическим полиномом

$$u(x, y, z, t) \cong u_{NMK}(x, y, z, t) = \frac{8}{abc} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K a_{nmk}(t) \cdot \sin \frac{\pi nx}{a} \cdot \sin \frac{\pi my}{b} \cdot \sin \frac{\pi kz}{c}, \quad (2)$$

определенным на брус $\Omega = \Omega_x \times \Omega_y \times \Omega_z = [0, a] \times [0, b] \times [0, c]$. Полагаем далее, что $u(x, y, z, t)$ на границе указанной области принимает нулевые значения. В противном случае требуется ввести соответствующие граничные элементы (составляющие компоненты в (2) [4, 5]). При этом функции базиса (в данном случае речь идет о разложении функций по произведениям), а именно

$$q_{nmk}(x, y, z) = \frac{8}{abc} \sin \frac{\pi nx}{a} \cdot \sin \frac{\pi my}{b} \cdot \sin \frac{\pi kz}{c},$$

в принципе могут быть и иными, например, это могут быть функции вида

$$p_{nmk}(x, y, z) = \frac{8}{abc} \cos \frac{\pi nx}{a} \cdot \cos \frac{\pi my}{b} \cdot \cos \frac{\pi kz}{c},$$

а также их линейные комбинации. Если допустить, что функции $V^{(i)}(x, y, z, t)$ ($i = 1, 2, 3$) и $K(x, y, z, t)$ входящие в множество исходных данных $\tilde{B}$, представимы в виде полиномов (2), а именно $V_{NMK}^{(i)}(x, y, z, t)$ и $K_{NMK}(x, y, z, t)$, то возникает вопрос: в каком соотношении будут при этом

находиться их частные производные, скажем, V'_x и $(V_{NMK})'_x$ и т. д. в ситуации, когда данные являются приближенными? Для того чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к некоторым известным положениям прикладного гармонического анализа, предварительно заметив, что понятие «прикладной гармонический анализ», используемое в настоящей работе, интерпретируется в соответствии с работой К. Ланцоша [6].

Положим для примера, что некоторая функция $f(x)$ непрерывна на интервале $[0, a]$ и представляется с приемлемой точностью конечным рядом Фурье по системе $\left\{\sin \frac{\pi nx}{a}\right\}$, $(n = 1, 2 \dots)$, т. е. имеет место соотношение

$$f(x) \approx f_N(x) = \sum_{n=1}^N a_n \sin \frac{\pi nx}{a} \quad (3)$$

для всех x из указанного интервала. Подобное представление имеет практическую значимость, если $|a_n| \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$ для данной функции $f(x)$. Для непрерывной функции это действительно имеет место. Если же исследуемая функция $f(x)$ представлена своим приближением $\tilde{f}(x)$, содержащим помимо регулярной компоненты, для которой указанное условие выполняется, также и нерегулярные компоненты, для которых значение $|a_n|$ не убывает с ростом n , то представление (3) теряет практический смысл. Напомним, что нерегулярные компоненты в исходных данных появляются всякий раз, когда используются в вычислениях так называемые эмпирические данные, содержащие ошибки измерений (реализации случайных процессов). Типичной ситуацией в задачах прикладного гармонического анализа является случай, когда $|a_n(f)| \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$, и можно говорить о соответствии $f(x)$ и $f_N(x)$ в смысле (3), однако эта сходимость последовательности $\{|a_n(f)|\}$ явно недостаточна для сходимости ряда $\sum_{n=1}^{\infty} a_n(f) \left(\sin \frac{\pi nx}{a}\right)'$, и, значит, нет соответствия между $f'(x)$ и $f'_{N,x}(x)$. В связи с этим в дальнейшем будем различать последовательности коэффициентов Фурье $\{a_n(f)\}$ и $\{\tilde{a}_n(f) = a_n(\tilde{f})\}$, которые при $n \rightarrow \infty$ ведут себя различным образом. Заметим, что в каждой конкретной задаче смысл обозначения $\tilde{f}(x)$ и его соотношение с функцией $f(x)$ определяют ее содержанием и требует четкой формулировки принимаемых предположений.

**Задача суммирования продифференцированных
рядов Фурье, коэффициенты которых
вычислены по приближенным данным,**

и метод регуляризации. В контексте выше изложенного

в прикладном анализе особое внимание уделяется задаче суммирования продифференцированных рядов Фурье, коэффициенты которых вычислены по приближенным данным. Приемы, связанные с регуляризацией поведения продифференцированных рядов Фурье, как правило, основываются на тех или иных способах их усреднения. Простейшим из них можно считать так называемый метод σ -множителей, предложенный К. Ланцошем [6]. Не останавливаясь подробно на технике вычисления этих множителей, приведем итоговые расчетные выражения для производных от тригонометрических аппроксимационных полиномов типа (2). Для простоты ограничимся случаем функции двух переменных по x и y , а именно:

$$\tilde{u}'_x(x, y, t) \approx u'_{NM,x}(x, y, t) = \frac{8}{abc} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \tilde{a}_{nm}(t) \cdot \sigma_{N,n}^{(1)} \cdot \left(\sin \frac{\pi nx}{a} \right)' \cdot \sin \frac{\pi my}{b}, \quad (4)$$

$$\tilde{u}'_y(x, y, t) \approx u'_{NM,y}(x, y, t) = \frac{8}{abc} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \tilde{a}_{nm}(t) \cdot \sin \frac{\pi nx}{a} \cdot \sigma_{M,m}^{(1)} \cdot \left(\sin \frac{\pi my}{b} \right)', \quad (5)$$

$$\sigma_{N,n}^{(1)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{a} \cdot \frac{n}{N}\right)}{\left(\frac{\pi}{a} \cdot \frac{n}{N}\right)}, \quad \sigma_{M,m}^{(1)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{b} \cdot \frac{m}{M}\right)}{\left(\frac{\pi}{b} \cdot \frac{m}{M}\right)}. \quad (6)$$

Поскольку значения σ -множителей (6) удовлетворяют условию $0 < \sigma < 1$, то их роль в ускорении сходимости рядов (4)–(5) вполне очевидна. Ясно, что при $n = 0$ $\sigma_{N,n}^{(1)} = 1$, и $\sigma_{N,n}^{(1)} = 0$ при $n = N - 1$. Используя данный подход, нетрудно показать справедливость следующих приближенных выражений для оценки векторных производных функций $u(x, y, z, t)$, представленных своими приближениями $\tilde{f}$ (тоже $\{a_n(\tilde{f}) = \tilde{a}_n(f)\}$). Опуская промежуточные вычисления имеем:

$$u''_{xx}(x, y, t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \tilde{a}_{nm}(t) \cdot \sigma_{N,n}^{(2)} \cdot \left(\sin \frac{\pi nx}{a} \right)'' \cdot \sin \frac{\pi my}{b},$$

$$\begin{aligned}
u''_{xy}(x, y, t) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \tilde{a}_{nm}(t) \cdot \sin \frac{\pi n x}{a} \cdot \sigma_{M,m}^{(2)} \cdot \left(\sin \frac{\pi m y}{b} \right)'', \\
u''_{xy}(x, y, t) &\approx \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \tilde{a}_{nm}(t) \cdot \sigma_{N,n}^{(1)} \cdot \left(\sin \frac{\pi n x}{a} \right)' \cdot \sigma_{M,m}^{(1)} \cdot \left(\sin \frac{\pi m y}{b} \right)', \\
\sigma_{N,n}^{(2)} &= \left(\frac{\sin \left(\frac{\pi}{2a} \cdot \frac{n}{N} \right)}{\left(\frac{\pi}{2a} \cdot \frac{n}{N} \right)} \right)^2, \quad \sigma_{M,m}^{(2)} = \left(\frac{\sin \left(\frac{\pi}{2b} \cdot \frac{m}{M} \right)}{\left(\frac{\pi}{2b} \cdot \frac{m}{M} \right)} \right)^2.
\end{aligned}$$

Изложенный здесь метод регуляции тригонометрических аппроксимационных многочленов в случае применения к ним операции дифференцирования можно рассмотреть с более общей точки зрения, используя понятие оператора обобщенного дифференцирования, введенного ранее в работах авторов [2, 3]. Действительно, обозначим через $\mathcal{G}_n(x)$ составляющую базиса $\{\mathcal{G}_n(x)\} (n = 1, 2)$. Тогда изложенный выше метод «дифференцирования» рядов приводит к соотношению:

$$\sigma_{N,n}^{(1)} \cdot D^{(1)} \mathcal{G}_n(x) = \tilde{D}^{(1)} \mathcal{G}_n(x), \quad (7)$$

где $D^{(1)} = \frac{d}{dx}$. В соответствии с этим оператор $\tilde{D}^{(1)}$ следует считать оператором обобщенного дифференцирования для конечных рядов Фурье с приближенными коэффициентами $\tilde{a}_n(f) = a_n(\tilde{f})$. Формально при $N \rightarrow \infty$ оператор $\tilde{D}^{(1)}$ может быть сколь угодно близок к оператору $D^{(1)}$ в смысле подходящей нормы $\|\tilde{D}^{(1)} \tilde{f} - D^{(1)} f\|$ при условии, что $\|\tilde{f} - f\|$ достаточно мала. Если речь заходит об обобщенных производных ν -го порядка, то (7) можно писать в виде

$$\tilde{D}^{(\nu)} \mathcal{G}_n(x) = \sigma_{N,n}^{(\nu)} D^{(\nu)} \mathcal{G}_n(x), \quad \text{где } \sigma_{N,n}^{(\nu)} = \left(\frac{\sin \left(\frac{\pi}{a} \cdot \frac{n}{N} \right)}{\left(\frac{\pi}{\nu \cdot a} \cdot \frac{n}{N} \right)} \right)^\nu$$

$$\text{при } \mathcal{G}_n(x) = \sin \frac{\pi}{a} n x. \quad (8)$$

Построение расчетно-аналитической модели для уравнения массопереноса. Выражения, подобные (8), могут быть построены не только для тригонометрических базисных функций. Используя представление искомой функции $u(x, y, t)$ в виде тригонометрического полинома (2) и введенные выше правила его дифференцирования, можно вернуться к модели (1), определенной на множестве исходных данных $\tilde{B} = \{(\tilde{V}, \tilde{K})\}$. Предполагается, что приближенно заданные функции представлены последовательностями своих коэффициентов Фурье, т.е. для компонент вектора скорости ветра $\{a_{nm}(t, \tilde{V})\}$ и коэффициента турбулентной диффузии $\{a_{nm}(t, \tilde{K})\}$ соответственно. Для компактной записи соответствующих расчетных формул введем следующие обозначения

$$\begin{aligned} q_{nm}(x, y) &= \frac{4}{ab} \cdot \sin \frac{\pi nx}{a} \cdot \sin \frac{\pi my}{b}, \\ q_{nm}^{(1,x)}(x, y) &= \frac{4}{ab} \cdot \sigma_{Nm}^{(1)} \cdot \left(\sin \frac{\pi nx}{a} \right) \cdot \sin \frac{\pi my}{b}, \\ q_{nm}^{(1,y)}(x, y) &= \frac{4}{ab} \cdot \sin \frac{\pi nx}{a} \cdot \sigma_{M,m}^{(1)} \cdot \left(\sin \frac{\pi my}{b} \right), \\ q_{nm}^{(x,y)}(x, y) &= \frac{4}{ab} \cdot \sigma_{N,n}^{(1)} \cdot \left(\sin \frac{\pi nx}{a} \right) \cdot \sigma_{M,m}^{(1)} \cdot \left(\sin \frac{\pi my}{b} \right), \\ q_{nm}^{(2,x)}(x, y) &= \frac{4}{ab} \cdot \sigma_{Nm}^{(2)} \cdot \left(\sin \frac{\pi nx}{a} \right) \cdot \sin \frac{\pi my}{b}, \\ q_{nm}^{(2,y)}(x, y) &= \frac{4}{ab} \cdot \sin \frac{\pi nx}{a} \cdot \sigma_{M,m}^{(2)} \cdot \left(\sin \frac{\pi my}{b} \right). \end{aligned}$$

Исходную модель (1) удобно представить в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -Q(x, y, t, u, \tilde{V}) + Q(x, y, t, u, \tilde{K}) + S(x, y, t), \quad (9)$$

где первый функционал по u в правой части (9) соответствует первому слагаемому в правой части (1), а второй – второму. С учетом принятых обозначений имеем

$$Q(x, y, t, u, \tilde{V}) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \tilde{a}_{nm}(t) \cdot Q_{nm}(x, y, \tilde{V}),$$

где

$$Q_{nm}(x, y, \tilde{V}) = \tilde{V}'_{1,x} \cdot q_{nm}(x, y) + \tilde{V}_1 \cdot q_{nm}^{(1,x)}(x, y) + \tilde{V}'_{2,y} \cdot q_{nm}(x, y) + \tilde{V}_2 \cdot q_{nm}^{(1,y)}(x, y),$$

$$\tilde{V}_1(x, y) \text{ и } \tilde{V}_2(x, y)$$

— соответствующие компоненты вектора скорости ветра.

Аналогично записываем и второй функционал в (9), а именно:

$$P(x, y, t, u, \tilde{K}) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \tilde{a}_{nm}(t) \cdot P_{nm}(x, y, \tilde{K}),$$

где

$$P_{nm}(x, y, \tilde{K}) = \tilde{K}'_x \cdot q_{nm}^{(1,x)}(x, y) + \tilde{K} \cdot q_{nm}^{(2,x)}(x, y) + \tilde{K}'_y \cdot q_{nm}^{(1,y)}(x, y) + \tilde{K} \cdot q_{nm}^{(2,y)}(x, y)$$

В итоге уравнение (9) примет вид

$$\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \dot{\tilde{a}}(t) \cdot q_{nm}(x, y) = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \tilde{a}_{nm}(t) \cdot B_{nm}(x, y, \tilde{V}, \tilde{K}) + S(x, y, t), \quad (10)$$

$$\text{где} \quad B_{nm}(x, y, \tilde{V}, \tilde{K}) = Q_{nm}(x, y, \tilde{V}) - P_{nm}(x, y, \tilde{K}).$$

Уравнение (10) является линейной системой обыкновенных дифференциальных уравнений относительно матрицы коэффициентов $\{\tilde{a}_m(t)\}$, которые определяют Фурье-разложение функции $u(x, y, t)$ в двухмерный ряд Фурье. Для их численного нахождения необходимо тем или иным способом «свернуть» систему (10) по пространственным переменным x и y . В частности эту операцию можно выполнить с помощью метода взвешенной невязки [1, 4, 5].

В этом методе система функциональных уравнений (10) преобразуется в итоговую систему на основе вычисления интегралов вида

$$\int_{\Omega} w_{l_1, l_2}(x, y) \rho(x, y, t) dx dy = 0, \quad (11)$$

где $\rho(x, y, t)$ — невязка для системы (11) и $l_1 = 1, \dots, N$, $l_2 = 1, \dots, M$.

Без ограничения общности можно полагать, что $w_{l_1, l_2}(x, y) = w_{l_1}(x) \cdot w_{l_2}(y)$ и остается разумно выбрать весовые функции $w_l(x)$, сообразуясь с теми или иными особенностями решаемой задачи. Соответствующие вопросы рассматривались ранее в работах [1, 4, 5]. В контексте данной статьи заметим следующее. Выбор системы весовых функций можно в определенной степени связать с аналитическими свойствами составляющих функций базиса. Использование в качестве последних тригонометрических полиномов $\mathcal{G}_n(x) = \sin \frac{\pi}{a} nx$ делает целесообразным по ряду причин в качестве $w_l(x)$ также выбрать тригонометрические полиномы. Не останавливаясь подробно, уточним, что разумно в качестве $w_l(x)$ выбирать многочлены Фейера [6] по тригонометрическим системам, т. е. положить

$$w_l(x) = \Phi_v(x, x_l) = \frac{1}{2\pi v} \left(\frac{\sin\left(v \cdot \pi \cdot \frac{x_l - x}{2}\right)}{\sin\left(\pi \cdot \frac{x_l - x}{2}\right)} \right)^2,$$

где V –

порядок соответствующего полинома. Выбор порядка v согласуется с размерностью задачи N и величиной ожидаемой погрешности в исходных данных. С учетом того, что в интегралах (11) $w_{l_1, l_2}(x, y) = \Phi_{v_1}(x, x_{l_1}) \cdot \Phi_{v_2}(y, y_{l_2})$, где $\{(x_{l_1}, y_{l_2})\}$ – соответствующая сетка в Ω по пространственным переменным x и y , система (10) преобразуется к виду

$$\hat{A} \cdot \dot{\hat{a}}(t) = -\hat{B}(t) \cdot \hat{a}(t) + \hat{h}(t), \quad (12)$$

$$\hat{A} = \left\{ \iint_{\Omega_x \Omega_y} \Phi_{v_1}(x, x_{l_1}) \cdot \Phi_{v_2}(y, y_{l_2}) \cdot q_{nm}(x, y) dx dy \right\} = \{A_{nm}^{(l_1, l_2)}\},$$

$$\widehat{B}(t) = \left\{ \iint_{\Omega_x \Omega_y} \Phi_{v_1}(x, x_{l_1}) \cdot \Phi_{v_2}(y, y_{l_2}) \cdot B_{nm}(x, y, t) dx dy \right\} = \{B_{nm}^{(l_1, l_2)}(t)\},$$

$$\widehat{h}(t) = \left\{ \iint_{\Omega_x \Omega_y} \Phi_{v_1}(x, x_{l_1}) \cdot \Phi_{v_2}(y, y_{l_2}) \cdot S(x, y, t) dx dy \right\} = \{h^{(l_1, l_2)}(t)\}.$$

Уравнение (12), представленное в виде $\dot{\widehat{a}}(t) = -\widehat{A}^{-1}\widehat{B}(t)\widehat{a}(t) + \widehat{A}^{-1}\widehat{h}(t)$, является уравнением эволюционного типа, методы решения которого ранее рассматривались авторами в работе [1]. Расчетные соотношения выше приводились для двухмерной задачи. Ясно, что не составляет труда расписать их для более сложного трехмерного случая.

В заключение, рассмотрим в качестве примера приложения изложенной здесь теории вариант одномерной задачи, акцентируя в большей мере внимание на способах регуляризации вычислительного процесса. Допустим, что требуется построить расчетно-аналитическую модель для нахождения приближенных решений уравнения вида

$$\frac{\partial u}{\partial t} + C_0 \cdot u'_x + C_1 \cdot (u^2)'_x + C_2 \cdot u'''_{xxx} = s(x, t), \quad (13)$$

в которой C_0 , C_1 и C_2 считаются постоянными. Последнее предположение для вышеизложенного подхода к решению уравнения (13) не носит принципиального характера, а лишь упрощает запись расчетных формул, приводимых ниже. Выражение (13) можно переписать в виде

$$\dot{u} + p(u) \cdot u'_x + C_2 \cdot u'''_x = s(x, t), \quad (14)$$

если ввести $p(u) = (C_0 + 2 \cdot C_1 \cdot u)$. То, что в модели (13) присутствует производная третьего порядка, существенно затрудняет применение обычных разностных схем (сеточных моделей), особенно при наличии погрешностей в исходных данных (C_0 , C_1 , C_2). Используя рассмотренные выше представления исходной функции $u(x, t)$ и ее производных по переменной $x \in [0, a]$, записываем

$$\begin{aligned} \dot{u}_N(x, t) &= \frac{1}{a} \cdot \sum_{n=1}^N \dot{a}_n(t) \cdot \sin \frac{\pi n x}{a}, \\ u'_{N,x}(x, t) &= \frac{1}{a} \cdot \sum_{n=1}^N a_n(t) \cdot \sigma_{N,n}^{(1)} \cdot \left(\sin \frac{\pi n x}{a} \right)', \\ u'''_{N,xxx}(x, t) &= \frac{1}{a} \cdot \sum_{n=1}^N a_n(t) \sigma_{N,n}^{(3)} \cdot \left(\sin \frac{\pi n x}{a} \right)^{(3)}. \end{aligned}$$

Значения σ -множителей определяются в соответствии с (8). Уравнение (14) с учетом этих соотношений предстанет в виде системы уравнений относительно $\vec{a}(t)$:

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N \dot{a}_n(t) \cdot \sin \frac{\pi n x}{a} + p(\vec{a}) \cdot \sum_{n=1}^N a_n(t) \cdot \sigma_{N,n}^{(1)} \cdot \left(\sin \frac{\pi n x}{a} \right)' + \\ + C_2 \cdot \sum_{n=1}^N a_n(t) \cdot \sigma_{N,n}^{(3)} \cdot \left(\sin \frac{\pi n x}{a} \right)^{(3)} = a \cdot s(x, t) \end{aligned} \quad (15)$$

Используя метод взвешенной невязки [1, 4, 5], систему (15) можно привести к стандартному виду

$$\widehat{A} \cdot \vec{a}(t) = -\widehat{B}(\vec{a}, t) \cdot \vec{a}(t) + \vec{s}(t), \quad (16)$$

где элементы матрицы $\widehat{A}$ определяются формулой

$$a_{ln} = \int_0^a w_l(x) \cdot \sin \frac{\pi n x}{a} dx, \quad l = 1..N, \quad n = 1..N,$$

матрицы $\widehat{B}(t)$:

$$b_{ln}(t) = \int_0^a w_l(x) \cdot p(\vec{a}(t)) \cdot \left(\sin \frac{\pi n x}{a} \right)' \cdot \sigma_{N,n}^{(1)} dx + C_2 \cdot \int_0^a w_l(x) \cdot \sigma_{N,n}^{(3)} \cdot \left(\sin \frac{\pi n x}{a} \right)^{(3)} dx,$$

и вектора $\vec{s}(t)$:

$$s_l(t) = a \cdot \int_0^a w_l(x) \cdot s(x, t) dx.$$

Применяя далее к (16) принцип рекурсий на сетке узлов $\{t_j\}$ по переменной $t \in [0, T]$, получим итоговое расчетное соотношение:

$$\hat{A} \frac{\vec{a}(j+1) - \vec{a}(j-1)}{2\tau} = -\hat{B}(\vec{a}(j)) \cdot \frac{\vec{a}(j+1) - \vec{a}(j-1)}{2\tau} + \vec{s}(j), \quad j = 1, 2, \dots \quad (17)$$

в котором подразумевается, что $\vec{a}(j) = \vec{a}(t_j)$, то же касается и $\vec{s}(j)$. Особенности вычислительных процессов, соответствующие расчетно-аналитической модели (17), подробно исследовались авторами в работе [1].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Наац В.И., Наац И.Э. Математические модели и численные методы в задачах экологического мониторинга атмосферы: монография. М.: Физматлит, 2010. 328 с.
2. Рыскаленко Р.А., Чемеригина М.С. Операторы обобщенного дифференцирования в численных методах решения нелинейного уравнения переноса с приближенными данными // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2013. № 1 (34). С. 35–38.
3. Наац И.Э., Артемов С.В. Итерационные алгоритмы для численного решения уравнения переноса на основе операторов обобщенного дифференцирования // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2013. № 1 (34). С. 21–26.
4. Наац В.И. Вычислительная модель нестационарного уравнения переноса примеси на основе метода взвешенной невязки // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2004. № 5(04). С. 3–15.
5. Наац В.И., Гаршина Т.В. Вычислительная модель нестационарного уравнения переноса примесей на основе метода взвешенной невязки и операторов обобщенного дифференцирования функций // Наука. Инновации. Технологии: научный журнал Северо-Кавказского федерального университета. 2013. № 3. С. 7–18.
6. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. М.: Физматлит, 1961. 524 с.

УДК 537.611

Попов И. П. [Popov I. P.]

**ПОСТРОЕНИЕ АБСТРАКТНОЙ
МОДЕЛИ СИЛОВОГО ПОЛЯ ТИПА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО.****Часть 2****Abstract model power field
electromagnetic type building.
Part 2**

Показано, что в классической модели электромагнитного поля направление вектора напряженности поля не совпадает с направлением вектора силы, действующей на элемент проводника с током, индукция зависит от свойств среды, а напряженность – нет, дивергенция поля равна нулю, законом Ампера принято считать формулу, в общем случае несовместимую с его основным результатом, закон электромагнитной индукции является феноменологическим. Построена формальная модель аналога электромагнитного поля, не имеющая указанных особенностей, в частности, формальные аналоги закона электромагнитной индукции являются простым следствием других свойств и соотношений поля, при этом построенная модель удовлетворяет основному требованию Ампера – безусловно-му выполнению третьего закона Ньютона.

Ключевые слова: электромагнитное поле, напряженность, индукция, дивергенция, третий закон Ньютона.

It is shown that in the classical model of the electromagnetic field the direction of the vector field strength does not coincide with the direction of the force acting on an element of the conductor with current induction depends on the properties of the medium, and the tension – no, the divergence of the field is zero, the Ampere law is considered to be a formula in the general case is incompatible with its main result, the law of electromagnetic induction is phenomenological. A model of the formal analogy of the electromagnetic field, which has no specified features, in particular, the formal analogy of the law of electromagnetic induction is a simple consequence of the other properties and relations of the field, while the constructed model satisfies the basic requirement Ampère – unconditional implementation of Newton's third law.

Key words: electromagnetic field, tensions, induction, divergence, Newton's third law.

В первой части настоящей работы [8] выполнено согласование формального аналога магнитостатики с третьим законом Ньютона (ТЗН). Сделанные в этой связи поправки неизбежно повлияли на формальный аналог электродинамики. Учету этого влияния и посвящена предлагаемая вторая часть. Поскольку первая и вторая части составляют

единое целое и для исключения разночтений при ознакомлении с ними, в них использована сквозная нумерация формул, рисунков, разделов и цитируемой литературы.

***Напряженность для формального аналога
электромагнитного поля.***

Подразумеваемые (мнимые) векторы.

Комбинированные векторы. Для представления (11) подобно (1) в виде произведения двух векторов, один из которых напряженность включает в себя $I_1 d\mathbf{l}_1$ и $\mathbf{r}$, а второй – $I_2 d\mathbf{l}_2$, при этом очевидно, что $I_1 d\mathbf{l}_1$ не должен быть связан с $\mathbf{r}$ векторной операцией, поскольку в (11) он связан с $I_2 d\mathbf{l}_2$ операцией скалярного произведения, вводятся в рассмотрение *подразумеваемые (мнимые) векторы*, или *псевдовекторы*, а также *комбинированные векторы* [9].

Определение 1. *Псевдовектор* – это скаляр, в котором содержится информация о *включенном* в него векторе.

Обозначение псевдовектора:

$$\{\mathbf{p}\} = \{\mathbf{i}p_x + \mathbf{j}p_y + \mathbf{k}p_z\}, \quad \{\mathbf{p}\} = p.$$

Определение 2. *Комбинированный вектор* – это произведение вектора и псевдовектора.

Обозначение комбинированного вектора:

$$\mathbf{b}_u^{\{\mathbf{p}\}} = b \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\} \frac{\mathbf{u}}{u}.$$

Нижний индекс содержит информацию о направлении вектора, верхний индекс – о направлении псевдовектора.

С учетом введенных понятий напряженность для формального аналога электромагнитного поля можно представить в виде

$$\left| d\mathbf{H}_r^{\{ld\mathbf{l}\}} \right| = m \frac{ldl}{4\pi r^2},$$

$$d\mathbf{H}_{\mathbf{r}}^{\{Id\mathbf{l}\}} = -m \frac{Idl}{4\pi r^2} \left\{ \frac{Id\mathbf{l}}{Idl} \right\} \frac{\mathbf{r}}{r} = -\frac{m}{4\pi r^3} \{Id\mathbf{l}\} \mathbf{r}. \quad (13)$$

Величина напряженности для формального аналога электромагнитного поля, созданного элементом формального аналога тока $Id\mathbf{l}$, не зависит от угла между радиус-вектором $\mathbf{r}$ и $Id\mathbf{l}$.

Третье и четвертое противоречия классической модели магнитного поля.

В описаниях созданных ранее классической модели магнитного поля силовых полей – гравитационного и электростатического – напряженность определяется как сила, действующая на единичный объект, порождающий поле. Соответственно этому направление вектора напряженности естественным образом совпадает с направлением вектора силы. В классической модели магнитного поля вектор напряженности ортогонален вектору силы. В модели формального аналога электромагнитного поля это противоречие устранено.

У гравитационного и электростатического полей напряженность зависит от свойств среды. При этом в описании электростатического поля индукция от свойств среды не зависит. В классической модели магнитного поля все наоборот. В этом заключается его четвертое противоречие с традиционной моделью поля. Нет причины переносить это противоречие на модель формального аналога электромагнитного поля.

Индукция и потенциал для формального аналога электромагнитного поля. Индукция для формального аналога электромагнитного поля

$$d\mathbf{B}_{\mathbf{r}}^{\{Id\mathbf{l}\}} = -\frac{Idl}{4\pi r^2} \left\{ \frac{Id\mathbf{l}}{Idl} \right\} \frac{\mathbf{r}}{r} = -\frac{1}{4\pi r^3} \{Id\mathbf{l}\} \mathbf{r}. \quad (14)$$

$$\mathbf{H} = m\mathbf{B}.$$

Формальный аналог электромагнитного поля имеет радиальный характер, следовательно, оно является потенциальным. При $dl \rightarrow 0$ эквипотенциальными поверхностями являются сферы. Для такого поля в соответствии с [1]

$$d\mathbf{H}_r^{\{ld\}} = \text{grad}\varphi,$$

где φ – потенциал поля.

Величина $ld\mathbf{l}$ может рассматриваться в качестве магнитного заряда, а поле (13), (14), им созданное, – в качестве магнитного монополя.

Если выбрать систему координат таким образом, чтобы ось абсцисс совпала с радиус-вектором, то

$$d\mathbf{H}_r^{\{ld\}} = -\frac{m}{4\pi r^2} \{ld\mathbf{l}\} \frac{\mathbf{r}}{r} = -\frac{m}{4\pi r^2} \{ld\mathbf{l}\} \mathbf{i} = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \mathbf{i},$$

$$\varphi = \frac{m}{4\pi x} \{ld\mathbf{l}\} + C_\varphi = \frac{m}{4\pi r} \{ld\mathbf{l}\} + C_\varphi.$$

Свойства мнимых и комбинированных векторов и операции с ними

1. $|\mathbf{e}_u^{\{p\}}| = e.$
2. $\mathbf{u}_u^{\{p\}} = \mathbf{u}^{\{p\}} = \mathbf{u} \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\}.$ 11.2.1. $\mathbf{p}_u^{\{p\}} = \{\mathbf{p}\} \frac{\mathbf{u}}{u}.$
3. $e\{\mathbf{p}\} = \{e\mathbf{p}\}.$
4. При взаимодействии мнимых векторов на них распространяются все правила операций с векторами.
5. Мнимый вектор и вектор взаимодействуют между собой как скаляр и вектор.

6. При взаимодействии комбинированных векторов между собой могут использоваться двойные записи операций: « $\{\cdot\} \cdot$ », « $\{\cdot\} \times$ », « $\{\times\} \cdot$ », « $\{\times\} \times$ », « $\{+\} +$ », « $\{\times\} +$ », « $\{+\} \times$ », « $\{\cdot\} +$ », « $\{+\} \cdot$ ». Операция в скобках связывает мнимые векторы. Вторая операция связывает векторы. При перемножении псевдовектора и комбинированного вектора нет необходимости размещения знака произведения в скобки. Очевидно, что знак произведения « $\cdot$ » или « $\times$ » в этом случае распространяется на псевдовекторные составляющие.
7. При необходимости скобки раскрываются применением двойных скобок, например, $\{\{e\{\mathbf{p}\}\}\} = e\mathbf{p}$
8. В присутствии вектора $\mathbf{u}$ скобка раскрываться не может. Исключение составляет случай, когда выражение, стоящее в скобке, является скаляром, например, в результате скалярного произведения векторов. Например,
9.
$$\mathbf{p}_u^{(p)}\{\cdot\} + \mathbf{q}_v^{(q)} = \{\mathbf{p}\} \frac{\mathbf{u}}{u} \{\cdot\} + \{\mathbf{q}\} \frac{\mathbf{v}}{v} = \{\mathbf{p} \cdot \mathbf{q}\} \left(\frac{\mathbf{u}}{u} + \frac{\mathbf{v}}{v} \right) = pq \cos(p, q) \left(\frac{\mathbf{u}}{u} + \frac{\mathbf{v}}{v} \right)$$
10. В отсутствии вектора $\mathbf{u}$ скобка не раскрывается, если другая часть равенства является скалярной величиной.
11.
$$\mathbf{e}_u^{(p)} + \mathbf{b}_v^{(p)} = e \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\} \frac{\mathbf{u}}{u} + b \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\} \frac{\mathbf{v}}{v} = \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\} \left(e \frac{\mathbf{u}}{u} + b \frac{\mathbf{v}}{v} \right) = \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\} \mathbf{c} = \mathbf{c}^{(p)}.$$
12.
$$\mathbf{e}_u^{(p)} + \mathbf{b}_u^{(q)} = e \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\} \frac{\mathbf{u}}{u} + b \left\{ \frac{\mathbf{q}}{q} \right\} \frac{\mathbf{u}}{u} = \frac{\mathbf{u}}{u} \left\{ e \frac{\mathbf{p}}{p} + b \frac{\mathbf{q}}{q} \right\} = \frac{\mathbf{u}}{u} \{\mathbf{c}\} = c \left\{ \frac{\mathbf{c}}{c} \right\} \frac{\mathbf{u}}{u} = \mathbf{c}_u^{(c)}.$$
- 12.1.
$$\mathbf{e}^{(p)} + \mathbf{e}^{(q)} = \mathbf{e} \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\} + \mathbf{e} \left\{ \frac{\mathbf{q}}{q} \right\} = \mathbf{e} \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} + \frac{\mathbf{q}}{q} \right\} = \mathbf{e} \{\mathbf{r}\} = \mathbf{e}^{(r)}.$$
- 12.2.
$$\{\mathbf{p}\} + \{\mathbf{q}\} = \{\mathbf{q}\} + \{\mathbf{p}\} = \{\mathbf{p} + \mathbf{q}\}.$$

14. $\mathbf{e}_u^{\{p\}} \cdot b^{\{q\}} = e \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\} \frac{u}{u} \cdot b \left\{ \frac{\mathbf{q}}{q} \right\} = eb \left\{ \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{q}}{p \cdot q} \right\} \frac{u}{u} = eb \left\{ \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{q}}{p \cdot q} \right\} \frac{u}{u} = c \frac{u}{u} = \mathbf{c}_u.$
- 14.1. $\{\mathbf{p}\} \cdot \{\mathbf{q}\} = \{\mathbf{p} \cdot \mathbf{q}\} = \mathbf{p} \cdot \mathbf{q}$
15. $\mathbf{e}_u^{\{p\}} \times b^{\{q\}} = e \left\{ \frac{\mathbf{p}}{p} \right\} \frac{u}{u} \times b \left\{ \frac{\mathbf{q}}{q} \right\} = eb \left\{ \frac{\mathbf{p} \times \mathbf{q}}{p \cdot q} \right\} \frac{u}{u} = \mathbf{c}_u^{\{r\}}.$
- 15.1. $\{\mathbf{p}\} \times \{\mathbf{q}\} = \{\mathbf{p} \times \mathbf{q}\}.$ 11.15.2. $\mathbf{e}_u^{\{p\}} \times b^{\{p\}} = 0.$
16. $\{\nabla\} e = \left\{ \mathbf{i} \frac{\partial e}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial e}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial e}{\partial z} \right\}.$
17. $\{\nabla\} \cdot \{\mathbf{p}\} = \left\{ \frac{\partial p_x}{\partial x} + \frac{\partial p_y}{\partial y} + \frac{\partial p_z}{\partial z} \right\} = \frac{\partial p_x}{\partial x} + \frac{\partial p_y}{\partial y} + \frac{\partial p_z}{\partial z} = \nabla \cdot \mathbf{p}.$
18. $\{\nabla\} \times \{\mathbf{p}\} = \{\nabla \times \mathbf{p}\}.$

Связь между величинами формального аналога электромагнитного поля

$$d\mathbf{F}_{12} = d\mathbf{H}_r^{\{l_1 d\mathbf{l}_1\}} \cdot \{l_2 d\mathbf{l}_2\} = -\frac{m}{4\pi r^3} \{l_1 d\mathbf{l}_1\} \mathbf{r} \cdot \{l_2 d\mathbf{l}_2\} = -m \frac{\{l_1 d\mathbf{l}_1 \cdot l_2 d\mathbf{l}_2\}}{4\pi r^3} \mathbf{r} = -m \frac{l_1 d\mathbf{l}_1 \cdot l_2 d\mathbf{l}_2}{4\pi r^3} \mathbf{r}_{12}, \quad (15)$$

что совпадает с (11). Полученное выражение существенно отличается от (1), которое принято называть законом Ампера.

$$\begin{aligned} d\mathbf{M}_{12} &= \left\{ \left\{ d\mathbf{H}_r^{\{l_1 d\mathbf{l}_1\}} \right\} \{\times\} \cdot \{l_2 d\mathbf{l}_2\} \mathbf{r} \right\} = \left\{ \left\{ -\frac{m}{4\pi r^3} \{l_1 d\mathbf{l}_1\} \mathbf{r} \{\times\} \cdot \{l_2 d\mathbf{l}_2\} \mathbf{r} \right\} \right\} = \\ &= -\left\{ \left\{ \frac{m \{l_1 d\mathbf{l}_1 \times l_2 d\mathbf{l}_2\}}{4\pi r^3} (\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) \right\} \right\} = -\frac{m l_1 l_2}{4\pi r} [d\mathbf{l}_1, d\mathbf{l}_2], \end{aligned} \quad (16)$$

что совпадает с (12)

$$W = \varphi \cdot \{l_2 d\mathbf{l}_2\} = \frac{m}{4\pi r} \{l_1 d\mathbf{l}_1\} \cdot \{l_2 d\mathbf{l}_2\} + C = m \frac{l_1 d\mathbf{l}_1 \cdot l_2 d\mathbf{l}_2}{4\pi r} + C,$$

что совпадает с (10).

Теорема Гаусса для формального аналога электромагнитного поля. Поскольку формальный аналог электромагнитного поля имеет радиальный характер, для него выполняется теорема Гаусса

$$\int_S \mathbf{B}_r^{\{\sum I \Delta l + \sum I_{cm} \Delta l\}} \cdot d\mathbf{s} = \{\sum I \Delta l + \sum I_{cm} \Delta l\},$$

где S – площадь замкнутой поверхности, ограничивающей некоторый объем,

I_{cm} – формальный аналог тока смещения.

В дифференциальной форме

$$\operatorname{div} \mathbf{B}_r^{\left\{ \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right\}} = \nabla \cdot \mathbf{B}_r^{\left\{ \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right\}} = \left\{ \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right\}, \quad (17)$$

где $\mathbf{j}$ – формальный аналог плотности тока,

$\partial \mathbf{D} / \partial t$ – формальный аналог плотности тока смещения,

$\mathbf{D}$ – формальный аналог электрического смещения или электрической индукции.

Скобки могут быть раскрыты двойными скобками (11.7)

$$\left\{ \left\{ \operatorname{div} \mathbf{B}_r^{\left\{ \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right\}} \right\} \right\} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}.$$

Еще одним противоречием классической модели магнитного поля является равенство нулю его дивергенции.

Деление векторов.

Для целей дальнейшего рассмотрения требуется определить операции деления вектора на вектор.

1. Скалярное деление двух векторов

Определение. Частное $\mathbf{e}/\mathbf{b}$ от скалярного деления вектора $\mathbf{e}$ на вектор $\mathbf{b}$ есть скаляр

$$p = \frac{\mathbf{e}}{\mathbf{b}} = \mathbf{e} \cdot \frac{1}{\mathbf{b}} = \mathbf{e} \cdot \frac{\mathbf{b}}{\mathbf{b} \cdot \mathbf{b}} = \frac{1}{b^2} (\mathbf{e} \cdot \mathbf{b}) = \frac{c}{b^2} = \frac{e}{b} \cos \theta, \quad (18)$$

где θ – угол между векторами $\mathbf{e}$ и $\mathbf{b}$. При этом

$$\frac{\mathbf{e} \cdot \mathbf{b}}{\mathbf{b} \cdot \mathbf{e}} = \cos^2 \theta.$$

2. Векторное деление двух векторов

Определение. Частное $\mathbf{e} \div \mathbf{b}$ от векторного деления вектора $\mathbf{e}$ на вектор $\mathbf{b}$ есть вектор

$$\mathbf{q} = \mathbf{e} \div \mathbf{b} = \mathbf{e} \times \frac{1}{\mathbf{b}} = \mathbf{e} \times \frac{\mathbf{b}}{\mathbf{b} \cdot \mathbf{b}} = \frac{1}{b^2} (\mathbf{e} \times \mathbf{b}) = \frac{\mathbf{d}}{b^2} = \frac{e}{b} \frac{\mathbf{d}}{d} \sin \theta. \quad (19)$$

При этом

$$(\mathbf{e} \div \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{b} \div \mathbf{e}) = -\sin^2 \theta, \quad \frac{\mathbf{e} \cdot \mathbf{b}}{\mathbf{b} \cdot \mathbf{e}} - (\mathbf{e} \div \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{b} \div \mathbf{e}) = 1, \quad p^2 + q^2 = \frac{e^2}{b^2}.$$

3. Теоремы о полном делении векторов

3.1. Если известны частные от скалярного p и векторного $\mathbf{q}$ деления двух векторов $\mathbf{e}$ и $\mathbf{b}$, а также делитель $\mathbf{b}$, то делимое определяется, как

$$\mathbf{e} = \mathbf{b}p + \mathbf{b} \times \mathbf{q}.$$

Доказательство:

$$\mathbf{b}p + \mathbf{b} \times \mathbf{q} = \frac{1}{b^2} [\mathbf{b}(\mathbf{e} \cdot \mathbf{b}) + \mathbf{b} \times (\mathbf{e} \times \mathbf{b})] = \frac{1}{b^2} [\mathbf{b}(\mathbf{e} \cdot \mathbf{b}) + \mathbf{e}(\mathbf{b} \cdot \mathbf{b}) - \mathbf{b}(\mathbf{b} \cdot \mathbf{e})] = \mathbf{e}.$$

3.2. Если известны частные от скалярного p и векторного $\mathbf{q}$ деления двух векторов $\mathbf{e}$ и $\mathbf{b}$, а также делимое $\mathbf{e}$, то делитель определяется, как

$$\mathbf{b} = \frac{p\mathbf{e} + \mathbf{q} \times \mathbf{e}}{p^2 + q^2}.$$

Доказательство:

$$\frac{p\mathbf{e} + \mathbf{q} \times \mathbf{e}}{p^2 + \mathbf{q}^2} = \frac{1}{b^2} \frac{b^2}{e^2} [(\mathbf{e} \cdot \mathbf{b})\mathbf{e} + (\mathbf{e} \times \mathbf{b}) \times \mathbf{e}] = \frac{1}{e^2} [(\mathbf{e} \cdot \mathbf{b})\mathbf{e} + \mathbf{b}(\mathbf{e} \cdot \mathbf{e}) - \mathbf{e}(\mathbf{e} \cdot \mathbf{b})] = \mathbf{b}.$$

Формальный аналог индуцированного

электрического поля. Формальный аналог напряженности электрического поля – это сила, действующая на единичный формальный аналог электрического заряда q . Пусть последний движется со скоростью $\mathbf{v}$. Могут быть рассмотрены следующие частные случаи.

4.1. Продольное движение (рис. 2)

В соответствии с (15) формальный аналог напряженности электрического поля

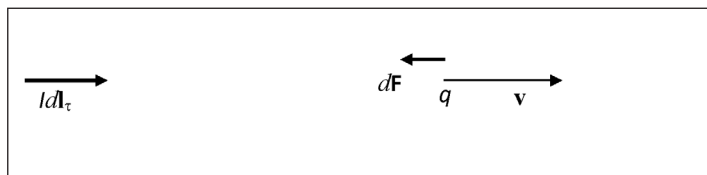


Рис. 2.

Продольное движение.

$$\begin{aligned} d\mathbf{E}_\tau &= \frac{d\mathbf{F}}{dq} = \frac{1}{dq} d\mathbf{H}_r^{\{ldl_\tau\}} \cdot \{l_q d\mathbf{l}_q\} = \frac{1}{dq} d\mathbf{H}_r^{\{ldl_\tau\}} \cdot \left\{ \frac{dq}{dt} d\mathbf{l}_q \right\} = d\mathbf{H}_r^{\{ldl_\tau\}} \cdot \left\{ \frac{d\mathbf{l}_q}{dt} \right\} = d\mathbf{H}_r^{\{ldl_\tau\}} \cdot \{\mathbf{v}\} = \\ &= -\frac{m}{4\pi r^3} \{ldl_\tau\} \mathbf{r} \cdot \{\mathbf{v}\} = -\frac{m}{4\pi r^3} \{ldl_\tau \cdot \mathbf{v}\} \mathbf{r} = -\frac{m l d l_\tau}{4\pi r^3} v \mathbf{r} = -\frac{m l d l_\tau}{4\pi r^2} v \frac{ldl_\tau}{ldl_\tau} = dH_\tau v \frac{ldl_\tau}{ldl_\tau}. \end{aligned} \quad (20)$$

В скалярной форме

$$dE_\tau = dH_\tau v.$$

Формальный аналог ЭДС

$$d\mathcal{E} = dE_{\tau} dl = dH_{\tau} v dl.$$

4.2. Поперечное движение (рис. 3)



Рис. 3. Поперечное движение.

В соответствии с (16)

$$d\mathbf{M} = \left\{ \left\{ d\mathbf{H}_{\mathbf{r}}^{\{l dl_n\}} \{ \times \} \cdot \{ l_q d\mathbf{l}_q \} \mathbf{r} \right\} \right\} = \left\{ \left\{ d\mathbf{H}_{\mathbf{r}}^{\{l dl_n\}} \{ \times \} \cdot \{ dq \mathbf{v} \} \mathbf{r} \right\} \right\}.$$

С другой стороны,

$$d\mathbf{M} = [\mathbf{r}, d\mathbf{F}].$$

В соответствии с (19)

$$\begin{aligned} d\mathbf{F}_n &= d\mathbf{M} \div \mathbf{r} = \left\{ \left\{ d\mathbf{H}_{\mathbf{r}}^{\{l dl_n\}} \{ \times \} \cdot \{ dq \mathbf{v} \} \mathbf{r} \right\} \right\} \div \mathbf{r} = \left\{ \left\{ d\mathbf{H}_{\mathbf{r}}^{\{l dl_n\}} \{ \times \} \cdot \{ dq \mathbf{v} \} \mathbf{r} \right\} \right\} \times \frac{\mathbf{r}}{r^2}, \\ d\mathbf{E}_n &= \frac{d\mathbf{F}_n}{dq} = \frac{1}{dq} d\mathbf{M} \div \mathbf{r} = \left\{ \left\{ d\mathbf{H}_{\mathbf{r}}^{\{l dl_n\}} \{ \times \} \cdot \{ \mathbf{v} \} \mathbf{r} \right\} \right\} \div \mathbf{r} = \left\{ \left\{ d\mathbf{H}_{\mathbf{r}}^{\{l dl_n\}} \{ \times \} \cdot \{ \mathbf{v} \} \mathbf{r} \right\} \right\} \times \frac{\mathbf{r}}{r^2} = \\ &= -\frac{m}{4\pi r^3} \left\{ \left\{ \{ l dl_n \} \mathbf{r} \{ \times \} \cdot \{ \mathbf{v} \} \mathbf{r} \right\} \right\} \times \frac{\mathbf{r}}{r^2} = -\frac{m}{4\pi r^3} \left\{ \left\{ \{ l dl_n \times \mathbf{v} \} \mathbf{r} \cdot \mathbf{r} \right\} \right\} \times \frac{\mathbf{r}}{r^2} = -\frac{m}{4\pi r^3} (l dl_n \times \mathbf{v}) \times \mathbf{r} = \\ &= -\frac{m}{4\pi r^2} v (-l dl_n) = \frac{m}{4\pi r^2} v l dl_n = -dH_n v \frac{l dl_n}{l dl_n}. \end{aligned} \quad (21)$$

В скалярной форме

$$dE_n = -dH_n v.$$

Формальный аналог ЭДС

$$d\mathcal{E} = dE_n dl = -dH_n v dl.$$

Изменяющееся поле.

Для точки, расположенной в конце радиус-вектора $\mathbf{r}$, изменение величины $Id\mathbf{l}$ равносильно перемещению вектора $Id\mathbf{l}$ вдоль радиус-вектора $\mathbf{r}$ с некоторой скоростью. Это дает возможность использовать результаты предыдущего раздела.

1. Продольное (относительно $Id\mathbf{l}$) поле

На рис. 2 заряд удаляется от источника поля, поэтому оно уменьшается. Если заряд неподвижен, то для уменьшения поля источник должен двигаться со скоростью, имеющей противоположный знак. С учетом этого и в соответствии с (20)

$$d\mathbf{E}_\tau = -dH_\tau v \frac{Id\mathbf{l}_\tau}{Idl_\tau} = -dH_\tau \frac{dr}{dt} \frac{Id\mathbf{l}_\tau}{Idl_\tau}, \quad \frac{d\mathbf{E}_\tau}{dr} = -\frac{dH_\tau}{dt} \frac{Id\mathbf{l}_\tau}{Idl_\tau}, \quad \frac{d\mathbf{E}_\tau}{dr} = -\frac{dH_\tau}{dt}. \quad (22)$$

2. Поперечное (относительно $Id\mathbf{l}$) поле

В соответствии с (21)

$$\frac{d\mathbf{E}_n}{dr} = \frac{dH_n}{dt} \frac{Id\mathbf{l}_n}{Idl_n}, \quad \frac{d\mathbf{E}_n}{dr} = \frac{dH_n}{dt}. \quad (23)$$

В произвольной точке поле можно разложить на продольную и поперечную составляющие

$$\frac{d\mathbf{E}}{dr} = \frac{d\mathbf{E}_\tau}{dr} + \frac{d\mathbf{E}_n}{dr} = \frac{dH}{dt} \left(\frac{Id\mathbf{l}_n}{Idl_n} - \frac{Id\mathbf{l}_\tau}{Idl_\tau} \right) = \frac{dH}{dt} \left(\frac{Id\mathbf{l}_n - Id\mathbf{l}_\tau}{Idl} \right) = \frac{dH}{dt} \frac{Id\mathbf{l}^*}{Idl}. \quad (24)$$

Здесь $ld\mathbf{l}^*$ – вектор сопряженный вектору $ld\mathbf{l}$ [10] (см. рис. 4).



Рис. 4. Сопряженные векторы.

Выражения (20)–(24) являются формальными аналогами закона электромагнитной индукции, которые в отличие от классической феноменологической модели электромагнитного поля являются простым следствием других свойств и соотношений поля.

Производные вектора по другому вектору.

Производную формально можно рассматривать как деление дифференциалов. Подобно тому как деление вектора на другой вектор может быть скалярным (18) или векторным (19), производная вектора по другому вектору тоже может быть скалярной или векторной. Формула для векторной производной представлена в [11]. Скалярную производную можно представить следующим образом.

$$\begin{aligned}
 d\mathbf{a} \cdot \frac{1}{d\mathbf{b}} &= d(a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k}) \cdot \frac{1}{d(b_x \mathbf{i} + b_y \mathbf{j} + b_z \mathbf{k})} = \\
 (da_x \mathbf{i} + da_y \mathbf{j} + da_z \mathbf{k}) \cdot \frac{1}{db_x \mathbf{i} + db_y \mathbf{j} + db_z \mathbf{k}} &= da_x \mathbf{i} \cdot \frac{1}{db_x \mathbf{i} + db_y \mathbf{j} + db_z \mathbf{k}} \cdot \frac{db_x \mathbf{i}}{db_x \mathbf{i}} + \\
 da_y \mathbf{j} \cdot \frac{1}{db_x \mathbf{i} + db_y \mathbf{j} + db_z \mathbf{k}} \cdot \frac{db_y \mathbf{j}}{db_y \mathbf{j}} &+ da_z \mathbf{k} \cdot \frac{1}{db_x \mathbf{i} + db_y \mathbf{j} + db_z \mathbf{k}} \cdot \frac{db_z \mathbf{k}}{db_z \mathbf{k}} = \\
 \frac{da_x db_x}{(db_x)^2} + \frac{da_y db_y}{(db_y)^2} + \frac{da_z db_z}{(db_z)^2} &= \frac{da_x}{db_x} + \frac{da_y}{db_y} + \frac{da_z}{db_z}.
 \end{aligned}$$

Представляет интерес частный случай, когда берется скалярная производная по радиус-вектору $\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$.

$$d\mathbf{a} \cdot \frac{1}{d\mathbf{r}} = \frac{da_x}{dx} + \frac{da_y}{dy} + \frac{da_z}{dz} = \text{div}\mathbf{a} = \nabla \cdot \mathbf{a}.$$

Отсюда следует, что

$$\frac{d}{d\mathbf{r}} = \nabla. \quad (25)$$

***Формальный аналог полной системы уравнений
Максвелла в дифференциальной форме.***

Очевидным образом формальный аналог третьего уравнения Максвелла математически изоморфен оригиналу [12].

$$\text{div}\mathbf{D} = \frac{dq}{dV}.$$

В качестве четвертого уравнения следует рассматривать полученное выше выражение теоремы Гаусса для формального аналога электромагнитного поля

Аналогом первого уравнения можно считать (24).

Для получения аналога второго уравнения в (17) можно использовать (25)

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{B}_r^{\left\{ \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right\}} &= d\mathbf{B}_r^{\left\{ \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right\}} \cdot \frac{1}{d\mathbf{r}} = \left\{ \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right\}, \\ \frac{dB}{dr} &= j + \frac{dD}{dt}. \end{aligned} \quad (26)$$

Таким образом, аналог полной системы уравнений Максвелла в дифференциальной форме имеет вид

$$\begin{aligned} \text{I. } \frac{d\mathbf{E}}{dr} &= \frac{dH}{dt} \frac{d\mathbf{l}^*}{dl}, \\ \text{II. } d\mathbf{B}_r^{\left\{ \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right\}} \cdot \frac{1}{d\mathbf{r}} &= \left\{ \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{III. } \operatorname{div} \mathbf{D} &= \frac{dq}{dV}, \\ \text{IV. } \left\{ \left\{ \operatorname{div} \mathbf{B}_r \right\}^{\left\{ \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right\}} \right\} &= \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}. \end{aligned}$$

Здесь $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, где ϵ – формальный аналог диэлектрической проницаемости.

Формальный аналог электромагнитных волн.

Совместное решение (23) (для поперечного поля) и (26) при условии $j = 0$ дает:

$$\frac{d^2 E_n}{dr dt} = m \frac{d^2 B_n}{dt^2}, \quad \frac{d^2 B_n}{dr^2} = e \frac{d^2 E_n}{dr dt}, \quad \frac{d^2 B_n}{dr^2} = em \frac{d^2 B_n}{dt^2}.$$

Последнее – классическое волновое уравнение [13]. Его решение представляет собой монохроматическую волну:

$$B_n = B_{n0} e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \delta)},$$

где ω – циклическая частота,
 $\mathbf{k}$ – волновое число,
 δ – начальная фаза. Скорость волны

$$c = \frac{1}{\sqrt{em}}.$$

Аналогично находится формальный аналог электрической (поперечной) составляющей волны

$$E_n = E_{n0} e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \delta)}.$$

Очевидно, что от продольной составляющей аналога электрического поля (22) волна не возникает.

Таким образом, классическая модель электромагнитного поля имеет следующие особенности:

- допускает нарушение ТЗН;
 - исключает взаимодействие соосных элементов проводников с токами;
 - не предусматривает существование моментов сил, действующих на элементы проводников;
 - направление вектора напряженности поля не совпадает с направлением вектора силы, действующей на элемент проводника с током;
 - индукция зависит от свойств среды, а напряженность – нет;
 - дивергенция поля равна нулю;
 - законом Ампера принято считать формулу в общем случае несовместимую с его основным результатом;
 - закон электромагнитной индукции является феноменологическим.

Указанные особенности, по-видимому, в меньшей степени обусловлены субъективными факторами и в значительной степени являются следствием ограниченности арсенала средств векторной алгебры. Не вводя в рассмотрение мнимые и комбинированные векторы, и имея возможность использовать только операции произведения векторов, невозможно выражение (1) сконструировать как-то иначе, так, в частности, чтобы не нарушался ТЗН.

Построенная модель формального аналога электромагнитного поля этих особенностей не имеет, в частности, формальные аналоги закона электромагнитной индукции являются простым следствием других свойств и соотношений поля.

Построенная модель удовлетворяет основному требованию Ампера для магнитостатики – безусловному выполнению ТЗН на микроуровне.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ
СПИСОК**

8. Попов И. П. Построение абстрактной модели силового поля типа электромагнитного. Ч. 1 // Наука. Инновации. Технологии: научный журнал Северо-Кавказского федерального университета. 2015. №2. С. 41–54.
9. Попов И. П. Поверхностные градиент, дивергенция и ротор // Вестник Псковского гос. ун-та. Естественные и физико-математические науки. 2014. Вып. 5. С. 159–172.
10. Попов И. П. О некоторых операциях над векторами // Вестник Волгоградского гос. ун-та. Серия 1: Математика. Физика. 2014. №5 (24). С. 55–61.
11. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука, 1965. 780 с.
12. Максвелл Д. К. Трактат об электричестве и магнетизме. М.: Наука, 1989. 415 с.
13. Мешков И. Н., Чириков Б. В. Электромагнитное поле. Ч. 1. Новосибирск: Наука, 1987. 272 с.

УДК 622.
276.66.002.34

Верисокин А. Е. [Verisokin A. E.],
Зиновьева Л. М. [L. M. Zinovieva]

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОМЫВКИ И ОСВОЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН ПОСЛЕ СЕЛЕКТИВНОГО ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

**Features of technology of washing
and development of horizontal wells
after selective hydraulic fracturing of layer
on fields of Western Siberia**

В статье рассмотрены некоторые особенности технологии промывки и освоения после селективного гидроразрыва пласта на месторождениях Западной Сибири. Для большей эффективности операции гидроразрыва необходимо проведение многостадийного ГРП в горизонтальных скважинах. В результате анализа сделаны выводы о том, что включает в себя негласно принятая процедура ввода новых скважин в эксплуатацию в Западной Сибири. В статье отражены преимущества проведения многостадийного гидроразрыва над обычным ГРП. Описана технология проведения селективного гидроразрыва пласта. В таблице представлено необходимое оборудование, обязательное для проведения операции с указанием минимально допустимых характеристик. Представлены преимущества применения новой технологии во временном интервале. Использование описываемой технологии промывки и освоения горизонтальных скважин после селективного ГРП не только значительно сокращает продолжительность цикла ввода новых скважин в эксплуатацию и цикла гидроразрыва, но и уменьшает риски аварийности на скважинах, а также снижает загрязнение призабойной зоны пласта.

Ключевые слова: селективный гидроразрыв пласта, горизонтальная скважина, дебит, низкопроницаемые коллекторы, трещина, гибкие трубы.

Some features of washing technology and development after selective fracturing in Western Siberia. For greater efficiency fracturing operation necessary to carry out multi-stage hydraulic fracturing in horizontal wells. The analysis concluded that that involves tacitly adopted by the procedure of entering into operation of new wells in Western Siberia. The article describes the benefits of the multi-stage fracturing of conventional hydraulic fracturing. The technology of selective fracturing. The table shows the necessary equipment required for the operation with an indication of the minimum acceptable performance. Presents the advantages of the new technology in the time slot. Using the technology described washing and development of horizontal wells after fracturing selective not only significantly reduces the cycle time putting new wells into operation and the cycle of fracturing, but also reduces the risk of accidents in the wells and also reduces contamination layer zones.

Key words: selective hydraulic fracturing of layer, horizontal well, output, low-permeability collectors, crack, flexible pipes.

Опыт разработки месторождений углеводородов, накопленный в последние десятилетия, показал высокую эффективность гидравлического разрыва пласта (ГРП), позволяющего ввести в эксплуатацию нерентабельные ранее запасы и увеличить не только темпы выработки, но и конечную нефтеотдачу низкопроницаемых пластов. В настоящее время гидравлический разрыв пласта (ГРП) является самым востребованным и широко применяемым методом интенсификации притока нефти и газа на таких объектах. Следующим шагом явилось проведение многостадийного ГРП в горизонтальных скважинах [1].

В зависимости от геологических условий, технического состояния ствола скважины практически на всех месторождениях Западной Сибири существует возможность проведения различных видов ГРП. На ряде месторождений с низкопроницаемыми коллекторами ГРП проведены практически во всех действующих скважинах. В этом случае гидроразрыв – не только средство увеличения дебита отдельно взятых скважин, но и элемент системы разработки, обуславливающий изменение характера течения в пласте.

По количеству закачанного проппанта и жидкости разрыва различают локальный, глубокопроникающий и массивированный разрывы пласта. По количеству вскрываемых пластов в одной скважине – одноэтапный, поинтервальный, селективный [2].

Селективный ГРП позволяет произвести закачку расчетных объемов жидкости разрыва и проппанта в пласт на каждом интервале горизонтального ствола, охватывая всю продуктивную толщину пласта, что позволяет существенно повысить дебит скважины.

В 2011 г. специалисты в ходе проекта по проведению многостадийных ГРП на объектах компании ЛУКОЙЛ в Западной Сибири провели 68 скважиноопераций. Использование данной технологии позволило увеличить на 40 % средний дебит горизонтальных скважин по сравнению с аналогичными горизонтальными скважинами, законченными по стандартной технологии.

В 2012 г. впервые в России был проведен 8-интервальный ГРП с использованием системы ZoneSelect™.

В нефтегазодобыче технологии селективной обработки пласта считаются наиболее современными и эффективными. В отличие от традиционных ГРП, где обработка пласта осуществляется по принципу «закачка в один пласт» (независимо от его приемистости по длине открытого ствола или толщины продуктивного пласта), селективный ГРП позволяет произвести закачку расчетных объемов жидкости разрыва и проппанта в пласт поинтервально, охватывая всю продуктивную площадь пласта, что позволяет существенно повысить дебит скважины.

Селективный гидравлический разрыв пласта возможно проводить на каждом интервале горизонтального ствола. Данная технология находит широкое применение на месторождениях Западной Сибири.

Для проведения селективного ГРП в открытый горизонтальный ствол спускают хвостовик, в составе которого устанавливаются пакеры и циркуляционные клапаны (рис. 1) в количестве, соответствующем необходимому количеству интервалов (теоретическое максимальное количество интервалов 25).

Хвостовик подвешивается на гидравлической подвеске, шары (рис. 2) используются во время поинтервальной закачки проппанта для открытия портов и отсеечения нижележащего интервала.

Активация системы производится гидравлическим способом (рис. 3). В процессе ГРП шар, предназначенный для нижнего интервала, имеет минимальный размер и беспрепятственно прокачивается через вышележащие посадочные седла. Каждый последующий шар имеет размер больше предыдущего и ориентирован на вышележащий интервал [2].

После проведения ГРП необходимо осуществить промывку скважины, фрезерование шаров и посадочных седел и выполнить освоение.

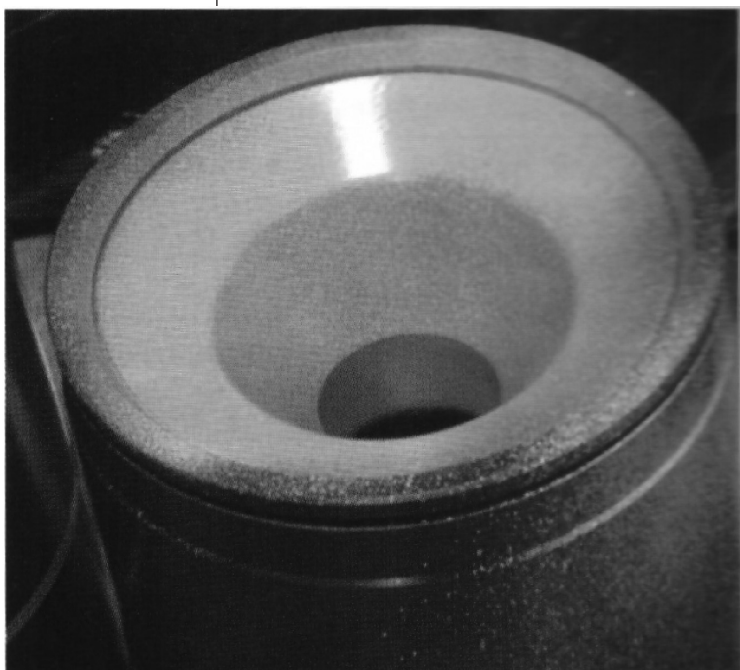


Рис. 1. Циркуляционный клапан.

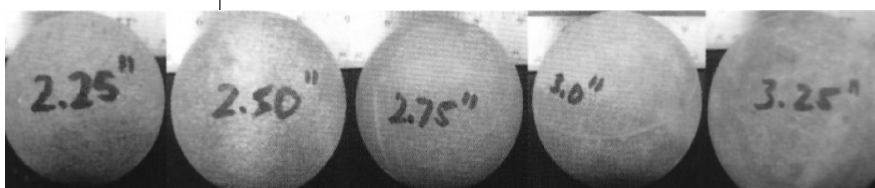


Рис. 2. Циркуляционные шары, диаметрами 57–83 мм.

Для успешного проведения данного вида ремонта необходимо использовать оборудование, соответствующее требованиям (таблица 1).

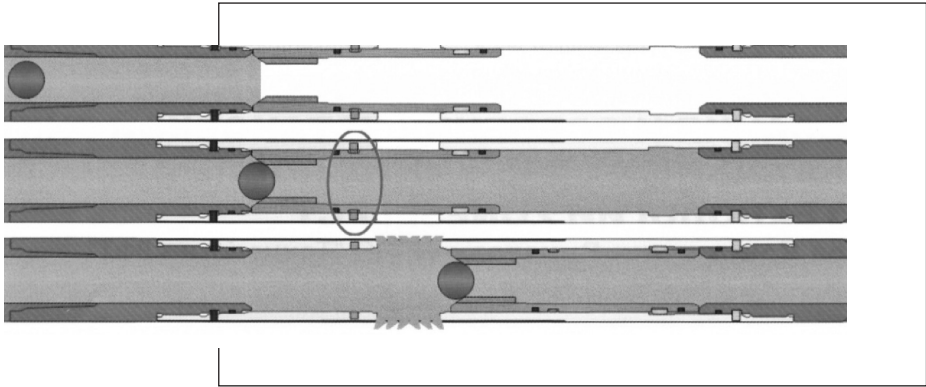


Рис. 3. Открытие циркуляционного клапана, герметизация ниже-лежащего интервала.

Таблица 1. Необходимое оборудование для проведения операции с указанием минимально допустимых характеристик

№	Наименование	Спецификация	Кол-во
Насосное оборудование			
1	Насосная установка с комплектом линий высокого давления	$P \geq 68 \text{ МПа}$ $Q_{\text{макс}} \geq 0,400 \text{ м}^3/\text{мин}$	1

№	Наименование	Спецификация	Кол-во
---	--------------	--------------	--------

Азотное оборудование

1	Азотный конвертер с комплектами линий высокого давления	$P \geq 68$ МПа, $Q_{\text{макс}} \geq 20$ ст. м ³ /мин, емкость 11 тонн	1
2	Емкость для транспортировки жидкого азота	$V \geq 12$ тонн	1

Емкостное оборудование

1	Емкость циркуляционная	$V_{\text{макс}} \geq 40$ м ³ , 4 секционная	1
2	Штуцерный манифольд	$P = 68$ МПа	1

Оборудование ГНКТ

1	Колонна ГНКТ	$P = 69$ МПа $D_{\text{нар}} 38,1$; L4500 м	1
2	Установка ГНКТ		1
3	КНК (фрезерование)	71 мм	1
4	КНК (промывка)	38,1 мм/54 мм	1

Устьевое оборудование

1	Инжекторная головка с направляющей аркой	Экв. макс. усилие на подъем 20 тонн, Экв. макс. усилие на спуск 10 тонн	1
---	--	--	---

№	Наименование	Спецификация	Кол-во
2	Герметизатор кольцевой универсальный	$P = 68 \text{ МПа}$, $D_{вн} = 63,5 \text{ мм}$	1
3	Лубрикатор	$P \geq 68,9 \text{ МПа}$, $D_{вн} = 77,7 \text{ мм}$; Соединение верх: резьбовое, штифт; Соединение низ: резьбовое, втулка $H = 2438 \text{ мм}$	3
4	Гидравлический превентор противовыбросный четырёхплащечный	$P \geq 68 \text{ МПа}$	1
5	Крестовина циркуляционная устьевая с 2 задвижками и линиями высокого давления к штуцерному манифольду	$P \geq 68 \text{ МПа}$	1
6	Гидравлический превентор противовыбросный комбинированный	$P \geq 68 \text{ МПа}$	1

Операция проводится по плану работ и регламенту по работе с ГНКТ [3].

К критериям качества выполненной работы по промывке и освоению с использованием ГНКТ не относятся ни временные затраты, ни объем затраченных материалов (хим. реагентов, жидкого азота). Критерием качества является достигнутая после ГРП отметка забоя, подтвержденная спуском ГНКТ после технического отстоя [3].

Суть применения ГНКТ в данной технологии заключается в поэтапном удалении проппанта из скважины, фрезерованию циркуляционных клапанов с посадочными шарами.

Нормализация забоя после ГРП осуществляется гибкими трубами диаметром 38,1 /44,5 мм, низ колонны оснащен гидромониторной насадкой 38,1/54 мм. В зависимости от минимального проходного диаметра в скважине, расчетных нагрузок на гибкие трубы с максимальными рабочими давлениями выбирается оптимальный вариант гибких труб. Промывка производится после каждого «расфрезерованного» интервала.

После нормализации текущего забоя необходимо демонтировать гидромониторную насадку. В зависимости от проходного диаметра и инклинометрии скважины выбрать оптимальную скорость спуска гибких труб с данной компоновкой. При высокой скорости спуска существует высокая вероятность затяжек гибких труб при проверке веса колонны и прихвата компоновки в целом. Причинами могут являться:

- посторонний предмет в скважине;
- некачественная работа бригады КРС при спуске колонны НКТ, «посадке» пакера / стингера, что приводит к замятию НКТ;
- резкое уменьшение проходного диаметра в конструкции скважины.

При фрезеровании необходимо остановить ГТ за несколько метров до циркуляционного клапана, запустить насосную установку, обеспечить подачу расхода, при котором установится рабочее давление фрезы и приложить нагрузку на долото путем отслеживания дифференци-

ального давления. В качестве показателя двигателя следует использовать дифференциальное давление, а не значения ННД (нагрузки на долото) на поверхности, т. к. оно не подходит для данной цели.

Конечным этапом работы является вызов притока. Смысл освоения скважины с помощью ГНКТ заключается в уменьшении забойного давления путем снижении плотности и последующим вытеснением скважинной жидкости газообразным азотом.

В случае отсутствия освоения азотом после нормализации забоя существует повышенный риск выноса незакрепленного после проведения ГРП проппанта, что может привести к изменению текущего забоя, определенного ГНКТ.

Технологический процесс должен быть рассчитан, а также должно быть составлено подробное технологическое описание комплекса выполняемых работ (дизайн). В основу расчета закладываются такие параметры, как расчет необходимого объема газообразного азота для вытеснения жидкости в скважине, продолжительность процесса освоения, а также граничные пределы создаваемой депрессии с целью выбора оптимального режима освоения.

Все расчеты выполняются подрядной фирмой-исполнителем и согласовываются со специалистами технической и геологической службами заказчика. После проведения цикла работ фирмой-подрядчиком представляется полный отчет о выполненной работе в технологическую (геологическую) службу заказчика.

Одним из существенных преимуществ данной технологии является значительное сокращение продолжительности цикла ввода новых скважин в эксплуатацию. Продолжительность проведения стандартных

операций по капитальному ремонту скважин (КРС) и ГРП на трехпластовых залежах может занимать до трех и более недель.

Негласно принятая процедура ввода новых скважин в эксплуатацию в Западной Сибири, включает:

- подготовку ствола скважины к спуско-подъемным операциям (СПО);
- проведение перфорации нижней зоны;
- спуск пакера и насосно-компрессорных труб (НКТ);
- проведение ГРП;
- разрядку скважины;
- подъем НКТ и пакера для перепосадки;
- изоляцию зоны проведения ГРП проппантом / промывку до требуемой глубины.

Таблица 2. Распределение операций по дням с применением технологии ГНКТ

КРС	ГРП	ГНКТ	КРС	Запуск УЭЦН	Скважина в добыче
1 2	3 4	5 6 7 8 9 10 11	12 13 14 15 16 17 18 19 20 21	22 23 24 25 26	

Во временном интервале 33 дня, которые в среднем затрачиваются всеми подрядчиками для вывода новой скважины из бурения в добычу, преимущества применения технологии очевидны: скважина, в которой проведены планируемые ГРП, осуществлено фрезерова-

ние, промывка и освоение притока азотом, передается КРС для спуска УЭЦН на 12 суток, после ее передачи компании (табл. 2). Чистая экономия дней скважины «в добыче» – 12 суток. При среднем притоке скважины во время освоения $200 \text{ м}^3/\text{сут.}$ экономическая составляющая налицо.

Кроме того, преимуществом данной технологии является не только значительное сокращение продолжительности цикла ввода новых скважин в эксплуатацию и цикла ГРП, но и уменьшение рисков аварийности на скважинах за счет сокращения количества СПО пакера и НКТ; оптимизация работы бригад КРС, по перфорации и т. д., а также уменьшение загрязнения призабойной зоны пласта жидкостью глушения и существенно меньшее время нахождения гелирующего агента в пласте.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ
СПИСОК**

1. Жучков С. Ю., Каневская Р. Д. Опыт моделирования и оценки эффективности горизонтальных скважин с трещинами гидро-разрыва на Верхне-Шапшинском месторождении ООО «НТЦ-РуссНефть» // Нефтяное хозяйство. 2013. № 7. С. 92–96.
2. Серюков А. Н. AbrasiFRAC – передовое направление в эффективном комплексе операций по интенсификации притока скважины / А. Н. Серюков, В. А. Кузнецов (ООО «РН-Юганскнефтегаз»); М. В. Николаев, Р. Ф. Гумеров, К. В. Бурдин (Шлюмберже) // Время колтюбинга. 2010. № 31, март.
3. Хабибуллов К. Р. Анализ и особенности технологии промывки, фрезерования и освоения установкой ГНКТ в горизонтальных скважинах после селективного ГРП по технологии ZONESELECT // Наука и ТЭК. 2011. № 3, август.

УДК 913.1:

Зольникова Ю.Ф. [Zolnikova Y.F.]

947(470.63)

НАУЧНЫЕ И ОБЩЕСТВЕННЫЕ ОРГАНИЗАЦИИ РЕГИОНА КАВКАЗСКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД НА РУБЕЖЕ XIX–XX ВВ. И ИХ ВКЛАД В РАЗВИТИЕ КУРОРТОВ

Scientific and public organizations of the region Caucasian Mineral Waters at the turn of XIX–XX centuries and their contribution to the development of resorts

На рубеже XIX–XX вв. на Северном Кавказе, в том числе в регионе Кавказских Минеральных Вод, начали создаваться бальнеологические, медицинские, горные и другие научные и общественные организации, которые занимались медико-географическими исследованиями по изучению лечебных факторов региона, разрабатывали мероприятия по развитию курортов и организации различных видов рекреационной деятельности на Кавказских Минеральных Водах. Этот период был очень важным по количеству и значимости таких исследований. В истории развития отечественной бальнеологии и становлении курортов такие общества сыграли большую роль. В статье показана историческая деятельность бальнеологических и медицинских обществ, которые внесли значительный вклад в освоение рекреационных ресурсов, развитие рекреационной деятельности в курортном регионе и в становление городов-курортов региона Кавказские Минеральные Воды.

Ключевые слова: Кавказские Минеральные Воды, курорты, рекреационные ресурсы, рекреационная деятельность, Русское бальнеологическое общество, Общество врачей, практикующих на КМВ.

Balneology, medical, mining, and other scientific and public organizations were established in the North Caucasus, including in the region of Caucasian Mineral Waters in the XIX–XX centuries. They conducted medical and geographical studies of therapeutic factors in the region, to develop measures for the development of resorts and organizing various recreational activities in the Caucasian Mineral Waters. This period was very important for the quantity and significance of such research. Such societies have played a major role in the history of development of domestic balneology and development of resorts. This article shows the historical activity of balneological and medical societies that have made a significant contribution to the development of recreational resources, the development of recreational activities in the holiday region and the establishment of city-resort in the region Caucasian Mineral Waters.

Key words: Caucasian Mineral Waters, resorts, recreational resources, recreational activities, Russian balneological society, Society of physicians practicing in the CMW.

Кавказские Минеральные Воды (КМВ) – крупнейший и уникальный комплексный курортный регион России, на территории которого сконцентрировано более 100 источников минеральной воды 13 различных типов и целебная грязь Тамбуканского озера. На базе этих ресурсов более 200 лет назад, в начале XIX века, возникли курорты мирового значения Кисловодск, Пятигорск, Ессентуки, Железноводск. Вторая половина XIX в. в истории курортного региона Кавказских Минеральных Вод характеризуется активным развитием курортов района по целому ряду направлений, в т. ч. улучшается транспортно-географическое положение района, что привело к расширению географии мест прибытия. Постепенно развивается общественная и культурная жизнь курортного региона. В это же время в связи с развитием курортов, местные жители и специалисты, приезжающие работать в регион Кавказских Минеральных Вод, объединялись в различные общественные организации врачей, геологов и других специалистов. Деятельность этих организаций значительно повлияла на развитие городов-курортов Кавказских Минеральных Вод, т. к. они занимались медико-географическим исследованием рекреационных ресурсов, благоустройством и развитием курортов и другими проблемами. По характеру исследования общества делились на бальнеологические, медицинские, горные и др.

В 1863 г. в Пятигорске было основано Русское Бальнеологическое Общество (РБО) – одно из первых наиболее значимых обществ на курортах России. Оно было основано по инициативе С.А. Смирнова для широкой и активной деятельности врачей при водах и формирования науки о водах – бальнеологии. Деятельность Русского Бальнеологического Общества связана с организацией и развитием рекреационной деятельности на курортах региона Кавказских Минеральных Вод. В записке С.А. Смирнова Министру государственных имуществ А.С. Ермолову «О состоянии Кавказских Минеральных Вод, создании Русского бальнеологического общества и принятии мер для развития курорта» (20 сентября 1863 г.) говорилось: «Первое Русское Бальнеологическое Общество основано в Пятигорске в 1863 г. с целью чисто научного и практического изучения Кавказских Минеральных Вод и научного общения со всеми другими водами...» [1]. В состав Русского Бальнеологического Обще-

ства входили врачи, геологи, химики, архитекторы и общественные деятели, которые вели различные исследования на Кавказских Минеральных Водах: изучали месторождения источников, предлагали способы рационального использования вод с лечебной целью. Русское Бальнеологическое Общество внесло большой вклад в развитие курортов Кавказских Минеральных Вод: были разработаны показания и противопоказания для использования гидроминеральных ресурсов каждого курорта, организовано издание «Путеводителя по курортам Кавказской группы» (1863 год), разработаны проекты административного устройства курортов и благоустройства вод. В 1894 г. Русским Бальнеологическим Обществом была обоснована технология и внедрены в практику розлив и рассылка «бутылочной» воды по всей стране [2]. Одной из важных заслуг РБО является научное изучение влияния климата как лечебного фактора. Общество стремилось организовать метеорологические станции на всех курортах Кавказских Минеральных Вод.

Особое место у членов Русского Бальнеологического Общества занимал вопрос о создании благоприятных условий для больных и, в частности, об организации необходимых санитарных условий. Города-курорты в короткий срок подверглись значительному преобразованию. Русское Бальнеологическое Общество старалось поставить курорты региона Кавказских Минеральных Вод на должную высоту, научно обосновать применяемые методы лечения. Общество стремилось улучшить практическую работу не только на Кавказских Минеральных Водах, но и на других курортах страны, активно устанавливало связи с другими курортами России. Члены РБО принимали участие в бальнеологических съездах, обменивались результатами исследования, что давало им возможность ознакомиться с минеральными источниками других регионов России и по мере возможности давать советы по развитию этих курортов.

Русское Бальнеологическое Общество в течение многих десятилетий было ведущей научной организацией медицинской общественности на курортах региона Кавказских Минеральных Вод.

На рубеже XIX–XX вв. на курортах КМВ возникли другие общественные организации, которые в отличие от Русского Бальнеологического Общества занимались отдельными проблемами бальнеологии.

Так, в 1899 г. в Ессентуках образовалось «Товарищество практикующих врачей». Первым значимым мероприятием этой организации было открытие Ессентукской клинико-диагностической лаборатории. В сезон 1900 г. в Ессентуках была открыта химико-микроскопическая и бактериологическая лаборатория товарищества. Через год отделение этой лаборатории начало функционировать и в Кисловодске.

В результате активной деятельности на КМВ и привлечения новых членов в организацию в 1902 г. из Товарищества возникло более широкое научное объединение «Общество врачей, практикующих на Кавказских Минеральных Водах». Оно объединило врачей из разных городов России, прибывавших на Кавказские Минеральные Воды в лечебный сезон. Таким образом, Общество врачей, практикующих на КМВ, функционировало $\frac{1}{4}$ часть года [3]. Врачи, входящие в состав Общества, обсуждали научные вопросы, связанные с методикой лечения на курортах, и разрабатывали различные мероприятия по улучшению лечебной и бытовой деятельности курортов [4].

В задачи Общества врачей, практикующих на КМВ, входило изучение рекреационных ресурсов, организация лечения на курортах, проведение мероприятий, которые способствовали расцвету курортов региона Кавказских Минеральных Вод. Члены Общества обменивались методиками применения минеральных вод. На заседаниях Общества поднимались вопросы о проблемах Кавказских Минеральных Вод и проводились ходатайства перед администрацией по их решению [5, 6]. Таким образом, Общество вошло в круг русских медицинских обществ и боролось за интересы курортов Кавказских Минеральных Вод, способствуя их процветанию.

Параллельно с работой бальнеологических обществ в регионе Кавказских Минеральных Вод действовали и медицинские общества, в частности, Кавказское Медицинское Общество (КМО), основанное в 1864 г. Члены этого Общества приняли большое участие в развитии бальнеологии, а также в становлении курортов КМВ. Кавказское Медицинское Общество принимало участие в развитии Ессентукского курорта, общих и частных вопросах по бальнеологии и климатологии, организации лаборатории. Многие члены Кавказского Медицинского Общества

вносили предложения по улучшению применения минеральных вод. Члены КМО знакомили лечащихся со свойствами минеральных вод и методиками лечения водами, объясняли значение климатотерапии, стремились, чтобы воды были более доступны бедному населению, говорили об отсутствии охраны источников (закон об охране источников вышел в 1886 г.) и сложности сообщения Кавказских Минеральных Вод с другими регионами России.

В начале XX в. начали появляться местные медицинские общества. Одно из них – Кисловодское Медицинское Общество, возникшее в 1908 г. На заседаниях этого Общества обсуждались вопросы о работе Управления Вод, устройстве зимнего лечения в Кисловодске. Больше всего Кисловодское Медицинское Общество интересовал вопрос об источнике нарзана: его каптаже, дебите и качестве воды. На совместных заседаниях врачей и гидрогеологов обсуждались вопросы об открытии новых источников минеральной воды для питьевого лечения, о доломитном нарзане и показаниях для лечения этой минеральной водой [3], об устройстве грязелечебницы в Кисловодске, организации солнечных ванн, терренкура, лечения астматиков.

Таким образом, общественные организации, возникшие на рубеже XIX–XX вв. и функционировавшие вдали от центра России, на Кавказе, внесли значительный вклад в развитие курортов Кавказских Минеральных Вод. Курорты Пятигорск, Кисловодск, Ессентуки и Железноводск в своем развитии далеко опережали другие русские курорты, а также оказывали влияние на развитие других курортов России.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ
СПИСОК**

1. Из записки доктора С.А. Смирнова министру государственных имуществ А.С. Ермолову о создании Кавказских Минеральных Вод, создании Русского бальнеологического общества и принятии мер для развития курорта. РГИА, Ф. 37. Оп. 66. Д. 2213.
2. Савощенко И. С. Роль Русского Бальнеологического Общества в развитии курортов Кавказских Минеральных Вод. Ставрополь, 1958.
3. Кавказские Минеральные Воды / под ред. И.С. Савощенко. Ставрополь: Кн. изд-во, 1960.
4. Исторический обзор деятельности Общества врачей, практикующих на Кавказских Минеральных Водах за десять лет, 1902–1911 гг. М., 1912.
5. Александров В.А. Краткий обзор деятельности Общества врачей, практикующих на Кавказских Минеральных Водах за 5-летний период (1902–1906 гг.) // Протоколы и труды Общества врачей, практикующих на Кавказских Минеральных Водах (за 1902–1906 гг.). V–XII. М., 1907.
6. Отчет Общества врачей, практикующих на Кавказских Минеральных Водах в Ессентуках. Пятигорск, 1903.

УДК 639.01.05

**Каторгин И.Ю. [Katorgin I.Yu.],
Шкарлет К.Ю. [Shkarlet K.Yu.],
Седых Р.Ю. [Sedykh R. Yu.]****ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ
БАСЕЙНА РЕКИ ТАШЛА****Geoinformation analysis of ecological stability
of a river basin of Tashla**

Рассматриваются проблемы загрязнения малых рек Ставропольской возвышенности. На примере р. Ташлы анализируются основные источники загрязнения. На основе геоинформационного моделирования анализируются основные характеристики бассейна реки, выделяются индивидуальные особенности бассейна как природно-территориального комплекса. Проводится анализ экологического состояния бассейна р. Ташлы на основе определения коэффициента экологической стабильности ландшафта. На основе данных дистанционного зондирования Земли и картографических материалов построены карто-схемы, отражающие основные характеристики бассейна р. Ташла. На основе анализа построенной карты-схемы определены неустойчивые системы, занимающие большие пространства водосбора в верхней и средней частях речной системы, препятствующие стабилизации экологического состояния реки. Предложены меры по оптимизации экологического состояния речной системы, заключающиеся в создании индивидуальной программы реабилитации малых рек и проведении общественного мониторинга речных бассейнов.

Ключевые слова: р. Ташла, экология речных бассейнов, г. Ставрополь, малые реки.

Problems of pollution of the small rivers of Stavropol Plateau are considered. On the example of river of Tashla the main sources of pollution are analyzed. On the basis of geoinformation modeling the main characteristics of a river basin are analyzed, specific features of the pool as natural and territorial complex are marked out. The analysis of an ecological condition of the basin of the river of Tashla on the basis of determination of coefficient of ecological stability of a landscape is carried out. On the basis of the given remote sensing of Earth and cartographic materials the karto-schemes reflecting the main characteristics of the basin of the river of Tashla are built. On the basis of the analysis of the constructed schematic map the unstable systems occupying the big spaces of a reservoir in the top and average parts of river system interfering stabilization of an ecological condition of the river are defined. The measures for optimization of an ecological condition of river system consisting in creation of the individual program of rehabilitation of the small rivers and carrying out public monitoring of river basins are offered.

Key words: river of Tashla, ecology of river basins, Stavropol, small rivers.

Среди малых рек Ставропольской возвышенности особо выделяется река Ташла, которая служит своеобразным символом г. Ставрополя. Верховья реки расположены в самом «сердце» города в Таманс-

ком лесу и служат местом отдыха горожан, а находящийся в долине реки Комсомольский пруд является единственным пригодным для купания водоемом г. Ставрополя. Тем не менее воды реки Ташлы, по данным Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Ставропольского края, относятся к категории «очень грязные».

Проблема загрязнения малых рек Ставропольской возвышенности не нова, используя различные подходы и методы были проведены исследования загрязнения рек вод рек и донных отложений различными загрязняющими веществами [5, 7], комплексная экологическая оценка малых рек [2, 3, 6]. С 2007 г. начаты гидрохимические наблюдения за малыми реками Ставропольской возвышенности, относящимися к бассейну реки Калаус. Данные наблюдений говорят о постоянном загрязнении малых рек, в частности р. Ташлы, и отсутствии прогресса по данному вопросу.

Для решения задачи повышения качества природных вод реки Ташлы необходим анализ не только очевидных вещей – наличия свалок в русле либо несанкционированных сбросов, – но и комплексный анализ водосборного бассейна, что в условиях его расположения на территории населенного пункта представляет собой первостепенную задачу. Без анализа особенностей водосборного бассейна, его современного экологического состояния невозможно не только предотвратить загрязнение рек, но и обеспечить устойчивый эффект водоохранных мероприятий.

Задачей исследования было выявление экологического состояния бассейна реки на основе определения коэффициента экологического состояния ландшафтов (далее КЭСЛ), анализа подстилающей поверхности и современной антропогенной нагрузки. Расчеты КЭСЛ велись согласно методике, предложенной Айдаровым для лесостепных ландшафтов [1].

Методика основана на определении и сопоставлении площадей, занятых различными элементами ландшафта, с учетом их положительного или отрицательного влияния на окружающую среду:

$$\text{КЭСЛ}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n F_{cr}}{\sum_{j=1}^m F_{kcr}},$$

где: $KЭСЛ_1$ – коэффициент экологической стабильности ландшафта;
 $F_{ст}$ – площади, занятые стабильными элементами ландшафта: сельскохозяйственными культурами и растительными сообществами, оказывающими на него положительное влияние (леса, зеленые насаждения, естественные луга, заповедники, заказники и пахотные земли, занятые многолетними культурами);
 $F_{нст}$ – площади, занятые нестабильными элементами ландшафта (ежегодно обрабатываемые пашни, земли с неустойчивым травяным покровом, склонами, площадями под застройкой и дорогами, зарастающими и заиленными водоемами, местами добычи полезных ископаемых, другими участками, подвергшимися антропогенному опустошению).

Также проведен и уточняющий расчет по формуле

$$KЭСЛ_2 = \frac{\sum_1^n f_1 K_1 K_2}{\omega}$$

где: $KЭСЛ_2$ – коэффициент экологической стабильности ландшафта, в долях от единицы;
 f_1 – площадь биотического или абиотического элемента %;
 K_1 – коэффициент, характеризующий экологическую значимость отдельных биотических и абиотических элементов, (см. таблицу 2);
 K_2 – коэффициент геолого-морфологической устойчивости рельефа, $K_2 = 0,7$ для нестабильного рельефа (пески, склоны, оползни)
и $K_2 = 1,0$ для стабильного рельефа;
 ω – общая площадь системы.

В качестве основы анализа были использованы данные дистанционного зондирования бассейна реки, топографическая карта масштаба 1: 100 000. Расчет проводился при помощи ГИС MapInfo 10.

Для определения особенностей стока реки были построена карта-схема бассейна реки (рис. 1).

Площадь бассейна реки Ташлы – 133,3 км². Максимальное количество притоков расположено в верхней части бассейна. Наиболее крупные – р. Чла, руч. Тре-



Рис. 1.

Бассейн реки Ташлы.



Рис. 2. Аккумулятивный сток реки Ташлы.

тая речка. В средней части бассейна река имеет хорошо выраженные правые притоки. Левые – пересыхающие. В нижней части бассейна притоки отсутствуют. Вместе с тем анализ составленной карты-схемы аккумулятивного стока (рис. 2) показывает, что средняя и нижняя часть бассейна реки обладает достаточно густой сетью аккумулятивного стока по левому берегу реки. Этот поверхностный сток происходит во время выпадения обильных осадков и таяния снега.

Карта-схема, отражающая крутизну склонов в пределах бассейна, была построена для выявления зон с максимальными скоростями движения поверхностных вод (рис. 3). Так, для бассейна реки характерны высокие уклоны в верхней части бассейна, обусловленные геолого-геоморфологическими особенностями строения.

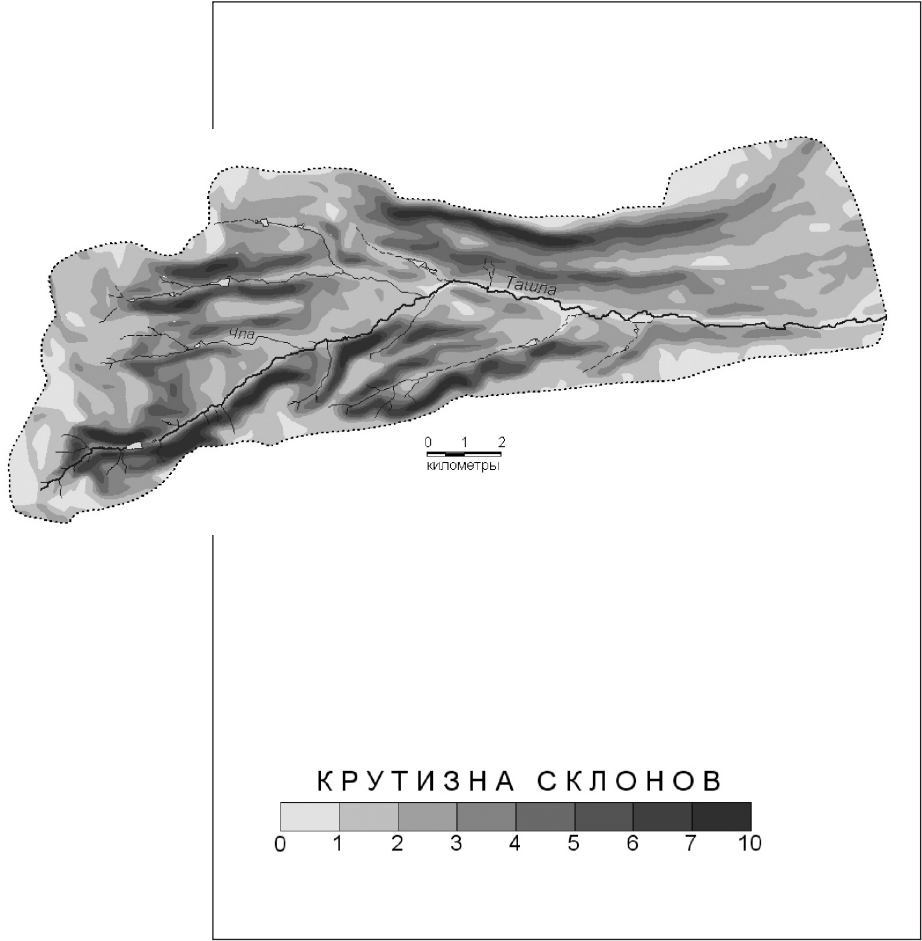


Рис. 3. Крутизна склонов бассейна р. Ташла.

В среднем течении река попадает в своеобразную котловину, сформировавшуюся на месте слияния крупных истоков реки. На левом борту прослеживается древняя долина, в настоящее время не заполненная речными водами. В целом среднее и нижнее течение реки находятся в зоне с небольшими уклонами. Северная часть бассейна по левому берегу реки в среднем и нижнем течении более обширна. Река правым бортом долины прижимается к склонам Ставропольской возвышенности.

Анализ структуры водосборного бассейна показал, что основная часть городской застройки охватывает верховья реки. Причем эта часть характеризуется и большой плотностью населения – это северо-западный район города. Застройка в основном многоэтажная. При таянии снегов и ливневых осадках большая часть поверхностного стока в силу особенностей рельефа попадает в речную сеть. Наличие Таманского и Члинского лесных массивов несколько сглаживает ситуацию, однако здесь же находятся и основные рекреационные зоны стихийного отдыха населения.

При полевых изысканиях обнаружены имеющие непосредственное отношение к стихийным пикникам фрагменты мусора в русле реки: пластиковая посуда, бумага и т. д., – которые попадают в реку при весеннем таянии снегов. Навалы мусора, оставляемые населением близлежащих домов в эрозионных углублениях, неизбежно попадают в реку. Для среднего течения характерна другая ситуация – мусор в реку выбрасывается в индивидуальном секторе в целях экономии на вывозе отходов. Как правило, захламлены участки, примыкающие к частному сектору. Особая проблема в пределах средней части бассейна – сброс неочищенных либо недоочищенных вод с септиков частных домов. Это характерно для бывших дачных кооперативов, индивидуальных домов с отсутствием центральной канализации. Анализ ос-

новых типов землепользования показывает, что основными типами являются городская застройка и пастбища (табл. 1).

Таблица 1. Площади землепользования по бассейну

№ п/п	Категории использования земель	Площадь, км²
1	Населенные пункты, промзоны и дороги	52,01
2	Леса и лесопосадки	16,48
3	Пашня	25,18
5	Пастбища	39,64
	Итого	133,31

Застройка занимает верховья бассейна, а пастбища – среднюю и нижнюю часть (рис. 4). В нижней части бассейна ведётся и распашка земель. Смыв с полей удобрений и средств защиты растений, также внести свою лепту в загрязнение реки. Однако каскадный эффект при анализе возможных путей попадания в воды реки загрязнителей все же говорит о поступлении загрязняющих веществ, преимущественно из верхней части бассейна.

Проведенный расчет КЭСЛ показывает, что территория водосборного бассейна преобладают неустойчивые системы, представленные селитьбой, промзонами, дорогами и пашней (таблица 2).

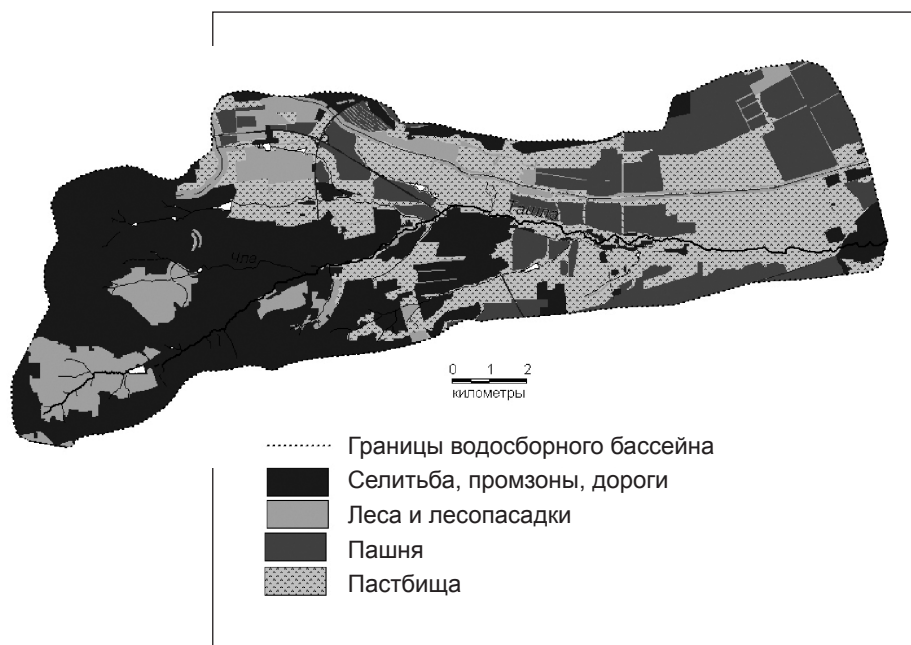


Рис. 4.

Характеристика основных типов землепользования на территории бассейна р. Ташлы

Из анализа карты-схемы (рис. 5), отражающей территориальное распределение типов природных и природно-техногенных систем по степени экологической устойчивости видно, что неустойчивые системы, занимающие большие пространства водосбора в верхней и средней частях речной системы, препятствуют стабилизации экологического состояния реки. Несмотря на усилия и принимаемые природоохранные меры, воды реки остаются загрязненными.

В данной ситуации вполне очевидно, что осуществляемые природоохранные мероприятия в том виде, в каком их принято проводить для этой речной системы, не будут иметь долгосрочного эффекта. Установление гра-

Таблица 2. Результаты расчета КЭСЛ для различных типов землепользования бассейна р. Ташла

№ п/п	Тип земле-пользо-вания	Площадь, км кв.	КЭСЛ 1	КЭСЛ 2 (с уче-том поправ-ки на крутизну склонов)
1	Пашня	11,84	0,13	0,091
2	Пашня	13,36	0,13	0,130
3	Леса и лесопосадки	11,36	0,84	0,588
4	Леса и лесопосадки	5,13	0,84	0,840
5	Пастбища и пустыри	26,95	0,79	0,553
6	Пастбища и пустыри	12,69	0,79	0,790
7	Селитьба, промзона и дороги	28,66	-1,00	-0,700
8	Селитьба, промзона и дороги	23,35	-1,00	-1,000

ниц водоохранных зон и прибрежных защитных полос, которые согласно ст. 65 Водного кодекса РФ составляют 100 и 50 м соответственно, не позволит кардинальным образом улучшить ситуацию. В условиях имеющегося сочетания природно-антропогенных факторов необходима разработка индивидуальной программы реабилитации малых рек г. Ставрополя с учетом особеннос-

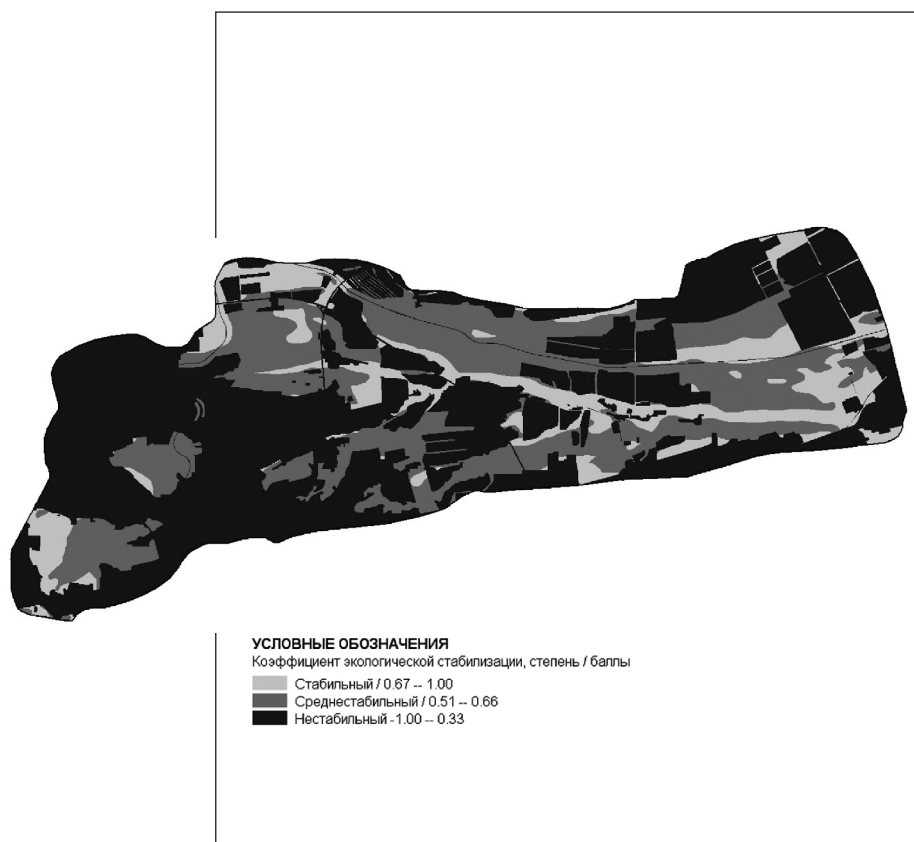


Рис. 5.

Экологическое состояние ландшафтов бассейна реки Ташлы.

тей ландшафтной структуры, степени стабильности среды и особенностей стока реки. Контроль экологического состояния рек и их бассейнов необходимо осуществлять с помощью общественного мониторинга [4], что позволит задействовать широкие массы населения в деле охраны малых рек.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ
СПИСОК**

1. Айдаров И.П. Обустройство агроландшафтов России. М.: МГУП, 2007. 152 с.
2. Бегдай И.В., Галушко М.А. Экологическая оценка состояния малых рек города Ставрополя // Природно-ресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России: сборник статей VII Международной научно-практической конференции. Пенза, 2009. С. 9–12.
3. Галушко М. А. Материалы к комплексной экологической оценке состояния малых рек города Ставрополя // Материалы XIII Международной экологической студенческой конференции «Экология России и сопредельных территорий». Новосибирск, 2008. С. 14–15.
4. Кужанова Н.И. Организация общественного мониторинга малых рек в г. Пскове / Н.И. Кужанова, Л.В. Никольская, Т.С. Пак, И. Г. Соколова // Вектор науки ТГУ. № 1 (19), 2012. С. 31–32.
5. Новосельцева А. П. Геохимические показатели качества воды реки Ташла как условия формирования и сохранения разнообразия гидробионтов // Современная биогеография. М.; Ставрополь, 2001. С. 127–132.
6. Степаненко Е. Е., Еременко Р. С. Анализ состояния загрязненности вод реки Ташлы города Ставрополя // Вестник АПК Ставрополя. 2012. №4(8). С. 111–113.
7. Экологический паспорт города Ставрополя / под ред. С.И. Пахомовой. Ставрополь: ПНИИС, 1995. 72 с.
8. Энциклопедический словарь Ставропольского края / гл. ред. В.А. Шаповалов. Ставрополь: Изд-во Ставропольского государственного университета, 2006. 458 с.

УДК 576.3 /.7 Иванов В.М. [Ivanov V.M]

ОСОБЕННОСТИ ПОСТЭМБРИОНАЛЬНОГО БИОГЕНЕЗА У БЕЛЫХ КРЫС ЛИНИИ ВИСТАР ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НИХ ОКСИДАМИ АЗОТА

The specifics of postembryonic biogenesis of vistar white mice under the effect of nitrous oxides

В данной статье приводятся данные по росту и развитию белых крыс линии Вистар, их гематологическим показателям и естественной резистентности в условиях воздействия оксидов азота. У подопытных животных уменьшаются весовые и линейные размеры, снижаются гематологические показатели и естественная резистентность по сравнению с контрольными животными, которые находятся в фоновой зоне.

Ключевые слова: постнатальный онтогенез, рост, развитие, интерьер, гематология, внутренние органы, резистентность, достоверность.

The article presents the data on the growth and development of Vistar white mice, their hematologic indices and natural resistance in the conditions of nitrous oxides effect. The weight and linear dimensions of the laboratory animals decrease, their hematologic indices and natural resistance also decrease in comparison with the control animals which are placed in the background zone.

Key words: postnatal ontogenesis, growth, development, interior, hematology, internal organs, resistance, reliability.

Изучение роста и развития млекопитающих в зонах влияния различных промышленных предприятий с учётом особенностей загрязнения территорий в настоящее время актуально и имеет большое научное и практическое значение [1, 139–145; 2, 983–989; 3, 428–435; 5, 485–493].

Подобные исследования выявляют негативные изменения, которые происходят в организме животных в постнатальном онтогенезе и способствуют разработке научных основ коррекции его нарушений [4, 613–621; 6, 89–95; 7, 1163–1169].

Целью наших исследований явилось изучение особенностей постэмбрионального биогенеза у белых крыс линии Вистар при воздействии на них оксидами азота. При этом решались следующие задачи: оценить рост и развитие млекопитающих; изучить гематологические показатели животных; оценить резистентность белых крыс.

Для проведения исследований, в окрестностях ОАО «Невинномысский Азот» Ставропольского края, который является источником поступления в атмосферу оксидов азота (NO , N_2O_3 , NO_5 , N_2O_4), были выделены 2 зоны различные по степени загрязнения: импактная (расстояние от источника загрязнения 1–2 км) и фоновая – с расстоянием от источника загрязнения 25–30 км.

Основными источниками данных выбросов являются предприятия, производящие азотные удобрения, азотную кислоту, нитраты, анилиновые красители, нитросоединения, к которым и относится ОАО «Невинномысский Азот»

В процессе исследований были сформированы две группы белых крыс линии Вистар, одна из которых:

- опытная, размещена в импактной зоне, вторая – контрольная, находилась в фоновой зоне, на расстоянии 25 км от вредного воздействия химического производства (схема 1).

Остальные условия опытов для обеих групп животных были одинаковыми, крыс содержали в стандартных условиях вивария со свободным доступом к воде и пище.

Запланированные научные исследования по выполнению поставленных задач выполнялись вначале на потомстве (крысят обоего пола), полученных от здоровых крыс, а в последующем на взрослых животных по следующим методикам. Динамика живой массы и внутренних органов, длины тела крыс определялись путем взвешивания и измерения животных в разные возрастные периоды (при рождении, 21, 150 и 250 дней). Гематологические показатели изучались по общепринятым методикам. Уровень естественной резистентности крыс в различные возрастные периоды оценивался по бактерицидной, лизоцимной активности сыворотки

крови и фагоцитарной активности крови. Показатели, полученные в результате исследований были обработаны методом вариационной статистики.

Результаты исследований

Изучение закономерностей постэмбрионального развития животных относится к одной из важных задач

Схема 1. Схема опытов

Группы животных	Порода крыс	Количество животных в группе
Контрольная (1)	Белые крысы линии Вистар	15
Опытная (2)	Белые крысы линии Вистар	15

биологии. Онтогенез организма проходит при непрерывном взаимодействии двух процессов – роста и развития с внешней средой, протекающих одновременно. Ростом называется увеличение массы клеток организма, его тканей и органов, линейных и объёмных размеров, что осуществляется за счёт количественных изменений в результате новообразований живого вещества. Развитие есть цепь качественных изменений организма, выражающихся в изменении соотношений размеров и функций отдельных его органов и тканей.

Определение изменения живой массы и длины тела подопытных животных в условиях воздействия

промышленных предприятий и химических веществ, которые присутствуют в данной зоне, имеет большое значение при проведении биологических исследований, так как рост организма обусловлен обменными процессами данного организма в конкретных условиях окружающей

Таблица 1. Динамика живой массы подопытных крысят, $M \pm m$

Возраст, дни	Самец, г		Самка, г	
	1	2	1	2
При рожден.	5,4±0,01	5,4±0,01	5,3±0,01	5,1±0,01
7	13,3±0,02	13,0±0,03	12,5±0,03	12,3±0,04
14	19,8±0,03	19,2±0,05	19,0±0,04	18,6±0,03
21	26,4±0,06	25,9±0,05	25,5±0,07	25,1±0,08
28	37,9±0,11	37,2±0,09	35,7±0,10	35,1±0,11
35	41,8±0,12	41,0±0,10	39,6±0,12	39,0±0,09
50	53,2±0,12	52,5±0,13	52,1±0,09	51,5±0,10
70	65,8±0,33	64,9±0,34	63,2±0,35	62,3±0,32
90	72,4±0,64	71,5±0,58	70,3±0,54	69,1±0,55
120	79,9±0,39	78,9±0,40	75,4±0,54	74,2±0,55
150	102,5±0,56	101,0±0,57	95,8±0,66	94,3±0,70
200	198,4±0,78	197,4±0,80	175,8±0,87	174,2±0,88
250	315,2±1,11	313,1±1,00	265,2±1,23	264,1±1,11

среды. Результаты данных опытов (табл. 1) показали, что в период молочного кормления, который длился 21 день был интенсивный прирост массы тела крысят обоих полов. Тем не менее, прирост живой массы у крысят – сам-

цов за данный период составил 20,5 г, у самок – 20,0 г, что меньше, чем у животных контрольных групп соответственно на 1,0 г и 0,2 г.

За период полового созревания самцы из опытной группы приросли на 75,1 г, а самки – на 69,2 г, что мень-

Таблица 2. Динамика длины тела подопытных крысят, $M \pm m$

Возраст, дни	Самец, мм		Самка, мм	
	1	2	1	2
При рожд.	92±0,42	91±0,38	91±0,51	90±0,44
7	140±0,56	138±0,4	134±0,48	132±0,53
14	162±0,76	158±0,85	155±0,87	151±0,55
21	170±0,87	164±0,88	162±0,99	158±0,85
28	184±0,98	178±0,99	179±1,00	174±1,11
35	197±1,12	190±1,11	189±1,04	184±1,09
50	242±1,13	236±1,10	234±1,23	228±1,22
70	248±1,45	238±1,12	240±1,56	234±1,24
90	259±1,76	247±1,19	251±1,56	242±1,66
120	272±1,98	260±1,54	267±1,78	258±1,69
150	278±2,02	266±1,77	272±2,00	262±1,99
200	282±2,04	270±1,99	278±2,29	266±2,11
250	285±2,06	272±2,11	280±2,44	270±2,33

ше, чем у контрольных животных на 1,0 г и 1,1 г.

В репродуктивный период интенсивность роста опытных крысят, также была меньше, чем контрольных. Из этого следует что, отрицательное влияние ок-

Таблица 3. Возрастная динамика массы внутренних органов
 подопытных крысят, М ± m

Группа, возраст, (дней)	Масса внутренних органов, мг			
	тимус	селезёнка	печень	
1, 21	16,8 ± 1,2	17,2 ± 1,9	330,2 ± 30,1	
2, 21	16,7 ± 1,0	19,3 ± 1,7	337,9 ± 29,8	
1, 150	64,4 ± 4,1	65,5 ± 3,9	1336,2 ± 45,8	
2, 150	65,5 ± 3,9	70,1 ± 5,0	1359,7 ± 48,1	
1, 250	85,9 ± 7,9	87,9 ± 8,1	1689,8 ± 69,1	
2, 250	85,0 ± 8,1	96,6 ± 9,1	1711,9 ± 70,1	

сидов азота в зоне воздействия комбината на подопытных крысят очевидно.

Крысята очень быстро росли. Детёныши были наиболее активными в возрасте 8–20 дней. С возрастом у них всё тело покрылось коротенькой шёрсткой, очень мягкой и на ощупь напоминающей велюр. Крысята активно вели себя в опытах, и с ними требовалась особая осторожность. За период молочного кормления длина тела крысят – самцов и крысят – самок опытных групп увеличилась соответственно на 73 и 68 мм, что меньше прироста длины тела у животных в контрольной группе на 0,3–0,5 мм (табл. 2). Отставание крысят опытных групп обоих полов по приросту длины тела над животными контрольных групп отмечено и по другим перио-

	сердце	лёгкое	почки
	43,2 ± 3,8	186,7 ± 7,9	30,6 ± 1,1
	43,1 ± 3,3	179,2 ± 8,2	30,5 ± 1,2
	160,4 ± 8,5	744,9 ± 12,8	123,8 ± 7,9
	159,9 ± 8,4	738,9 ± 11,9	123,7 ± 8,1
	195,9 ± 11,9	845,9 ± 23,6	168,5 ± 14,5
	193,9 ± 12,1	845,0 ± 24,1	167,4 ± 13,8

дам роста: периоде полового созревания (22–150 день) на 10–12 мм, репродуктивном периоде (151–250 день) на 10–13 мм, периоде старческих изменений (старше 251 дней) более 15 мм, что свидетельствует о негативном влиянии оксидов азота и на рост подопытных животных.

Интерьер – это совокупность физиологических, биохимических, морфологических и других свойств организма в связи с его видовой принадлежностью. В область изучения интерьера входят и внутренние органы млекопитающих, которые играют важную роль в обменных процессах организма, в структурно – функциональном обеспечении онтогенеза. Они являются важной составной частью кровеносной, пищеварительной, дыхательной, выделительной и других систем организма и регулируют важнейшие физиологические процессы. Поэтому очень важно знать, как повлияет воздействие оксидов азота на состояние внутренних органов крысят и их функционирование.

Особенно интенсивно масса внутренних органов подопытных крысят увеличивалась в первый период с 21 по 150 день. Например, масса печени возросла на 1021,8 мг, масса сердца и лёгкого соответственно на 116,8 и 559,7 мг. При этом необходимо отметить, что прирост таких внутренних органов как тимус, селезёнка и печень был выше у опытных животных, а прирост сердца, лёгкого и почек был больше у контрольных. Во втором и третьем периоде наиболее быстро у подопытных животных росли в своей массе такие важные органы как сердце, печень и легкое. Достоверное преимущество по росту внутренних органов (селезёнки и печени) имели подопытные крысята над своими контрольными ровесниками.

Изучение гематологических особенностей у подопытных животных в изменённых природно – климатических условиях в постнатальном онтогенезе (табл.4) объясняет многие закономерности роста и развития организма млекопитающих.

Кровь является связующим звеном между внешней средой и организмом и при этом, обладая относительно постоянными физико-химическими свойствами, отражает изменения, которые происходят в организме животных под влиянием внешней среды.

Для нас было важным узнать, как изменится состав крови крыс в постнатальном онтогенезе при воздействии на них оксидами азота.

Изучаемые нами гематологические показатели (эритроциты, лейкоциты и гемоглобин) являются индикаторами здоровья животных в определенных географических и природно-климатических условиях и отражают особенности онтогенеза данных групп млекопитающих.

Тем не менее, содержание данных показателей в крови подопытных животных обеих групп соответствовали их физиологическому статусу. Но при этом было установлено незначительное превышение по эритроцитам и гемоглобину у контрольных животных над опытными, а по содержанию лейкоцитов в крови преимущество имели крысы 2 группы.

Таким образом, картина крови у животных исследуемых групп отразила влияние на них оксидов азота и подтвердила закономерность о связи интерьера с качеством окружающей среды.

Под резистентностью понимается способность организма противостоять воздействию разнообразных по своей природе факторов. Чаще

всего для изучения естественной резистентности организма используют кровь или её составляющие – плазму, сыворотку. Интерес к гематологическим исследованиям определяется той ролью, которую играет кровь во всех физиологических функциях животного организма.

Таблица 4. Возрастная динамика гематологических показателей подопытных крысят, $M \pm m$

Возраст, дней.	Группа	Показатель, $M \pm t$		
		Эритроциты, $10^{12}/л$	Лейкоциты, $10^9 /л$	Гемоглобин, г/л
21	I	4,25±0,12	5,35±0,54	134,45±2,15
	II	4,15±0,11	5,43±0,55	133,34±1,98
150	I	4,86±0,45	5,48±0,49	143,56±2,34
	II	4,47±0,38	5,69±0,51	140,78±2,11
250	I	4,87±0,51	5,58±0,49	147,98±2,29
	II	4,11±0,38	5,99±0,51	143,76±2,34

Кровь несёт в себе разнообразные иммунные тела, которые осуществляют способность организма бороться с теми или иными болезнетворными началами и с внедрившимися чужеродными веществами.

Важное клинико – диагностическое исследование крови вытекает ещё и из того, что кровь, представляя собой посредника во всех процессах обмена веществ и, находясь в постоянном контакте со всеми органами и

тканями, отражает все происходящие в них внутренние процессы, изменяясь сама как качественно, так и количественно.

Безусловно доминирующим фактором в системе естественной резистентности является фагоцитоз, выступающий в первой линии эффективных механизмов

Таблица 5. Естественная резистентность подопытных животных в возрастном аспекте, %

Возраст, дней.	Группа	Показатель, М±т		
		БАСК	ЛАСК	ФАК
21	I	49,1 ± 1,94	24,6 ± 1,44	18,6 ± 0,98
	II	48,4 ± 2,05	24,9 ± 1,37	18,1 ± 1,00
150	I	52,8 ± 2,01	27,8 ± 1,18	20,4 ± 0,61
	II	50,3 ± 1,89	26,9 ± 1,28	19,1 ± 0,78
250	I	54,4 ± 1,75	32,4 ± 1,75	22,5 ± 0,81
	II	52,1 ± 2,04	30,8 ± 1,65	21,8 ± 0,67

иммунологического гомеостаза животных. Фагоцитарная функция осуществляется посредством клеток – фагоцитов, в число которых входят и клеточные элементы «белой крови».

Фагоцитарная активность лейкоцитов крови подопытных животных в наших опытах (табл. 5) выражена и повышается с возрастом.

Лизоцим выполняет в организме важные биологические функции и, в первую очередь, оказывает стимулирующее воздействие на фагоцитоз, действует бактерицидно на многие микроорганизмы. Лизоцимная активность сыворотки крови животных контрольной группы на протяжении всего периода исследований была выше, чем у подопытных животных, хотя разница и недостоверна.

Интегральным отражением защитных сил организма может служить и показатель бактерицидности сыворотки крови животных. Она обеспечивается такими биологическими веществами как комплементом, опсо-нинами, лизоцимом. Необходимо отметить рост бактерицидной активности сыворотки крови с возрастом как у животных 1 группы, так и у животных 2 группы.

Таким образом, из результатов проведённых исследований можно сделать вывод, что у белых крыс в период постэмбрионального биогенеза при воздействии оксидами азота замедляется рост и развитие, снижаются гематологические показатели и естественная резистентность организма.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вётош А.Н., Лучаков Ю.И., Попов А.А., Алексеева О.С., Морозов Г.Б. Терморегуляторные реакции млекопитающих в условиях действия повышенного давления азота // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова, 2003. №2. С. 139–145.
2. Галанжа Е.И., Бриль Г.Е., Соловьёва А.В., Степанова Т.В. Участие оксида азота в регуляции функций лимфатических микро-

сосудов // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова, 2002. №8. С. 983–989.

3. Гуцаева Д.Р., Москвин А.Н., Жиляев С.Ю., Косткин В.Б., Демченко И.Т. Роль оксида азота и углекислого газа в нейротоксическом действии кислорода под давлением // Российский физиологический журнал, 2004. №4. С. 428–435.
4. Новожилов А.В., Катюхин Л.Н. Динамика гематологических показателей крови белых крыс в постнатальном онтогенезе // Журнал эволюционной биохимии, 2008. Т.44. №6. С. 613–621.
5. Пшенникова М.Г., Попкова Е.Г., Бондаренко Н.А., Малышев И.Ю., Шимкович М.В., Смирин Б.В., Манухина Е.Б. Катехоламины, оксид азота и устойчивость к стрессовым повреждениям: влияние адаптации к гипоксии // Российский физиологический журнал им.И.М.Сеченова, 2002. №4. С. 485–493.
6. Фадюкова О.Е., Кузенков В.С., Реутов В.П., Крушинский А.Л., Буравков С.В., Кошелев В.Б. Антистрессорное и ангиопротекторное влияние оксида азота на крыс линии Крушинского–Молодкиной, генетически предрасположенных к аудиогенной эпилепсии // Российский физиологический журнал. 2005. №1. С. 89–95.
7. Федин А.Н., Постникова Т.Ю., Кузубова Н.А., Данилов Л.Н., Лебедева Е.С. Динамика сокращений гладкой мышцы трахеи и бронхов крыс при ингаляции диоксидом азота // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2007. №10. С. 1163–1169.

УДК: 57.022

Криштоп В. В. [Chrishtop V. V.],
Грибкова Е. С. [Gribkova E. S.],
Кормилицына Н. К. [Kormilitsyna N. K.]

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ КАК СПОСОБ ВЫЯВЛЕНИЯ АДАПТАЦИОННЫХ СТРАТЕГИЙ К ЭКЗАМЕНАЦИОННОМУ СТРЕССУ БАКАЛАВРОВ ИВГУ

Cluster analysis indicators of the cardiovascular system as a way to identify adaptation strategies to exam stress bachelors of ISU

У обучающихся Ивановского государственного университета в количестве 151 человека исследовались показатели дыхательной и сердечно-сосудистой систем посредством измерения частоты дыхательных движений, сердечных сокращений и артериального давления. Измерение показателей проводилось во время практических занятий в учебном семестре и после экзамена. С помощью кластерного анализа все испытуемые были разделены по типу адаптации на 4 группы. Определены средние значения полученных показателей каждой группы, исследована динамика численности групп студентов. Выявлены 4 стратегии адаптации: минимальная, максимальная и 2 промежуточных – адреналовая и норадреналовая. Промежуточные типы адаптаций являются транзиторными, что обусловлено динамикой студентов во время обучения. Определено, что часть студентов на 1-м курсе обладают высоким уровнем адаптации, при этом к 4-му курсу адаптация к обучению происходит не у всех обучающихся.

Ключевые слова: сердечно-сосудистая система, студенты, стратегии адаптации.

The students of Ivanovo State University in the amount of 151 people were examined indicators of respiratory and cardio-vascular systems, by measuring respiration rate, heart rate and blood pressure. Measuring carried out during practical classes in semester and after the exam. All the students were divided according to the type of adaptation into 4 groups with the cluster analysis. Were determined the average of the resulting figures of each group, the dynamics of the students. 4 adaptation strategies are revealed: the minimum, maximum and intermediate 2 – adrenal and noradrenal. Intermediate types of adaptations are transient, due to the dynamics of the students during the training. It was determined that some of the students in 1 course has a high level of adaptation, but adaptation of learning does not take place at all students of 4 course.

Key words: cardiovascular system, students, adaptation strategies.

На сегодняшний день выявлены различные стратегии адаптации организма к факторам окружающей среды. Наиболее полно они изучены в психологии и социологии. Одним из примеров является классификация адаптационных стратегий А. А. Реана [8].

Она описывает 5 моделей жизненных ответов на изменение условий, влияющих на организм: активное изменение ситуации; активное изменение свойств собственной личности; активный поиск новой социальной среды с более высоким адаптационным потенциалом для данной личности и её развития; вероятно-комбинированный (включает в себя компоненты вариантов вышеприведенных «чистых» типов); пассивная дезадаптация (пассивное принятие требований, норм, установок, ценностей социальной среды без включения процесса самоизменения, самокоррекции и саморазвития). Вместе с тем аналогичные вариативные адаптационно-компенсаторные перестройки наблюдаются и со стороны других органов и систем, в том числе сердечно-сосудистой системы [9, 10, 11].

Безусловно, психологическая и социальная адаптации человека происходят во взаимосвязи с адаптацией физиологических систем его организма. В связи с этим представляет интерес выявление физиологических стратегий адаптации организма человека к стрессорным воздействиям.

Особо ценным представляется изучить эти стратегии в динамике, потому что именно в этом случае появляется возможность проследить пути и механизмы перестройки систем органов, которые происходят под действием новых воздействующих условий.

Изучение адаптации студентов, несомненно, крайне важно, т. к. от этого зависит успешность их дальнейшего обучения и профессиональной деятельности. Опасным исходом отсутствия адаптированности может являться отчуждение, направленное на процесс образования, вплоть до ухода из вуза [5]. Динамику же адаптационных перестроек можно оценить на примере реакций студентов разных курсов обучения.

Большой объем литературных данных посвящен изучению студентов-специалистов: их отношения к учебному процессу, оценки степени трудности обучения и способности к адаптации, однако в настоящее время большую актуальность имеет изучение аналогичных характеристик

у студентов, обучающихся по программе бакалавриата, что обусловлено сменой модели высшего образования в России [4].

Целью работы стало выявление альтернативных вариантов компенсаторно-адаптационных реакций сердечно-сосудистой системы обучающихся по программе бакалавриата с помощью оценки её показателей путем кластерного анализа.

В исследовании принимали участие студентки, обучающиеся по программе бакалавриата биолого-химического факультета Ивановского государственного университета. Количество испытуемых – 151 человек, которые получали образование на различных ступенях обучения: 1, 2, 3 и 4-м курсах. Они добровольно предоставили письменное согласие на участие в исследованиях. Во время учебного семестра на практических занятиях были однократно оценены частота сердечных сокращений (ЧСС), артериальное (систолическое – АДС и диастолическое – АДД) давление и частота дыхательных движений грудной клетки (ЧД). Оценка проводилась по стандартным методикам. Кроме того, по полученным данным было рассчитано пульсовое давление (ПД). Аналогичные показатели были определены во время зимней сессии непосредственно перед первым экзаменом. Первичные данные обрабатывались при помощи пакета статистических программ Statistica 6. Для выявления устойчивых однородных групп обучающихся, характеризующихся общностью изучаемых параметров для всей выборки, включающей в себя обучающихся 1, 2, 3 и 4-го курсов проводился кластерный анализ. Первичные данные являются многопараметрическими, что обуславливает применение кластерного анализа, который позволяет выявить их внутреннюю структуру и сгруппировать отдельные наблюдения по степени их схожести, что необходимо при анализе медико-биологических данных [1]. Процедура кластеризации заключалась в выявлении четырех кластеров методом К-средних. В последующем для каждого кластера, определялись: среднее значение каждого показателя, ошибка среднего и дисперсия. Достоверность различия средних определялась при помощи Т-критерия Стьюдента ($p < 0,05$).

В результате проведенных исследований выявлены 4 компактных кластера, получившие условные названия А, Б, В и Г. При анализе средних значений параметров, измеренных во время семестра и перед экзаме-

Таблица 1. Средние значения физиологических параметров, соответствующие кластерным группам

	Показатели, измеренные во время семестра				
Группы	АДС	АДД	ЧСС	ЧД	ПД
А	117,2	73,8	69,4	8,9	43,4
Б	109,6	69,2	82,2	9,2	40,4
В	119,8	71,5	85,0	8,8	48,4
Г	114,5	68,9	70,9	8,6	45,7

ном, каждой группы определены максимальные и минимальные значения, по отношению к средним других выявленных групп (табл. 1).

Жирным шрифтом в таблице выделены максимальные значения, а подчеркнуты – минимальные.

Максимальные значения показателей, измеренных во время учебного семестра, распределись следующим образом:

- АДД – группа А;
- ЧД – группа Б;
- АДС, ЧСС и ПД – группа В.
- Группа Г не обладает максимальными показателями каких-либо параметров. Аналогичная ситуация наблюдается при анализе показателей, измеренных перед экзаменом.

Показатели, измеренные перед экзаменом					
	АДС	АДД	ЧСС	ЧД	ПД
	133,9	83,4	89,5	9,7	50,5
	115,9	74,8	97,5	10,8	41,1
	140,3	79,4	112,8	10,4	61,0
	112,0	67,3	77,2	7,9	44,7

Распределение минимальных значений показателей, зафиксированных во время практических занятий, произошло иначе: минимальные ЧСС – группа А, минимальные АДС и ПД – группа Б, минимальные АДД и ЧД – группа Г. Группа В не имеет минимальных значений изучаемых показателей. Минимальные значения АДС, АДД, ЧСС и ЧД предэкзаменационных показателей относятся к группе Г, минимальные значения ПД характерны для студентов группы Б.

При анализе кластерных групп определено количество студентов каждого курса, которые принадлежат той или иной группе в процентном соотношении (табл. 2). Обнаружено, что большая часть первокурсниц отно-

Таблица 2. Процентное представительство студентов разных курсов в кластерных группах

Группы Время обучения	А	Б	В	Г
1 год	35 %	17 %	22 %	27 %
2 года	13 %	26 %	28 %	34 %
3 года	26 %	9 %	39 %	26 %
4 года	19 %	10 %	14 %	57 %

сится к группе А, в то время как большинство бакалавров 4 курса входят в состав группы Г.

Кроме того, произведена оценка динамики численного состава кластеров для студентов разных курсов. Установлено, что за 2–3 курсы в группе В произошло увеличение учащихся на 17 %, а за 4-й год обучения на 31 % возросло уже количество студенток в группе Г.

Разделение всей выборки студентов на 4 кластерные группы, вероятно, основано на механизме ответного действия их организма на стресс. Известно, что в зависимости от функционирования симпатoadреналовой системы может быть нескольких таких типов: адреналовый и норадреналовый, наличие которых обусловлено гиперсекрецией этих гормонов;

смешанный, который обусловлен пониженным или повышенным выделением этих гормонов; и тип, характеризующийся дисбалансом гормональной секреции [12].

В связи с этим мы предположили, что распределение студентов по группам обусловлено различными статусами симпатoadреналовой системы. Студенты в группе А характеризуются показателями, объясняющими большую силу как адреналовых, так и норадреналовых влияний на сердечно-сосудистую систему; обучающиеся группы Б характеризуются показателями, объясняющими большую силу адреналовых влияний; в то время как показатели при стрессорном ответе бакалавров группы В обуславливают большую силу только норадреналовых влияний. Минимальные показатели студенток группы Г при стрессе объясняют незначительную активацию как адреналовых, так и норадреналовых влияний на сердечно-сосудистую систему.

В ходе исследования обнаружено, что студенты группы А обладают максимальными показателями артериального диастолического давления как во время практических занятий учебного семестра, так и в предэкзаменационный период, что свидетельствует о повышенном симпатическом влиянии на периферическую часть сердечно-сосудистой системы, обуславливающим её негативное напряжение, которое способствует возникновению серьезных болезней [6]. Существование такого давления независимо от наличия или отсутствия стресса может рассматриваться как признак стратегии незавершенной адаптации.

Установлено, что студенты группы Б имеют самую высокую частоту дыхательных циклов. Это можно объяснить тем, что выброс адреналина ускоряет метаболические процессы, требующие большого количества кислорода [2]. Это свидетельствует о том, что при данной стратегии адаптации симпатические эффекты влияния на сердечно-сосудистую систему не настолько высоки, как в случае со студентами группы А, а основной вектор эффектов направлен на дыхательную систему и метаболические процессы. По нашему предположению, у студентов этого кластера имеет место адаптация, характеризующаяся преимущественно выбросом адреналина, что рассматривается нами в качестве промежуточной стратегии адаптации.

При анализе средних значений показателей у студентов группы В было обнаружено, что они являются максимальными сразу по нескольким параметрам. Совокупность повышенных характеристик – артериального систолического давления, частоты сердечных сокращений и пульсового давления – может свидетельствовать о большой силе нагрузки, направленной на сердечную деятельность, которая активирует её под действием стресса (в момент опасности) [7]. Можно предположить, что данный принцип адаптации обусловлен большой силой влияния на сердечно-сосудистую систему норадреналина, который является мобилизирующим гормоном агрессии и гнева, что представляет собой часть ответной реакции на стрессовое воздействие [13]. Таким образом, по нашей гипотезе, путь стрессорного ответа бакалавров группы В обусловлен норадреналовым промежуточным типом адаптации.

Информация о том, что отнесенные к группе Г студентки не имеют максимальных значений каких-либо параметров во время учебного семестра, а перед экзаменом обладают минимальными значениями артериального давления, частоты дыхания и частоты сердечных сокращений, дает основания предполагать, что бакалавры в этой группе имеют максимальную высокую способность адаптации к стрессу.

Можно предположить, что 4 различных типа ответа могут быть основаны на 4 стратегиях адаптации: студенты группы Г обладают признаками максимальной адаптации, в то время как бакалавры группы А – незавершенной адаптации. Вероятно, выявленные группы Б и В представляют собой промежуточные стратегии адаптации, которые, возвращаясь к степени силы влияния гормонов на сердечно-сосудистую систему можно назвать адреналовой и норадреналовой соответственно.

Изучение динамики студенческой активности, которая связана со сроками обучения бакалавров и кластерными группами, в которых они состоят, дает основание говорить о смене стратегий адаптации в течение образовательного процесса.

Во время анализа прироста количества студентов за 2 и 3-й годы обучения наблюдается явное численное увеличение группы В, т.е. часть студентов из других групп (17 %), стала адаптироваться путем норадреналовой стратегии. Можно предположить, что это связано с тем, что гормон

адреналина считается гормоном «короткого действия», в то время как активация симпатической системы по норадреналовому типу характеризуется высокой резистентностью к стрессу [3]. Мы считаем этот тип адаптации транзиторным, т. к. хорошо прослеживается переход большого числа обучающихся (31 %) на 4-м году образовательного процесса к адаптации по типу группы Г, т. е. по гипотезе – к стратегии максимальной адаптации.

Таким образом, по нашему предположению, существует 4 стратегии адаптации к стрессу: две из которых являются транзиторными (Б, В) и идут по адреналовому и норадреналовому типам, а две другие (А, Г) характеризуются минимальной и максимальной адаптациями соответственно. Адаптация к обучению на 4-м курсе происходит не у всех студентов, в то время как на 1-й первый курс максимально адаптированными приходит уже 19 % обучающихся, а к концу обучения прирост к этой группе составляет только 31 %. Этот вывод подтверждает и наблюдение о том, что к концу 4-го курса в группе А остаются 19 % студенток, которые не адаптировались за время всего учебного процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акопов А. С. Кластерный анализ в медико-биологических исследованиях / А. С. Акопов, А. А. Московцев, С. А. Доленко, Г. Д. Савина // Патологическая физиология и экспериментальная терапия. М.: Гениус Медиа, 2013. №4. С. 84–96.
2. Бизенкова М. Н., Романцов М. Г., Чеснокова Н. П. Метаболические эффекты антиоксидантов в условиях острой гипоксической гипоксии // Фундаментальные исследования. 2006. № 1. С. 17–21. URL: http://www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=1814 (дата обращения: 21.11.15).
3. Ведерко О. В. Эффекты информационного стресса у человека: соотношение биохимических параметров и сердечного ритма / О. В. Ведерко, Н. Н. Данилова, Н. В. Гуляева, Б. М. Коган, Н. А. Лазарева, М. В. Онуфриев // Нейрохимия. 2003. Т. 20. № 1. С. 68–74. URL: <http://www.fesmu.ru/elib/Article.aspx?id=92730> (дата обращения: 20.11.15).
4. Грибкова Е. С., Кормилицына Н. К. Показатели физиологических систем в условиях адаптации к обучению у студенток-бакалавров // Инновационное развитие современной науки. Уфа: Аэтерна, 2015. Ч. 2. С. 38–40.

5. Дубовицкая Т. Д., Крылова А. В. Методика исследования адаптированности студентов в вузе // Электронный журнал «Психологическая наука и образование». 2010. №2. URL: http://psyedu.ru/journal/2010/2/Dubovitskaya_Krilova.shtml (дата обращения: 20.11.15).
6. Коваль В. Т. Технические и физиологические особенности мониторинга гемодинамики / В. Т. Коваль, А. Н. Розенбаум, Г. А. Заяц, Н. С. Сошина, А. В. Ким // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. С. 167–176. URL: <http://izv-tn.tti.sfedu.ru/?p=19174> (дата обращения: 21.11.15).
7. Коновалова Г. М. Влияние условий профессиональной деятельности лиц опасных профессий на показатели кардиореспираторной системы и перекисного окисления липидов // Известия Сочинского государственного университета. Сочи: Сочинский государственный институт курортного дела и туризма. 2013. №4–2 (28). С. 164–168.
8. Красильников И. А., Константинов В. В. Социально-психологическая адаптация личности и стратегии разрешения внутренних конфликтов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. №4 (4). С. 932–937.
9. Криштоп В. В., Пахрова О. А. Варианты перестроек гемореологических показателей у больных ревматоидным артритом // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. №9. С. 63–69. URL: http://www.rae.ru/upfs/?section=content&op=show_article&article_id=5790 (дата обращения: 21.11.15).
10. Криштоп В. В., Пахрова О. А. Применение кластерного и корреляционного анализа для оценки гемореологических показателей у больных эссенциальной артериальной гипертензией // Успехи современного естествознания. 2014. №9–2. С. 11–16. URL: http://www.rae.ru/use/?article_id=10003184&op=show_article§ion=content (дата обращения: 20.11.15).
11. Криштоп В. В., Пахрова О. А., Стрельников А. И. Основы системной гемореологии. Иваново, 2015. 128 с.
12. Парахонский А. П., Цыганок С. С. Диагностика и реабилитация больных с нейрогормональными расстройствами // Современные наукоемкие технологии. 2008. №6. С. 39–40. URL: http://www.rae.ru/snt/?article_id=4842&op=show_article§ion=content (дата обращения: 21.11.15).
13. Сланевская Н. М. Мозг, мышление и общество. СПб.: Центр междисциплинарной нейронауки. 2012. Ч. 1. С. 26–39.

УДК 576.3

Мельченко Е. А. [Melchenko E. A.]

ПРИМЕНЕНИЕ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ БИОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕМБРАН ЭРИТРОЦИТОВ

Application of atomic-power microscopy at research of biophysical properties of red blood cells membranes

Исследование морфологических параметров биологических структур является важной задачей в диагностике, поскольку размеры и форма некоторых структур во многом определяют их физиологические свойства. По мнению исследователей, эритроцит наряду с узкоспецифическими функциями обладает общностью метаболических процессов, легко выделяется и в настоящее время признан доступной моделью живой клетки организма. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) является одним из методов комплексного исследования поверхностей различных объектов в микро- и нанометровом диапазоне размеров [3]. Регуляция метаболизма клетки и его адаптационная реорганизация в ответ на различные воздействия в значительной степени связаны с физико-химическими процессами, происходящими в ее мембране. Применение АСМ предоставляет возможность непосредственного наблюдения тех молекулярных структурных изменений, на существование которых ранее указывали лишь косвенные данные. Кроме получения с высоким разрешением количественных данных о геометрии объектов, АСМ позволяет также получать топографические образы таких физических параметров мембран, как твердость, адгезивная способность и молекулярное трение.

Ключевые слова: биофизические свойства мембраны, эритроцит, атомно-силовая микроскопия.

Research of morphological parameters of biological structures is an important task in diagnostics, as sizes and form of some structures determine their physiological properties. According to researchers, the erythrocyte possesses a community of metabolic processes, is easily allocated and now is recognized available model of living cell of an organism. An Atomic-power microscopy (AFM) is one of methods of complex research of surfaces of different objects in micro- and nanometer range of sizes. Adjusting of metabolism of cage and its adaptation reorganization in response to various influences are substantially connected with the physical and chemical processes happening in its membrane. The use of AFM provides the possibility of direct observation of those molecular structural changes, which had previously indicated only indirect data. Except receiving with high resolution of quantitative data on geometry of objects of AFM allows to receive also topographical images of such physical parameters of membranes as hardness, adhesive ability and molecular friction.

Key words: biophysical properties of the membrane, erythrocyte, atomic-power microscopy.

Необратимые изменения, затрагивающие биофизические свойства эритроцита, ухудшают реологические свойства крови и, как следствие, дают начало развитию застойных явлений, повреждению стенок эндотелия сосудов и развитию сосудистых заболеваний. Вязкость крови зависит от множества факторов, но к наиболее определяющим нормальную вязкость крови можно отнести: биохимические показатели крови, в том числе биофизические свойства красных клеток крови (агрегация и деформабельность эритроцитов), белковый состав плазмы крови. Уменьшение объема плазмы крови и увеличение массы эритроцита приводит к повышению уровня гематокрита с последующим увеличением общей вязкости крови. Причиной повышенного уровня гематокрита могут заболевания различной этиологии, например гипергликемия, заболевания сердца и т. д. [1].

Изменение формы эритроцитов является результатом нарушения внутриклеточного обмена или возникает вследствие внешних физико-химических и иммунологических воздействий. Атомно-силовая микроскопия является инновационным методом изучения структуры и формы клеток. Преимуществом данной микроскопии можно считать получение информации о микро- и нано-архитектонике поверхности клетки, а также о структурах подмембранных слоев. Разработка метода атомно-силовой микроскопии положила начало новому периоду в исследовании эритроцитов периферической крови. С помощью данного метода стало возможным исследование геометрических изменений в эритроцитах и получение более полной информации о состоянии эритрона по сравнению с традиционными лабораторными методами [2].

Целью данного исследования явилось исследование биофизических свойств мембран эритроцитов методом атомно-силовой микроскопии.

Материал и методы. В соответствии с поставленной целью в ходе наблюдения за состоянием больных гипертонической болезнью (ГБ) в МБУЗ «Городская клиническая больница №3», было выполнено исследование крови, охватывающее 30 человек из них 12 здоровых, 18 больных ГБ в возрасте 45–55 лет. Изучение строения мембраны эритроцитов периферической крови пациентов на субмикронном уровне осуществлялось при помощи сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) «Интегра

Прима». В оптическом микроскопе находили зону одиночных клеток в монослое, после чего переносили интересующую зону на предметный столик сканирующего зондового микроскопа. Использовался кантилевер NSG 20 фирмы NT-MDT.

В каждом образце исследовалось не менее 100 клеток. Осуществляли замер диаметра и высоты эритроцитов (рис. 1).

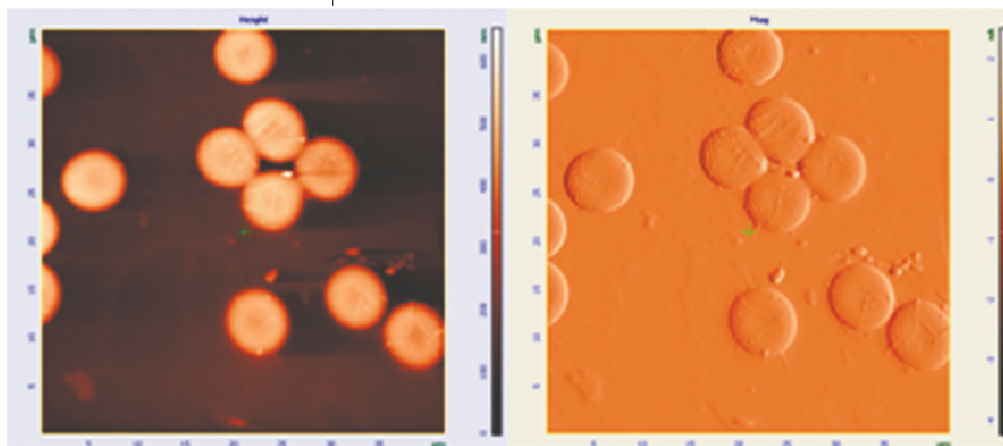


Рис. 1. Этапы работы в программе.

Сканирование участков проводилось в различных режимах полу-контактной атомно-силовой микроскопии, основанной на регистрации параметров взаимодействия колеблющегося кантилевера с поверхностью и с последующей обработкой изображения. Благодаря встроенной системе наблюдения с разрешением до 1 мкм можно в реальном времени наблюдать за процессом сканирования. Атомно-силовая микроскопия позволила получить двухмерное и трехмерное изображение эритроцитов в формате 3D. Были измерены величины высоты и диаметра. Результаты представлены на рис. 2.

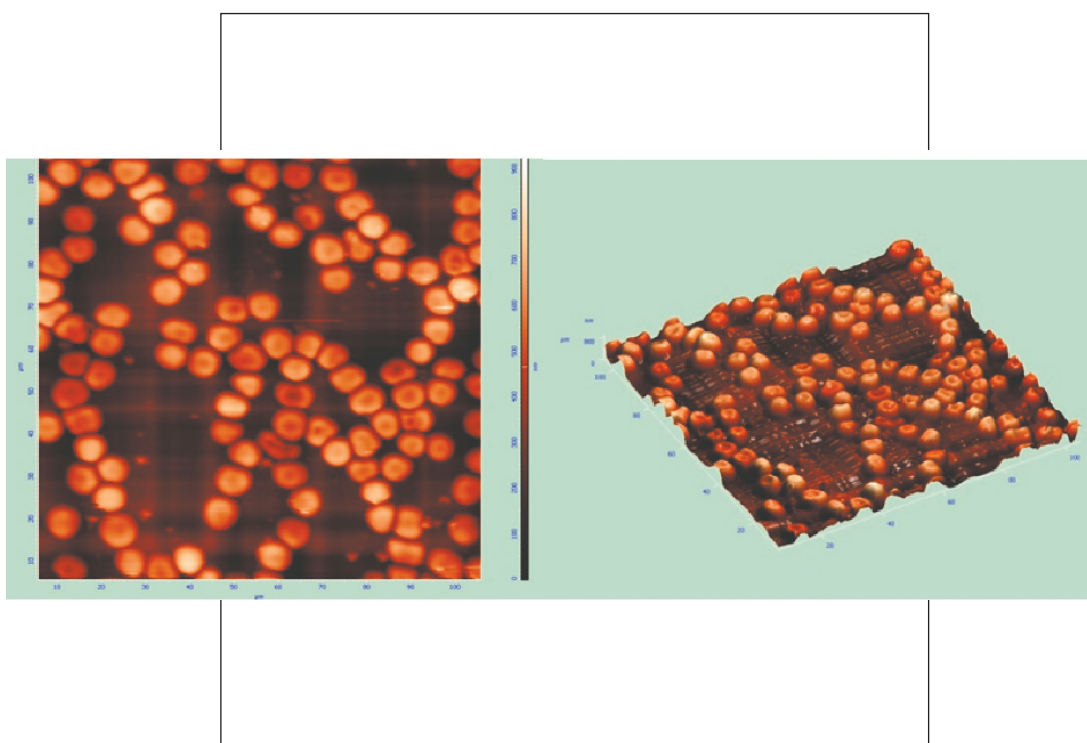


Рис. 2. 2D- и 3D-изображение эритроцитов, полученное при помощи АСМ «Интегра Прима».

Статистическую обработку данных проводили с привлечением методов параметрического анализа с использованием пакета Microsoft Excel. Определяли основные статистические характеристики: среднее (X), ошибку среднего (m) и стандартное отклонение (б). Достоверность различия средних определяли по критерию Стьюдента (t) для коэффициентов вариации, уровень значимости (p) выбран менее 0,05.

Таблица 1. Изменение геометрических показателей (высоты и диаметра) эритроцитов в группах здоровых людей и больных гипертонической болезнью (X + m; P < 0,05)

	Группы	Геометрические показатели, мкм. X + m
высота	1	0,402 ± 0,017
	2	0,454 ± 0,034
P	P	P < 0,01
Диаметр	1	6,18 ± 0,16
	2	6,85 ± 0,15
P	P	P < 0,01

Примечание: 1 – группа здоровых;
2 – группа больных гипертонической болезнью.

В результате статистического анализа полученных в эксперименте данных выявлено, что у группы здоровых людей эритроциты имеют достоверно меньшую высоту и диаметр по сравнению с группой больных (ГБ): здоровые – h – 0,402 ± 0,017 мкм; d – 6,18 ± 0,16 мкм;

больные ГБ – $h = 0,454 \pm 0,034$, $d = 6,85 \pm 0,15$ мкм. Данная зависимость объясняется приспособительными механизмами организма, при которых эритроциты здоровых людей более плотные по сравнению с таковыми у людей больных ГБ.

Таким образом, изучив геометрические показатели эритроцитов периферической крови здоровых людей и больных гипертонической болезнью, было выявлено достоверное различие в размерах, говорящее о приспособительной реакции организма и периферического звена эритро-на при изменении морфологии клеток крови.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондарь Т.П. Изменение показателей гемопоза у больных сахарным диабетом 2-го типа в зависимости от наличия сосудистых осложнений / Т.П. Бондарь, О.И. Анфиногенова, М.В. Бондарь, А.А. Солдатов // Саратовский научно-медицинский журнал. 2010. Т. 6. № 4. С. 783–786.
2. Бондарь Т.П., Печенкин Е.В., Петровский С.А. Исследование гемореологических показателей при осложненном сахарном диабете // Клиническая лабораторная диагностика. 2013. № 9. С. 89.
3. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Изд-во «Техносфера», 2005. 182 с.

УДК 612. 612.133

**Перхурова В.Д. [Perhurova V.D.],
Цатурян Л.Д. [Tsaturyan L.D.],
Елисеева Е.В. [Elisseeva E.V.]****ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ
СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ
У СТУДЕНТОВ С РАЗЛИЧНЫМ УРОВНЕМ
НЕЙРОТИЗМА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ
ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ****Functional capacities of the cardiovascular
system in students with different neurotism's
levels**

У студентов с различным уровнем нейротизма по величине адаптационного потенциала (АП) определяли функциональные возможности сердечно-сосудистой системы при выполнении физической нагрузки. Анализ полученных данных показал, что исходная средняя величина АП у студентов с высоким и низким уровнем нейротизма была выше, чем у студентов с нормальным уровнем нейротизма. После выполнения дозированной физической нагрузки по методике Гарвардского степ-теста показатели АП у студентов возрастали, причем в большей степени у лиц с высоким уровнем нейротизма, соответствующим уровню напряжения регуляторных систем. Установлено, что как низкий так и в большей степени высокий уровень нейротизма отрицательно сказываются на процессах адаптации организма к физической нагрузке. Адаптационные реакции сердечно-сосудистой системы при выполнении физической нагрузки протекают с выраженным напряжением механизмов адаптации, при которых организм испытывает риск снижения функциональных возможностей.

Ключевые слова: адаптационный потенциал, нейротизм, сердечно-сосудистая система, физическая нагрузка.

Functional capacities of the cardiovascular system during exercises were studied in students with the different neurotism's levels basing on the adaptation potential's data (AP). It was analyzed that initial AP was more in students with high and low neurotism levels than in students with normal neurotism. After exercise stress (by Harvard Step-test methodic) AP increased mostly in persons with high neurotism in accordance with the degree of regulation systems' tension. It was stated that low neurotism, and more often high neurotism, acted negatively on the adaptation to exercise stress. Adaptive reactions of the cardiovascular system during exercises proceeded with severe stress of adaptation mechanisms, under the risk of decreasing adaptive capacities of the organism.

Key words: adaptation potential, neurotism, cardiovascular system, exercises.

Актуальность.

Одной из фундаментальных характеристик индивидуальных особенностей человека является способность его организма адекватно приспосабливаться к изменяющимся условиям внешней и внутренней среды. Адаптация организма достигается активацией четко скоординированных регуляторных механизмов, взаимодействием специализированных функциональных систем организма. При этом главной адаптивной системой, которая чутко реагирует на изменения констант гомеостаза, является сердечнососудистая система, лимитирующая умственную и физическую работоспособность. Именно эта система является интегративным показателем, наиболее объективным индикатором адаптационных реакций организма, она играет ведущую роль в обеспечении процессов адаптации [1, 2].

Обучение в вузе сопровождается мобилизацией резервных возможностей организма для адекватной адаптации к новым условиям, ритмам студенческой жизни. В современных физиологических исследованиях все возрастающее внимание уделяется изучению вопросов адаптации студентов, особенно младших курсов в процессе обучения, что позволяет выявлять нерациональные пути адаптации, своевременно распознать случаи дезадаптации, более эффективно прогнозировать возникновение и профилактику заболевания.

Целью настоящей работы явилось исследование резервных возможностей сердечно-сосудистой системы у студентов с различным уровнем нейротизма при выполнении дозированной физической нагрузки.

Материал и методы.

Исследование проведено в осеннее время на 124 (89 – девушек, 35 – юношей) здоровых студентах 2 курса медицинского университета в возрасте 18–20 лет. Тестовым методом Айзенка определяли у студентов уровень нейротизма, измеряли у них рост, вес, артериальное давление (АД), вели подсчет пульса на лучевой артерии, учитывали возраст студента. Дозированную физическую нагрузку студентам предъявляли по методике Гарвардского степ-теста. Оценку резервных возможностей сердечнососудистой системы проводили по гемодинамическим

показателям сердечнососудистой системы и величине адаптационного потенциала (АП) или индекса функциональных изменений (ИФИ), разработанного А.Б. Берсеньевой и Ю.П. Зуихиным [3]. Адаптационный потенциал сердечно-сосудистой системы у студентов вычисляли до выполнения физической нагрузки, на 30-й сек., 2-й и 3-й минуте после выполнения дозированной физической нагрузки. Оценку АП осуществляли по общепринятой шкале: если АП был меньше 2,60, то это оценивалось как удовлетворительная адаптация при наличии достаточных функциональных возможностей организма; при значениях АП равного 2,60–3,09 констатировалось напряжение механизмов адаптации, при котором имеется риск снижения функциональных возможностей организма; и если значение АП было выше 3.01, то это трактовалось как снижение функциональных возможностей организма, неудовлетворительное течение адаптации, при этом появляется высокий риск развития патологических изменений в организме.

Анализ полученных данных проводился с использованием описательной статистики прикладной программы Microsoft Excel for Windows 2007. Вычислялись среднее значение (M), стандартная ошибка среднего (m). Статистическая значимость различий оценивалась по t-критерию Стьюдента для независимых выборок при условии нормального распределения, определяемого по значениям асимметрии и эксцесса. За критический уровень значимости различий принимали значение $p \leq 0,05$ (95%).

Результаты исследования и их обсуждение.

Установлено, что среди обследованных студентов 43% составили студенты с высоким уровнем нейротизма, 37% с нормальным уровнем нейротизма и 20% выявили студентов с низким уровнем нейротизма.

Анализ данных результатов уровня артериального давления показал, что у студентов с пониженным уровнем нейротизма средний показатель систолического АД до проведения пробы был несколько выше, чем у студентов с нормальным и повышенным уровнем нейротизма. На 30 секунде после проведения пробы у студентов с повышенным уровнем нейротизма прирост систолического давления составил $25,6 \pm 2,1$ мм рт. ст., у студентов с нормальным уровнем нейротизма – $21 \pm 1,2$ мм рт. ст. и у студентов с пониженным уровнем нейротизма – $23,6 \pm 1,4$ мм рт. ст.

Результаты проведенного исследования показали, что средняя частота пульса у студентов до физической нагрузки в покое составила $77,7 \pm 0,5$ уд./мин. После физической нагрузки на 30-й секунде частота пульса у них увеличивалась на $41,4 \pm 1,1$ уд./мин., на второй минуте после физической нагрузки этот показатель увеличивался в среднем на $26,6 \pm 0,007$ уд./мин. и на третьей минуте он возрастал на $14,2 \pm 1,1$ уд./мин. Средние данные частоты пульса у юношей и девушек были разные, причем, у девушек они были выше, чем у юношей. Существенно отличалась частота пульса у студентов с различным уровнем нейротизма как до, так и после проведения пробы. У студентов с повышенным уровнем нейротизма наибольшая частота пульса отмечалась на 30-й секунде после проведения пробы и в среднем составила $127,2 \pm 1,3$ уд./мин. На второй минуте у этих студентов частота пульса равнялась $111,9 \pm 0,9$ уд./мин. и на третьей ми-

нута после проведения пробы частота пульса у них составила $102,9 \pm 1,1$ уд./мин. У студентов с нормальным и пониженным уровнем нейротизма показатели частоты пульса до нагрузки были ниже, чем у студентов с высоким уровнем нейротизма, а после выполнения физичес-

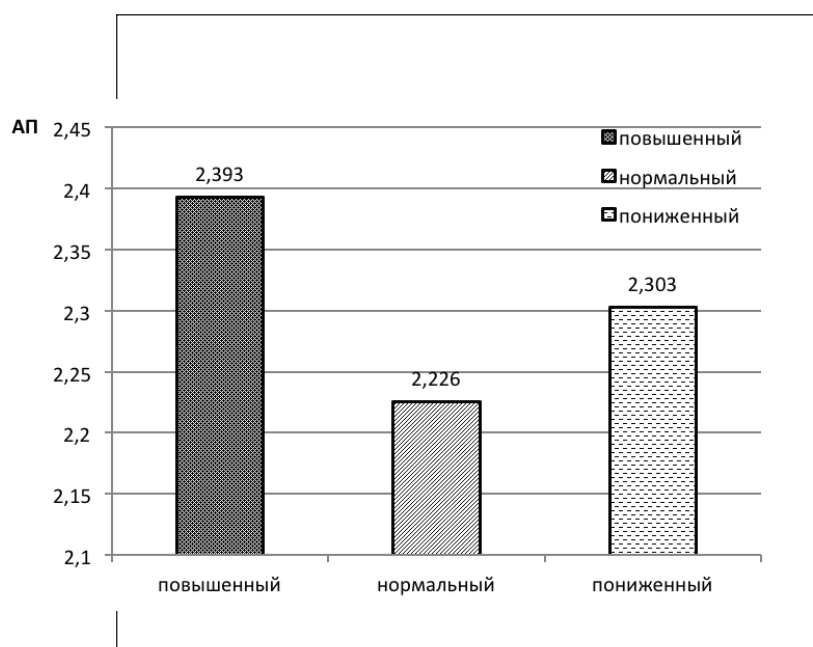


Рис. 1. Средние значения адаптационного потенциала у студентов до физической нагрузки.

кой нагрузки частота пульса хотя и повышалась, но на меньшую величину, чем у студентов с высоким уровнем нейротизма.

Величина адаптационного потенциала у студентов с высоким и низким уровнем нейротизма до выполнения Гарвардского степ-теста была выше, чем у студентов с нормальным уровнем нейротизма (рис. 1).

После выполнения физической нагрузки показатели АП у студентов возрастали, причем, в большей степени, у лиц с высоким уровнем нейротизма, достигая значения соответствующего уровню напряжения регуляторных систем. После выполнения дозированной физической нагрузки самый значительный прирост показателя АП у студентов отмечался 30-й секунде (рис. 2).

На второй и третьей минуте после проведения физической нагрузки величина АП снижалась во всех трех группах студентов, однако, на третьей минуте после нагрузки прибавка АП у студентов с низким уровнем нейротизма оказалась более высокой, чем у студентов с нормальным и высоким уровнем нейротизма, то есть восстановительный процесс у них протекал медленнее.

Сравнительный анализ данных АП до и после физической нагрузки выявил, что у студентов с высоким уровнем нейротизма средняя величина АП после физической нагрузки была самой высокой и составила 3,014, у них отмечался наибольший прирост его величины (на 28,7%). Наименьший прирост показателя АП отмечен у студентов с нормальным уровнем нейротизма и значение АП у них после физической нагрузки составило 2,732. Средний показатель АП у студентов с низким уровнем нейротизма после выполнения физической нагрузки составил 2,884, что отражает незначительное напряжение механизмов адаптации.

Таким образом, в результате проведенного комплексного исследования было установлено, что величина адаптационного потенциала у студентов с различным уровнем нейротизма была разной, при этом, как низкий, так и, в большей степени, высокий уровень нейротизма отрицательно сказывается на процессах адаптации организма к дозированной физической нагрузке. Адаптационные реакции сердечно-сосудистой системы при выпол-

нении дозированной физической нагрузки у студентов с высоким уровнем нейротизма протекают с выраженным напряжением механизмов адаптации, при которых организм испытывает риск снижения функциональных

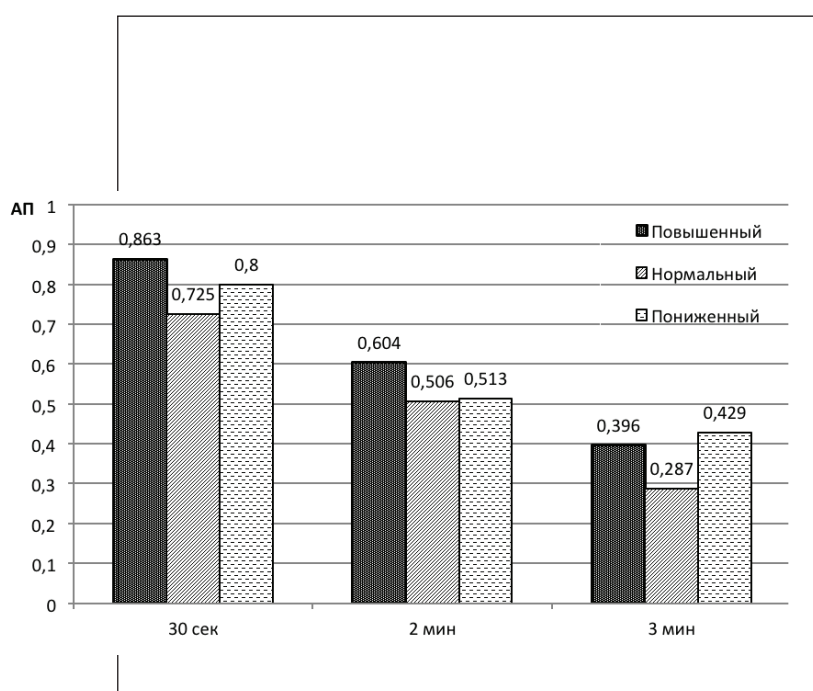


Рис. 2.

Средние значения прироста адаптационного потенциала у студентов после физической нагрузки.

возможностей. Физическая нагрузка у лиц с высоким уровнем нейротизма сопровождается значительной мобилизацией функциональных резервных возможностей сердечно-сосудистой системы, что может приводить к истощению энергетических запасов, метаболических ресурсов, обеспечивающих процессы адаптации.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ
СПИСОК:**

1. Баевский Р.М., Берсенева А.П. Оценка адаптационных возможностей организма и риск заболевания. М.: Медицина, 1997.
2. Баевский Р.М., Берсенева А.П. Адаптационные возможности организма и понятия физиологической нормы // Тезисы докладов XVIII съезда физиологического общества им. И.П. Павлова. Казань, 2001. С. 304.
3. Берсенева А.П., Зуихин Ю.П. Оценка функциональных возможностей системы кровообращения на доврачебном этапе диспансеризации взрослого населения // Информационное письмо для поликлиники и медсангоссистем. М., 1987.

УДК 612.
111.45 [53–57]

**Селимов М. А. [Selimov M. A.],
Демченков Е. Л. [Demchenkov E. L.],
Нагдалян А. А. [Nagdalian A. A.],
Гатина Ю. С. [Gatina Y.S.]**

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ МОРФОЛОГИИ АНОМАЛЬНЫХ ФОРМ ЭРИТРОЦИТОВ МЕТОДАМИ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ*

Features morphology abnormal forms of erythrocytes by atomic force microscopy

Изучалась возможность применения атомно-силовой микроскопии (АСМ) для качественной оценки морфологии и визуализации аномальных форм красных кровяных телец (эритроцитов), в сравнении с традиционными методами оптической микроскопии. Проведено сопоставление методов пробоподготовки, предложенных другими авторами в ранее проведенных исследованиях, выбран оптимальный, не оказывающий существенного влияния на изменение морфологических особенностей клетки, метод. Воздействием на эритроциты солями тяжелых металлов получены формы эритроцитов, отличающиеся от физиологически нормальной. Установлено, что атомно-силовая микроскопия является важным инструментом, позволяющим визуализировать морфологию аномальных форм клеток крови, а при использовании программных инструментов (Nova PX) возможно получение более полной картины размерных характеристик и параметров эритроцитов. Показана возможность применения атомно-силовой микроскопии в исследованиях морфологии и визуализации аномальных форм эритроцитов.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, красные кровяные тельца, размеры и морфология эритроцитов, соли тяжелых металлов.

Annotation The possibility of using atomic force microscopy (AFM) to qualitatively assess the morphology and the visualization of abnormal forms of red blood cells (RBCs), in comparison with traditional methods of optical microscopy, was studied in this article. The analysis of sample preparation methods of another authors showed what kind of methods are better and more useful. Based on that analysis, the authors chose optimal method without significant effect on morphological features of cells. The authors identified abnormal forms of the red blood cells under heavy metals salts effect. It was established that atomic force microscopy is an important tool for visualization the morphology of abnormal forms of red blood cells. The authors concluded that usage of software tools (Nova PX) provides researches by complete pictures of the dimensional characteristics and parameters of red blood cells.

Keywords: atomic force microscopy, red blood cells, the size and morphology of the red blood cells, salts of heavy metals.

* Исследования частично проведены при финансовой поддержке Министерства образования и науки России, в рамках выполнения базовой части государственного задания (2014/216).

Введение.

Атомно-силовая микроскопия вид зондовой микроскопии, в основе работы которой лежит силовое взаимодействие между зондом и поверхностью, для регистрации которого используются специальные зондовые датчики, представляющие собой упругую консоль с острым зондом на конце. Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли, которая перемещаясь относительно поверхности и реагируя на силовое взаимодействие, регистрирует ее рельеф [8].

В настоящее время атомно-силовая микроскопия активно используется для изучения структурных особенностей биологических макромолекул (белков, ДНК), поскольку позволяет получать изображения с разрешением в несколько нанометров. Наряду с исследованием сухих образцов, АСМ позволяет исследовать молекулы и в буферных растворах. Для получения изображений методом АСМ, исследуемые объекты должны быть зафиксированы на какой-либо поверхности. При исследовании биологических объектов в качестве подложки обычно используется: кристаллическая слюда, стекло, сапфировые пластины и т.д. В большинстве случаев используются слюда, поскольку она имеет атомарно-гладкую поверхность [7].

На сегодняшний день АСМ становится одним из самых перспективных методов изучения структурных особенностей макромолекул, поскольку позволяет получать изображения объектов с высоким разрешением, сопоставимым с уровнем рентгеноструктурного анализа, в условиях, при которых макромолекулы не подвергаются жесткой обработке и проявляют свою природную активность. Кроме того, атомно-силовая микроскопия дает возможность не только визуализировать объекты на молекулярном уровне, но и изучать свойства индивидуальных макромолекул: распределение поверхностных зарядов, подвижность отдельных участков, конформационные изменения в зависимости от условий, силу специфического взаимодействия между молекулами. С помощью атомно-силовой микроскопии можно наблюдать в реальном времени за сборкой макромолекулярных комплексов, распределением белков на поверхности клетки, особенностями внутриклеточного транспорта макромолекул [4].

Так, в последнее время наиболее интересные и полные экспериментальные данные о структуре эритроцита и строении цитоскелета были получены методами атомно-силовой микроскопии (АСМ). [3, 12]

В работе Нагорнова Ю.С. [9] так же связанной с атомно-силовой микроскопией, был проведен расчет объема эритроцита по данным измерения полученного скана поверхности мембраны, а затем произведен разрез скана эритроцита по диагонали с целью измерения его высотных геометрических характеристик.

АСМ визуализирует микрообъекты с высоким пространственным разрешением и позволяет проводить локальные микромеханические испытания. В работах [11, 13], авторами было показано, что АСМ, являясь современным нанотехнологическим инструментом для измерения локальной упругости мембран клеток, может быть использована для определения модуля Юнга и поверхностного потенциала эритроцитов, эритроцитсодержащих сред и других компонентов крови. В ходе другого исследования было выявлено статистически значимое сопряженное повышение значений модуля Юнга и поверхностного потенциала красных кровяных телец, сопровождающееся изменением их формы до эхиноцитов и сфероэхиноцитов после длительного хранения эритроцитсодержащих сред в течение 35 суток при стандартных температурных условиях +4 °С [5].

В работе [6] были рассмотрены три способа подготовки эритроцитов для исследования методами АСМ: без фиксации клеток и с фиксацией в растворах глутарового альдегида с концентрациями 0,5 и 2,5 %, с целью выявления наиболее подходящего для получения качественных АСМ-изображений клеток крови.

Использование таких методов визуализации биологических объектов, как оптическая и электронная

микроскопия, позволяющих построить 2-мерное изображение объекта, оценить его длину и ширину, не могут в должной мере обеспечить достоверной информацией о параметрах исследуемого образца, в том числе его размерных характеристик, включая особенности рельефа и топографии поверхности. Еще одним минусом таких методов микроскопии можно считать процесс пробоподготовки образцов, который порой требует проведения целой серии манипуляций, обработки образцов контрастирующими агентами или напыления металлических частиц на поверхность исследуемого образца, что в конечном итоге может сказаться на достоверности результатов исследования.

Целью данной работы было рассмотрение возможности исследования особенностей морфологии, а так же визуализация размерных характеристик аномальных форм эритроцитов методами атомно-силовой микроскопии, которая, с одной стороны позволяет минимизировать процедуру пробоподготовки самого образца, а с другой – получить более наглядную картину особенностей рельефа и топографии поверхности. В задачи данного исследования входило:

- смоделировать объект исследования, а именно аномальную форму эритроцита, путем обработки взвеси из красных кровяных телец солями тяжелых металлов;
- визуализировать полученные эритроциты;
- сравнить сканы с изображениями, полученными с помощью оптического микроскопа;
- провести измерение морфологических особенностей аномальных форм клеток.

Материал и методы.

Для проведения эксперимента использовали эритроциты крыс линии *Wistar*. Из множества вариантов нанесения эритроцитов на подложку – простой мазок, сдувание капли суспензии эритроцитов струей воздуха, создание монослоя путем центрифугирования, различные варианты осаждения эритроцитов из суспензии, был выбран последний. Поскольку данный метод подготовки образцов не оказывает существенного влияния на изменение формы эритроцитов [2]. Образцы были подготов-

лены путем осаждения из суспензии на покровные стекла, которые предварительно обработали 1 % глутаровым альдегидом. В проведенных исследованиях по созданию раствора для фиксации эритроцитов оптимальным было применение 2,5 % глутарового альдегида, приготовленного на 20 мМ Нерес буфере и растворе Рингера-Локка. Глутаровый альдегид снижает pH и оказывает существенное воздействие на эритроциты. Действие альдегидов сводится к образованию связей между молекулами клеточных мембран и мембран органелл, в прочную единую сеть за счет «сшивания», в основном, клеточных белков [10]. При данном методе фиксации клетка не расплывается по подложке и значения ее макроморфометрических параметров максимально приближены к значениям нативных эритроцитов (высота клетки, глубина центральной впадины). Однако, при получении изображений большей разрешающей способности отмечается сглаженность рельефа поверхности мембраны и оценить мембранные наноструктуры при данном способе фиксации не представляется возможным [1].

Подготовка препаратов для АСМ-сканирования.

Сухие препараты эритроцитов готовились из 50 мкл эритроцитов с 1950 мкл раствора 10 мкг/л CdCl_2 . Далее пробы были выдержаны в шейкер-термостате продолжительностью 1 час при скорости 300 об/мин и температуре 37 °C, после чего образцы были подвергнуты центрифугированию. По окончании центрифугирования инкубационная среда была слита, и к образцам доливалось по 1 мл фиксирующего раствора. Полученный состав наносили на покровное стекло и равномерно распределяли по поверхности. Препарат высушивали на воздухе в течении 20 мин. при комнатной температуре, после чего подвергали сканированию на АСМ. По такому же принципу, но без использования CdCl_2 был подготовлен и контрольный образец.

Атомно-силовая микроскопия.

Сканирование проводилось с помощью атомно-силового микроскопа фирмы «NT-MDT» (г. Зеленоград, Россия), модель «Ntegra Life». Для работы использовали кантилеверы модели НА_NC (Etalon) сторона В. Радиус закругления < 10 нм, длина балки 124 мкм. Обработка и подсчет данных производились с помощью специализированного программного обеспечения «Nova». Сканирование производилось в полуконтактном режиме при генерируемой частоте 153 кГц. Сканируемая площадь контрольного образца составила $6,2 \times 6,2$ мкм, а обработанного CdCl_2 $8,6 \times 8,6$ мкм.

На препарате, из равномерно распределенных по поверхности объектов, в случайном порядке выбирался эритроцит, на поверхности, которого явно выделялись несвойственные для физиологически нормальных форм образования. Полученные данные обрабатывались с использованием прилагаемой к микроскопу компьютерной программы «NovaPX» для построения горизонтального и вертикального профиля поверхности эритроцита.

Результаты и обсуждение.

В результате АСМ-сканирования поверхности покровного стекла исследуемого образца с зафиксированными эритроцитами получены изображения красных кровяных телец, форма, морфологические особенности и размеры которых имели несвойственную эритроцитам форму. Физиологические аномалии в исследуемых образцах вероятнее всего обусловлено взаимодействием солей тяжелых металлов с мембранами клеток. Для сравнения с нормальной формой, опытные образцы при оптической и атомно-силовой микроскопии сопоставлялись с контрольными образцами.

На полученном с помощью оптического микроскопа изображении (рис. 1 а) представлена группа красных кровяных телец, которые имеют явные отклонения по форме от физиологически нормальных клеток. На поверхности клеток хорошо заметны «контрастные» области, которые представляют собой места с аномальной морфологией. В другой части рисунка (рис. 1б) можно наблюдать эритроциты, имеющие физиологи-

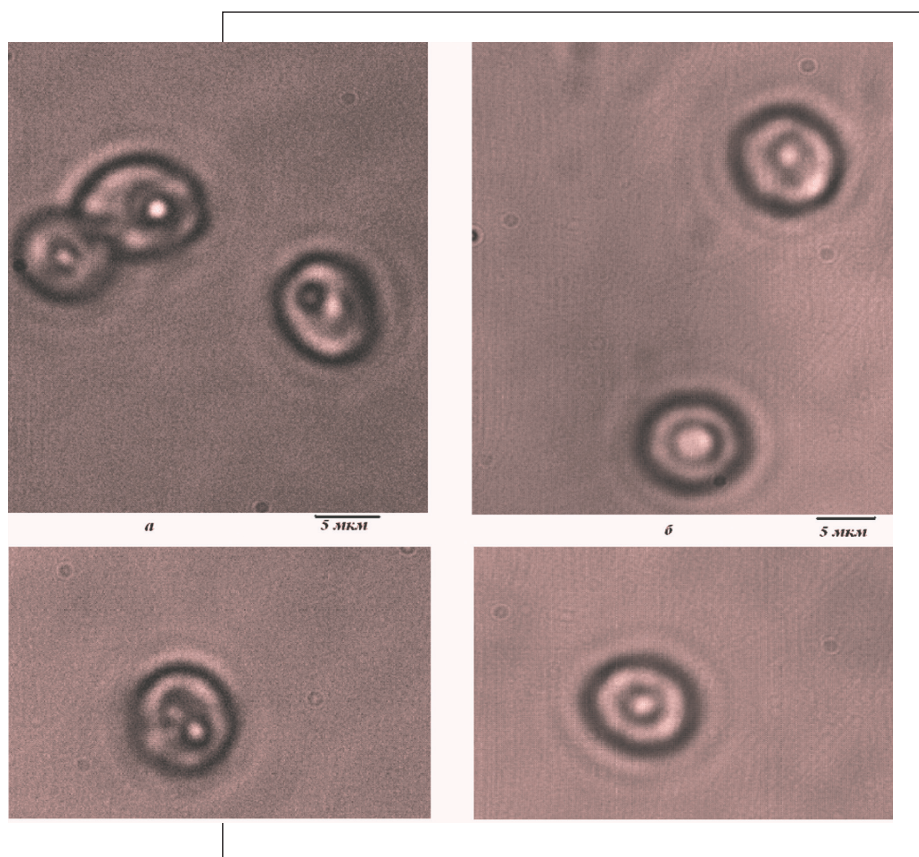


Рис. 1.

Красные кровяные тельца (эритроциты) под оптическим микроскопом. а)поврежденные формы клеток; б)контрольный образец.

чески нормальную форму, которые так же получены с помощью оптической микроскопии. Данные эритроциты были идентифицированы в контрольных образцах. С помощью оптической микроскопии достоверно визуализировать размерные параметры мест с аномальной морфологией не представляется возможным. На рисунке 1 представлен тот же образец, который впоследствии подвергался сканированию с помощью атомно-силовой микроскопии.

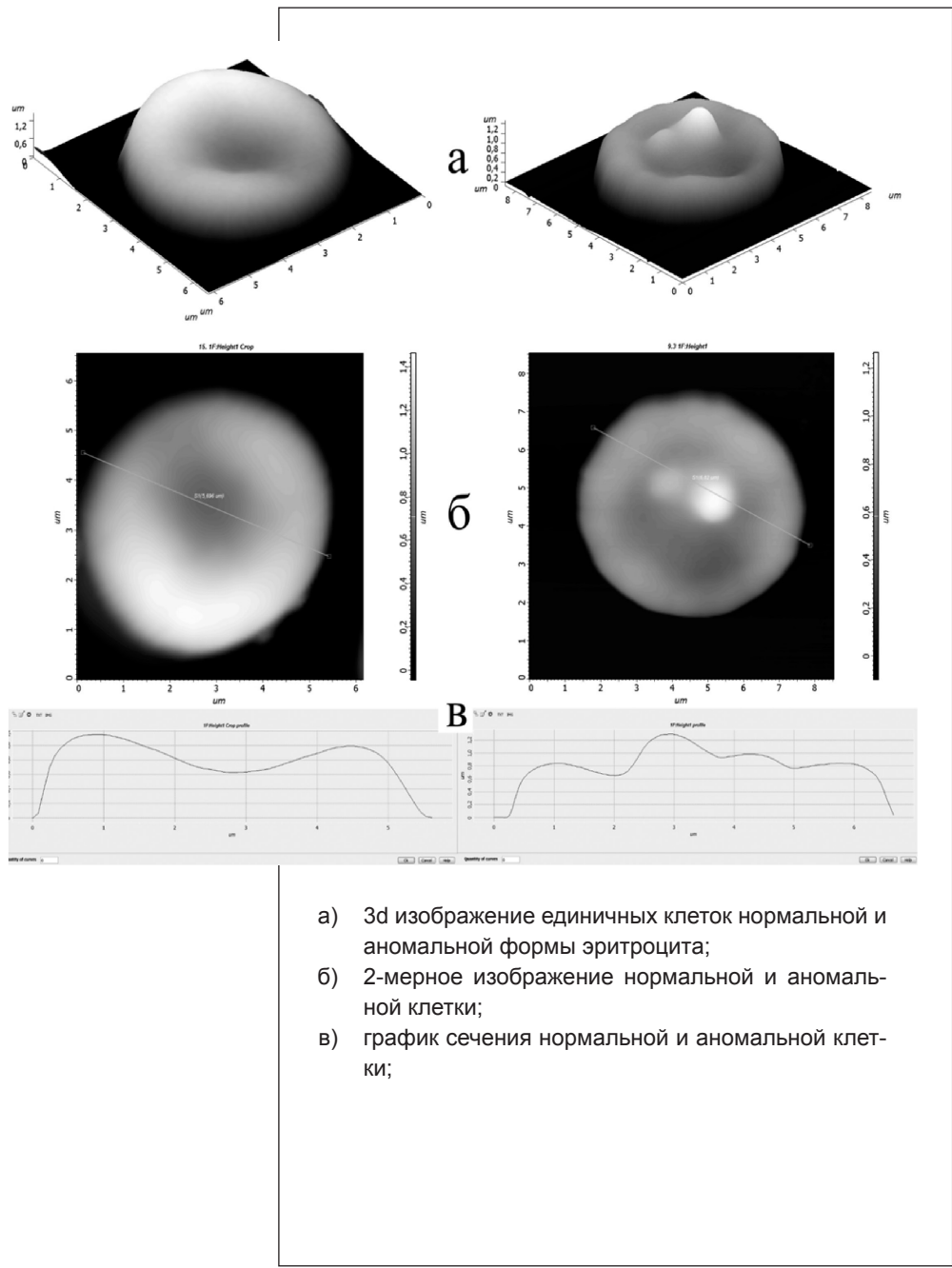


Рис. 2. Изображение клетки эритроцита аномальной формы, полученное с помощью АСМ (отсканированная на воздухе).

При АСМ сканировании образцов для сравнения было получено 3-х мерное изображение единичного эритроцита нормальной и аномальной форм (рис. 2а). На изображении поврежденного эритроцита в районе впадины отчетливо наблюдается наличие «сросшихся выростов» холмистой формы, резко контрастирующих по отношению к поверхности образца. Возможность построения 3-мерной картины изображения позволяет отчетливо наблюдать форму и параметры несвойственных нормальной форме эритроцитов образований. На 2-мерном изображении эритроцитов (рис. 2б) можно выявить незначительную разницу в диаметре представленных единичных клеток, что, скорее всего так же обусловлено повреждающим действием солей тяжелых металлов.

Пакет прикладных программ (NovaPX), позволяет оценить размеры, форму и характер изменений происходящих с клеткой под воздействием солей тяжелых металлов. На рисунке 2в представлен график сечения, характеризующий особенности изменений в морфологии клетки.

В рамках исследования единичной аномальной формы клетки, были построены вертикальный и горизонтальный профили сечения изучаемого объекта, на которых наглядно отображены форма, размер и высота аномальной клетки крови (рис. 3–4).

По данным атомно-силовой микроскопии (рис. 3–4) можно определить не только размеры объекта, но и размеры входящих в состав или состоящих во взаимодействии с исследуемым образцом компонентов. Так, ширина (диаметр) исследуемого образца эритроцита находится в пределах 6–6,5 мкм, а высота данной аномальной формы клетки крови составляет около 1,5 мкм. Отчетливо видны очертания объема самой клетки, а так

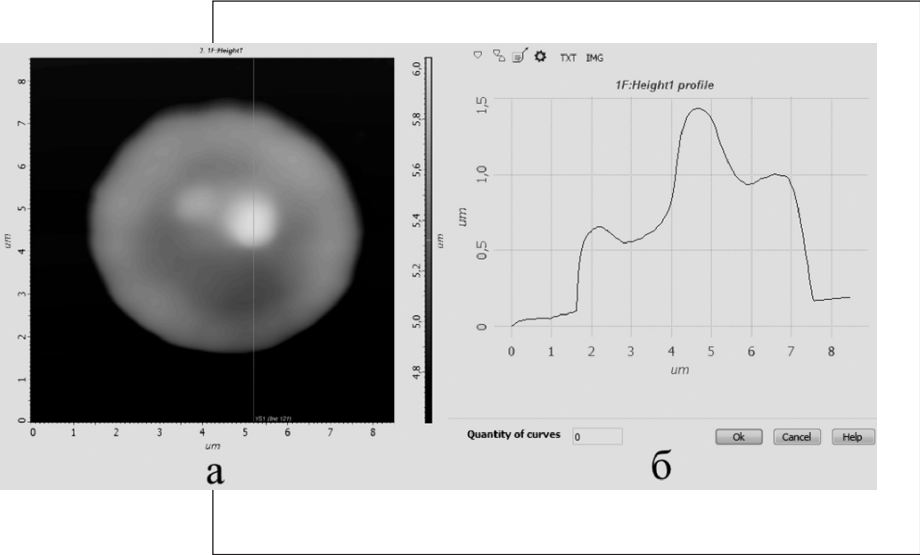


Рис. 3. АСМ изображение эритроцита: а) 2D изображение с проекцией вертикального профиля сечения; б) графическое изображение вертикального профиля сечения.

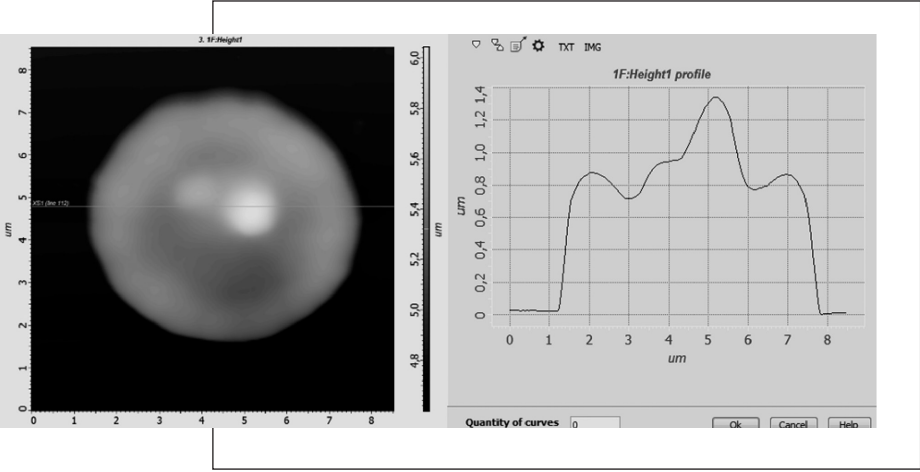


Рис. 4. АСМ изображение эритроцита: а) 2D изображение с проекцией горизонтального профиля сечения; б) графическое изображение горизонтального профиля сечения.

же форма и расположение «выроста» в центральной части впадины эритроцита.

Поскольку традиционно используемые методы визуализации исследуемых объектов в микрометровом диапазоне (преимущественно оптическая микроскопия) не могут достаточно точно охарактеризовать его морфологические и параметрические характеристики, можно предположить перспективность использования в исследованиях биологических объектов малой величины методов атомно-силовой микроскопии.

Заключение.

Так, по результатам работы показано, что на основе простых способов пробоподготовки можно получать АСМ-изображения отдельных объектов с детализацией морфологических параметров и использовать их для качественной оценки морфофункциональной активности этих клеток. Изучение особенностей изменения морфологии поверхности эритроцитов, проводили с помощью АСМ, а результаты противопоставляли данным полученным на основе оптической микроскопии. В данной работе впервые проведено исследование и сопоставление особенностей морфологии поверхности красных кровяных телец (эритроцитов) физиологически нормальной и деформированной взаимодействием с солями кадмия.

В рамках работы были получены поврежденные (аномальные) красные клетки крови, путем обработки отмытых эритроцитов солями тяжелых металлов (CdCl_2). Проведено сопоставление полученных на оптическом микроскопе изображений со сканами АСМ. При исследовании поврежденных эритроцитов с помощью атомно-силового микроскопа было проведено параллельное измерение контрольного образца, с целью сравнения их

морфометрических особенностей, как в 3d версии, так и при построении графика по профилю сечения.

Необходимо учитывать, что некоторые размерные характеристики могут отличаться от эталонных значений, и в большую, и в меньшую сторону, как по причине того, что исследуемый образец был подвергнут воздействию солями тяжелых металлов и имеет аномальную форму, так и по причине возможных погрешностей связанных с пробоподготовкой. Но сам факт возможности изучить объект и визуализировать несвойственные ему изменения формы и объема, по сравнению с методами оптической микроскопии не может вызывать никаких сомнений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоусова, О.Д., Толмачев И.А., Гайдаш А.А., Левичев В.В., Жуков М.В., Белоусов И.С. Особенности подготовки проб крови для исследования морфологических параметров и структуры мембран эритроцитов методом атомно-силовой микроскопии [Электронный ресурс] // Биомедицинский журнал Medline.ru. Судебная медицина. Т. 13. С. 954–966, 2012. Режим доступа: <http://ns.deltakon.ru/public/art/tom13/art80.html> (дата обращения 08 сентября 2015г.).
2. Демченков Е. Л., Будкевич Р.О. Особенности фиксации эритроцитов для атомно-силовой микроскопии // Материалы V съезда Биофизиков России (г. Ростов-на-Дону, 4–10 октября 2015 г.). г. Ростов-на-Дону. 2015: Издательство южного федерального университета. С. 186.

3. Дрозд Е.С., Чижик С.А., Константинова Е.Э. Атомно-силовая микроскопия структурно-механических свойств мембран эритроцитов // Российский журнал биомеханики. Т. 13. 2009. №4 (46). С. 22–30.
4. Кусельман Ю.Н., Басырова В.В., Светухин Б.Б., Костишко Ю.С., Нагорнов И.Ю., Матвеева М.М., Джанджгава А.И. // Нанотехнологии в педиатрии: перспективы использования атомно-силовой микроскопии для диагностики / Вопросы диагностики в педиатрии. Т. 2. 2010. № 1. С. 5–8.
5. Ламзин И. М., Харуллин Р. М. Исследование изменений биофизических свойств эритроцитов при хранении в эритроцитсодержащих средах с помощью атомно-силовой микроскопии // Саратовский научно-медицинский журнал. 2014 № 10(1). С. 44–48.
6. Лобов И.А., Давлеткильдеев Н.А/ Влияние способа подготовки образца на морфофункциональные характеристики эритроцитов при исследовании методом атомно-силовой микроскопии // Вестник Омского университета. №2. 2013 С. 129–132.
7. Малюченко Н.В., Тоневицкий А.Г., Савватеев М.Н. // Биофизика. Т. 48. Вып. 5, 2003. С. 830–836.
8. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учеб. пособие / Миронов В. Л. – Н. Новгород. 2004 г. – 114 с.
9. Нагорнов Ю.С., Богомолов А.С., Аксенова Е.А., Анохина Т.В., Корнеева С.А., Зотова М.А., Наумов В.В., Смирнова Т.Г., Наседкина А.А., Сокурова А.М., Юлдашев А.В. // Вычисление объема эритроцитов при анализе данных Атомно-силовой микроскопии / Fundamental research № 1, 2013. С. 181–184.
10. Савченко С. В., Степанищев И. В., Кузнецов Е. В. Эффективность использования метода фиксации при заборе органов и тканей для электронного микроскопического исследования [Электронный ресурс] // Актуальные вопросы судебной медицины и экспертной практики. Электронный судебно-медицинский журнал. Новосибирск, 2009. <http://journal.forens-lit.ru/node/156> (дата обращения 20 октября 2015 г.).
11. Скоркина М.Ю., Федорова М.З., Забияков Н.А., Сладкова Е.А. Методика оценки морфометрических параметров нативных клеток крови с использованием атомно-силовой микроскопии // Бюлл. экспер. биол. и мед. Т. 150. 2010. №8. С. 238–240.

12. Dulińska I., Targosz M. et al. Stiffness of normal and pathological erythrocytes studied by means of atomic force microscopy // J. Biochem Biophys Methods, 2006 Mar. 1–11.
13. Ebner A., Schillers H., Hinterdorfer P. Normal and pathological erythrocytes studied by atomic force microscopy // Methods Mol Biol. Vol. 736 2011. P. 223–241.
14. Savvateev M.N., Kozlovskaya N.V., Moisenovich M.M. et al // AIP Conference Proceedings, V. 696, 2003 P. 428.

Исследования частично проведены при финансовой поддержке Министерства образования и науки России, в рамках выполнения базовой части государственного задания (2014/216).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ», №3, 2015

1. Валуева Мария Васильевна, студентка специальности «Прикладная математика и информатика» Северо-Кавказского федерального университета
2. Верисокин Александр Евгеньевич, аспирант, ассистент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Северо-Кавказского федерального университета.
Телефон: 8-962-015-41-66.
E-mail: verisokin.aleksandr@mail.ru
3. Гатина Юлиана Сергеевна, лаборант ООО НПФ «Уникальный импульс».
E-mail: astis_arlett@mail.ru

4. Грибкова Екатерина Сергеевна, магистрант 1 курса Ивановского государственного университета.
Телефон: 8-910-695-87-40.
E-mail: katolina.red@mail.ru.
5. Демченков Егор Леонидович, инженер ООО НПФ «Уникальный импульс».
E-mail: m.a.d.999@inbox.ru
6. Елисеева Екатерина Валерьевна, кандидат математических наук, доцент кафедры нормальной физиологии Ставропольского государственного медицинского университета.
Телефон: (8652) 35-24-90.
E-mail: L_tsaturian@mail.ru
7. Зиновьева Лариса Михайловна, кандидат технических наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Северо-Кавказского федерального университета.
Телефон: 8-905-492-37-73.
8. Зольникова Юлия Федоровна, кандидат географических наук, доцент кафедры социально-экономической географии, геоинформатики и туризма Северо-Кавказского федерального университета.
Телефон 8-928-631-88-30.
E-mail: zolnst@mail.ru
9. Иванов Виктор Михайлович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры защиты в чрезвычайных

ситуациях Северо-Кавказского федерального университета.

Телефон 8-962-401-32-29.

E-mail: jones.anbu@yandex.ru

10. Каторгин Игорь Юрьевич, кандидат географических наук, доцент кафедры социально-экономической географии, геоинформатики и туризма Северо-Кавказского федерального университета.

Телефон: (8652) 35-34-02.

E-mail: cartographyNCSU@gmail.com

11. Кормилицына Наталья Кирилловна, кандидат биологических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и общемедицинских знаний Ивановского государственного университета.

Телефон 8-910-695-45-46.

E-mail: kormilica@gmail.com.

12. Криштоп Владимир Владимирович, кандидат медицинских наук, руководитель научно-исследовательского центра Ивановской государственной медицинской академии.

Телефон 8-920-359-96-73.

E-mail: chrishtop@isma.ivanovo.ru.

13. Лавриненко Антон Викторович, инженер автоматизированных систем обработки и управления.

Телефон 8-918-429-22-83.

E-mail: svls888@mail.ru.

14. Ляхов Павел Алексеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и математического моделирования Северо-Кавказского федерального университета.
Телефон (8652) 95-68-00.
E-mail: k-fmf-primath@stavsu.ru
15. Мельченко Евгений Александрович, кандидат медицинских наук, доцент кафедры медицинской биохимии, клинической лабораторной диагностики и фармации Северо-Кавказского федерального университета.
Телефон 8-928-230-64-19.
E-mail: evgenmell@mail.ru
16. Наац Виктория Игоревна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры математического анализа Северо-Кавказского федерального университета.
Телефон (8652) 35-21-10.
E-mail: VINaac@yandex.ru.
17. Наац Игорь Эдуардович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник института повышения квалификации и научно-педагогических кадров Северо-Кавказского федерального университета.
Телефон (8-652) 35-21-10.
E-mail: VINaac@yandex.ru.
18. Нагдалян Андрей Ашотович, старший преподаватель кафедры технологии мяса и консервирования института

живых систем Северо-Кавказского федерального университета.

Телефон (8652) 23-58-33.

E-mail: geniando@yandex.ru

19. Перхурова Валентина Дмитриевна, кандидат математических наук, доцент кафедры нормальной физиологии Ставропольского государственного медицинского университета.

Телефон (8652) 35-24-90.

E-mail: L_tsaturian@mail.ru

20. Попов Игорь Павлович, старший преподаватель кафедры общей физики Курганского государственного университета.

Телефон (3522) 42-94-58.

E-mail: popov_ip@kurganobl.ru.

21. Рыскаленко Роман Андреевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математического анализа Северо-Кавказского федерального университета.

E-mail: risc-roman@yandex.ru.

22. Седых Роман Юрьевич, студент 4 курса специальности «Экология и природопользование» Северо-Кавказского федерального университета.

Телефон 8 (8652)35-84-34.

E-mail: romasedykh@mail.ru

23. Селимов Магомед Асланович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИЛ «Нанобиотехнология и биофизика» центра коллективного пользования научным оборудованием Северо-Кавказского федерального университета.
Телефон 8(8652)33-07-12.
E-mail: Selimovma@mail.ru
24. Цатурян Людмила Дмитриевна, доктор медицинских наук, профессор, зав. кафедрой нормальной физиологии Ставропольского государственного медицинского университета.
Телефон (8652) 35-24-90.
E-mail: L_tsaturian@mail.ru
25. Шкарлет Константин Юрьевич, кандидат географических наук, доцент кафедры экологии и природопользования Северо-Кавказского федерального университета.
Телефон 8-918-752-37-08.
E-mail: shcarlet@mail.ru.

ABOUT THE AUTHORS

«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ», №3, 2015

1. Chrishtop Vladimir Vladimirovich, candidate of medical sciences, head of the research center at the Ivanovo State Medical Academy.
Phone: 89203599673.
E-mail: chrishtop@isma.ivanovo.ru.
2. Demchenkov Yegor Leonidovich, Engineer at the NPF «Unique momentum».
E-mail: m.a.d.999@inbox.ru
3. Elisseeva Ekaterina Valerevna, Candidate of Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of normal physiology at the Stavropol State Medical University.
Phone: (8652) 35-24-90.
E-mail: L_tsaturian@mail.ru
4. Gatina Yuliana Sergeyevna, laboratory assistant at the NPF «Unique momentum».
E-mail: astis_arlett@mail.ru

5. Gribkova Ekaterina Sergeevna, 1st year master student at the Ivanovo State University.
Phone: 8-910-695-87-40.
E-mail: katolina.red@mail.ru.
6. Ivanov Viktor Mikhailovich, doctor of agricultural sciences, professor of emergency protection at the North Caucasus Federal University.
Phone: 8-962-401-32-29.
E-mail: jones.anbu@yandex.ru
7. Katorgin Igor Yur'evich, candidate of geographical sciences, associate professor of the Social and economic geography, geoinformatics and tourism department at the North Caucasus Federal University.
Phone: (8652) 35-34-02.
E-mail: cartographyNCSU@gmail.com
8. Kormilitsyna Natalia Kirillovna, candidate of biological sciences, assistant professor of the health and safety and general medical knowledge department at the Ivanovo State University.
Phone: 8-910-695-45-46.
E-mail: kormilica@gmail.com.
9. Lavrinenko Anton Victorovich, the engineer of the automated processing systems and management.
Telephone 8-918-429-22-83.
E-mail: sviss888@mail.ru.

10. Lyakhov Pavel Alekseyevich, the candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the Department of the Applied Mathematics and Mathematical Modeling at the North Caucasus Federal University.
Phone: (8652) 95-68-00.
E-mail: k-fmf-primath@stavsu.ru
11. Melchenko Eugene Aleksandrovich, Candidate of Medical Sciences, assistant professor of the Department of medical biochemistry, clinical laboratory diagnostics and pharmacy at the North Caucasus Federal University.
Phone: 8-928-230-64-19.
E-mail: evgenmell@mail.ru
12. Naats Igor Eduardovich, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, leading researcher at the Institute for Advanced Studies and of the teaching staff at the North Caucasian Federal University.
Phone: (8-652) 35-21-10.
E-mail: VINaac@yandex.ru.
13. Naats Victoria Igorevna, a doctor of physical and mathematical sciences, professor of mathematical analysis at the North Caucasus Federal University.
Phone: (8652) 35-21-10.
E-mail: VINaac@yandex.ru.
14. Nagdalian Andrew Ashotovich, Senior lector of Meat technology and preservation Department at the North Caucasus Federal University.

Phone: (8652) 23-58-33.

E-mail: geniando@yandex.ru

15. Perhurova Valentina Dmitrievna, Candidate of Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of normal physiology at the Stavropol State Medical University.

Phone: (8652) 35-24-90.

E-mail: L_tsaturian@mail.ru

16. Popov Igor Pavlovich, senior lecturer of the Common physics Department at the Kurgan State University.

Phone: (3522) 42-94-58.

E-mail: popov_ip@kurganobl.ru.

17. Ryskalenko Roman Andreyevich, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the department of mathematical analysis at the North Caucasus Federal University.

E-mail: risc-roman@yandex.ru.

18. Sedykh Roman Yurevich, 4th year student of the specialty «Ecology and nature» at the North Caucasus Federal University.

Phone: 8 (8652) 35-84-34.

E-mail: romasedykh@mail.ru

19. Selimov Mohammed Aslanovich, Candidate of Technical Sciences, senior researcher at the «Nanobiotechnology and biophysics» laboratory in the Center of collective use of sci-

entific equipment at the North Caucasus Federal University.

Phone: 8(8652)33-07-12.

E-mail: Selimovma@mail.ru

20. Shkarlet Konstantin Yurevich, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Ecology and Environmental Sciences at the North Caucasus Federal University.

Phone: 8-918-752-37-08.

E-mail: shcarlet@mail.ru.

21. Tsaturian Lyudmila Dmitrievna, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Normal Physiology at the Stavropol State Medical University.

Phone: (8652) 35-24-90.

E-mail: L_tsaturian@mail.ru

22. Valueva Maria Vasilevna, Student of specialty «Applied Mathematics and Informatics» at the North Caucasus Federal University.

23. Verisokin Alexander Evgenyevich, a graduate student, assistant of the department of development and exploitation of oil and gas fields at the North Caucasus Federal University.

Phone: 8-962-015-41-66.

E-mail: verisokin.aleksandr@mail.ru

24. Zinovyeva Larisa Mikhaelovna, candidate of technical sciences, professor of chair of Development and operation of

oil and gas fields of the North Caucasus Federal University.
Phone: 8-905-492-37-73.

25. Zolnikova Yulia Fedorovna, candidate of geographical sciences, docent of the Department of social and economic geography, geoinformatics and tourism at the North Caucasus Federal University.
Phone: (928) 631-88-30.
E-mail: zolnst@mail.ru

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ И СДАЧЕ РУКОПИСЕЙ В РЕДАКЦИЮ

Редакция журнала сотрудничает с авторами – преподавателями вузов, научными работниками, аспирантами, докторантами и соискателями ученых степеней. Журнал публикует материалы в разделах:

- **«Физико-математические науки»;**
- **«Науки о Земле»;**
- **«Биологические науки».**

Материалы в редакцию журнала принимаются в соответствии с требованиями к оформлению и сдаче рукописей постоянно и публикуются после обязательного внутреннего рецензирования и решения редакционной коллегии в порядке очередности поступления, с учётом рубрикации номера.

Редакция принимает от авторов рукописи и сопутствующие им необходимые документы в следующей комплектации:

1. Рукопись в печатной и электронной форме;
2. Отзыв научного руководителя (для аспирантов, адъюнктов и соискателей);
3. Рецензия специалиста другой кафедры либо организации;
4. Экспертное заключение (для физико-математических наук);
5. Лицензионный договор на право использования научного произведения в журнале;
6. Лицензионный договор на право размещения научного произведения в сети Интернет.

МАТЕРИАЛЫ ДОЛЖНЫ СООТВЕТСТВОВАТЬ СЛЕДУЮЩИМ ТРЕБОВАНИЯМ:

1. РУКОПИСЬ

Объем: 6–15 страниц (допускается превышение объема по согласованию с редакцией),
Формат бумаги: А4;
Поля: все по 2 см;
Кегль: 14 пт;
Шрифт: Times New Roman;
Межстрочный интервал: 1,5 пт;
Нумерация страниц: внизу страницы по центру;
Первая строка: отступ 1,25 см.

Переносы в словах либо не употреблять, либо пользоваться командой «расстановка переносов». Необходимо различать в тексте дефис (-) (например, черно-белый, бизнес-план) и тире (–).

Статья должна быть оформлена в соответствии с приведенным ниже образцом и иметь все указанные элементы. Разделы и подразделы статьи (если они необходимы) выделяются прямым полужирным шрифтом.

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ:

Биологические науки

УДК

Иванов И. И. [Ivanov I. I.]**Название** (на русском языке)**Title** (English)

Аннотация: 100–150 слов

Ключевые слова: 5–8 слов

Abstract:**Key words:**

Текст статьи. Текст статьи. Текст статьи. Текст статьи (рис. 1).
Текст статьи. Текст статьи. Текст статьи. Текст статьи. Текст статьи. Текст статьи [1].

Рисунок 1. Название рисунка.

Текст статьи. Текст статьи (табл. 1). Текст статьи. Текст статьи.
Текст статьи. Текст статьи. Текст статьи. Текст статьи. Текст статьи. Текст статьи.

Таблица 1. НАЗВАНИЕ ТАБЛИЦЫ

Текст статьи. Текст статьи. Текст статьи. Текст статьи. Текст
статьи. Текст статьи. Текст статьи. Текст статьи. Текст статьи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Литература в соответствии с ГОСТ.

ОБ АВТОРАХ

Иванов Иван Иванович, доктор ... наук, профессор кафедры
... .. университета. Телефон: (...) ..-... E-mail: ... (сначала все
авторы на русском языке)

Ivanov Ivan Ivanovich, Doctor of ... Science, professor of the
Department ... University. Phone: (...) ..-... E-mail: ...

Рисунки и таблицы вставляются в тексте в нужное место. Ссылки в тексте на таблицы и рисунки обязательны. Каждый рисунок предоставляется также в отдельном файле (формат *.ai, *.eps, *.jpeg, *.tiff).

Рисунки нумеруются снизу (Рисунок 1. Название) и выполняются в графическом редакторе 14 кеглем, полужирным шрифтом, междустрочное расстояние – одинарное. Все надписи на рисунках должны читаться.

Рисунки должны быть оформлены с учетом особенности черно-белой печати (рекомендуется использовать в качестве заливки различные виды штриховки и узоры, в графиках – различные типы линий, разное оформление точек, по которым строится график). Цветные и полутоновые рисунки не допустимы. Оси графиков должны иметь название и единицы измерения. За качество рисунков или фотографий редакция ответственности не несет.

Формулы выполняются в программе редактор формул MathType 12 кеглем, выравниваются по центру. Их номера ставятся при помощи табулятора в круглых скобках по правому краю.

Таблицы должны иметь название. Таблицы нумеруются сверху (Таблица 1), выравниваются по правому краю и выполняются 14 кеглем, полужирным шриф-

том. Название таблицы выполняется 14 кеглем, выравниваются по центру таблицы, полужирным шрифтом, междустрочное расстояние – одинарное. Ширина таблицы должна быть не более 16 см.

Библиографический список (НЕ ЛИТЕРАТУРА!) размещается в конце статьи. В нем перечисляются все источники, на которые автор ссылается в статье, с полным библиографическим аппаратом издания (в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5–2008). Ссылки указываются в квадратных скобках и оформляются в соответствии со следующим шаблоном:

— для книг: *Автор. Название. Город: Изд-во, год.*

Например: Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Наука, 1987.

— для трудов конференций, сборников трудов и других коллективных публикаций (в том числе, не имеющих титульных авторов): *Автор. Название // Название конференции: Название сборника трудов. Город: Изд-во, год.*

- Например: 1. Брыкалов А.В., Романенко Е.С. Применение полифункциональных олигомеров вулканизаторов в качестве биостимуляторов роста растений // Современные достижения био-технологии: Материалы Первой конф. Северо-Кавказского региона. Ставрополь, 1995. С. 9.
2. Вычислительные методы линейной алгебры: Тр. I Всесоюзной конференции. Новосибирск: Вц СО АН СССР, 1969.
3. Сборник задач по численным методам / Сост. Н.А. Стрелков. Ярославль: Изд-во Яросл. ун-та, 1988.
4. Численный анализ на ФОРТРАНе / Под ред. В.В. Воеводина. Вып. 17. М.: Изд-во МГУ, 1976.

— для статей в журналах, сборниках трудов и других коллективных публикациях: *Автор. Название статьи // Журнал. Год. №. С. (номер первой – номер последней страницы).*

- Например: 1. Абрамов А.А. О численном решении некоторых алгебраических задач, возникающих в теории устойчивости // ЖВМ и МФ. 1984. № 3. С. 339–347.

— для электронных ресурсов: *обязательно указывать сведения об авторе, сайте/цифровом носителе, URL и дату обращения.*

- Например: 1. Распоряжение Правительства РФ от 6 сентября 2010 г. №1485-р «О Стратегии социально-экономического развития Северо-Кавказского федерального округа до 2025 г.». [Электронный ресурс]. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант-плюс».
2. Бадыштова И.М. Специфика домохозяйств трудовых мигрантов в России // Социс. 2002. №9. URL: http://2001.isras.ru/SocIs/SocIsArticles/2002_09/Badyshytova.doc (дата обращения: 19.09.2007).

Примечания, сноски (если необходимы) имеют сквозную нумерацию.

Автор несет ответственность за точность приводимых в его рукописи сведений, цитат и правильность указания названий книг в списке литературы!

Печатный экземпляр рукописи статьи должен быть прошит и пронумерован, подписан всеми авторами и соавторами статьи с обратной стороны последней страницы (указывается количество страниц, ФИО и подписи). Допускается представление непрошитой, но пронумерованной и подписанной на каждой странице рукописи.

Электронный экземпляр рукописи статьи предоставляется в формате *.doc, *.docx. Название файла оформляется по форме: «Фамилия_ И.О._Название статьи» (предпочтительнее на эл. почту редакции).

2. ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

Подписывается научным руководителем собственноручно. Подпись должна быть заверена соответствующей кадровой структурой.

3. РЕЦЕНЗИЯ

Рукопись рецензируется специалистом в данной научной сфере, имеющим ученую степень. В рецензии необходимо отметить актуальность проблематики, рассматриваемой в представленной статье, оригинальность, научную новизну исследования; оценить научно-методический уровень исследования; дать оценку результатам исследования; оценить достоверность представленных в статье научных результатов; оценить практическую значимость и важность результатов исследования для науки и практики. В заключении, отмечая актуальность, научную новизну и практическую значимость, сделать вывод о целесообразности публикации статьи (Приложение 1). Рецензия должна быть внешней по отношению к кафедре или другому структурному подразделению, в котором работает автор. Подпись рецензента должна быть заверена соответствующей кадровой структурой.

4. ЭКСПЕРТНОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

(для физико-математических наук)

Предоставляется экспертной комиссией, созданной при институте (университете). Содержит заключение о возможности опубликования статьи в открытой печати.

5. ЛИЦЕНЗИОННЫЕ ДОГОВОРЫ

Лицензионный договор на право использования научного произведения в журнале оформляется в соответствии с приложением 2 в 2 экземплярах, по одному для каждой из сторон.

Лицензионный договор на право использования научного произведения в сети «Интернет» оформляется в соответствии с приложением 3 в 2 экземплярах, по одному для каждой из сторон.

Приложения:

- | | |
|---------------|--|
| Приложение 1. | Образец рецензии. |
| Приложение 2. | Образец лицензионного договора на право использования научного произведения в журнале. |
| Приложение 3. | Образец лицензионного договора на право использования научного произведения в сети «Интернет». |

СТАТЬИ С КОМПЛЕКТОМ ДОКУМЕНТОВ В ЖУРНАЛ
«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ» СДАВАТЬ:

Ответственному секретарю Лилии Корневой.

Контакты: Адрес редакции: 355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, уч. корпус №2, каб. 117.
Телефон: 8–918–807–59–40.
Email: liliya.cstp@gmail.com.

CONTENTS

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Lavrinenko A.V.	Method of conversion from residue number system to positional with error correctness based on artificial neural networks.	7
Lyakhov P.A., Valueva M.V.	Application of smoothing filters for cleaning of noise of grayscale images	37
Naats I.E., Naats V.I., Ryskalenko R.A.	Computational and analytical models for equations of parabolic type with approximate data on the basis of methods of applied harmonic analysis and variational method of weighted residuals	51
Popov I.P.	Abstract model power field electromagnetic type building. Part 2	63

EARTH SCIENCES**Verisokin A.E., L.M. Zinovieva**

Features of technology of washing and development of horizontal wells after selective hydraulic fracturing of layer on fields of western siberia 79

Zolnikova Y.F.

Scientific and public organizations of the region Caucasian Mineral Waters at the turn of XIX–XX centuries and their contribution to the development of resorts 91

Katorgin I.Yu., Shkarlet K.Yu.,**Sedykh R. Yu.**

Geoinformation analysis of ecological stability of a river basin of Tashla 97

BIOLOGICAL SCIENCES**Ivanov V.M**

The specifics of postembuonic biogenesis of vistar white mice under the effect of nitrous oxides 109

Chrishtop V.V., Gribkova E.S.,**Kormilitsyna N.K.**

Cluster analysis indicators of the cardiovascular system as a way to identify adaptation strategies to exam stress bachelors of ISU 121

Melchenko E.A.

Application of atomic-power microscopy at research of biophysical properties of red blood cells membranes 131

**Perhurova V.D., Tsaturyan L.D.,
Elisseeva E.V.**

Functional capacities of the cardiovascular system in students with different neurotism’s levels 137

**Selimov M.A., Demchenkov E.L., Nagdalian A.A.,
Gatina Y.S.**

Features morphology abnormal forms of erythrocytes by atomic force microscopy 145

**ABOUT
THE AUTHORS 165**

Научное издание

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ

2015

Выпуск 3

Корректор М. И. Толмачев.

Подписано в печать 20.09.2015. Формат 70 × 108 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 15,58.
Тираж 1000 экз.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе
ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет».
355029, г. Ставрополь, пр-т Кулакова, 2.