

Министерство образования и науки  
Российской Федерации

---

# НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ

---

Научный журнал  
Северо-Кавказского федерального  
университета

---

ISSN 2308–4758



---

**Выпуск № 1, 2017 г.**

---

Выходит 4 раза в год

**«Наука. Инновации. Технологии»  
Научный журнал Северо-Кавказского  
федерального университета**

<b>Учредитель</b>	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет»
<b>Главный редактор</b>	д-р геогр. наук, профессор В. С. Белозеров
<b>Редакционный совет</b>	А. А. Левитская, председатель, ректор СКФУ, канд. филол. наук, доцент; А.А. Лиховид, заместитель председателя, проректор по научной работе и стратегическому развитию СКФУ, д-р геогр. 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. Храпцов, д-р техн. наук, профессор, академик РАН; Ю. Ю. Балега, д-р физ.-мат. наук, академик РАН (САО РАН, п. Нижний Архыз); С.В. Рязанцев, д-р экон. наук, член-корр. РАН (ИСПИ РАН, г. Москва); В.С. Тикуннов, д-р геогр. наук, профессор (МГУ им. Ломоносова, г. Москва); С. Пестрак, профессор (Институт Жана Лямура университета Лотарингии, г. Нанси, Франция)
<b>Редакционная коллегия</b>	М.Т. Абшаев, д-р физ.-мат. наук, профессор (Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик); А.А. Лиховид, д-р геогр. наук, профессор; 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. Диневиц, 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); С.А. Куникин канд. физ.-мат. наук, доцент; 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. Молахосени, канд. наук, доцент (Исламский университет Азад, Керман, Иран)
<b>Свидетельство о регистрации</b>	ПИ № ФС77–52723 от 8.02.2013
<b>Подписной индекс</b>	Объединенный каталог. ПРЕССА РОССИИ. Газеты и журналы: 94011
<b>Журнал включен</b>	в БД «Российский индекс научного цитирования». Журнал «Вестник Ставропольского государственного университета» перерегистрирован в журнал «Наука. Инновации. Технологии» в связи с переименованием учредителя.
<b>Журнал</b>	в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, с 1 декабря 2015 г.
<b>Адрес Телефон Сайт E-mail</b>	355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1 (8652) 33-07-32 www.ncfu.ru nit_ncfu@mail.ru
<b>ISSN</b>	2308–4758

**«Science. Innovations. Technologies»  
North Caucasus Federal  
University**

<b>Founder</b>	Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «North Caucasus Federal University»
<b>Editor in chief</b>	V. S. Belozerov, Doctor of Geographical Sciences, professor
<b>Editorial Council</b>	A.A. Levitskaya, chairman, Rector SKFU, PhD. Philology Sciences, Associate Professor; A.A. Likhovid, Vice Chairman, Doctor of Geographical Sciences, Professor; V.S. Belozerov, Chief Editor, Doctor of Geographical Sciences, professor; M.Ch. Zalikhhanov, 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, academician 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); V.S. Tikunov, Doctor of Geographical Sciences, professor (Lomonosov Moscow State University, Moscow); S. Pestrak, Professor (Institute Jean Lamour, Measurement and electronic architectures group, Nancy, France)
<b>Editorial Board</b>	M.T. Abshaev, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor (Mountain Geophysical Institute, Nalchik); A.A. Likhovid, Dr. of Geographical Sciences, professor; V.S. Belozerov, Dr. of Geographical Sciences, professor, editor in chief; T.P. Bondar', MD, professor; V.B. Borodulin, 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; L.I. Gubareva, Sc.D., Professor; T.I. Dzhandarova, Sc. D., Associate Professor; Y.I. Dikanskiy, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor; L.A. Dinevich, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Tel-Aviv University, Tel-Aviv); K.V. Erin, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor; A.I. Zhakin, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Southwest State University, Kursk); A.R. Zakinyan, candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor; A.O. Ivanov, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Yeltsin's Ural Federal University); A.A. Kolyada, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor (Belarusian State University, Minsk); S.A. Kunikin, Ph.D., Associate Professor; A.D. Lodygin, Dr. of Technical Sciences, associate professor; A.V. Lysenko, Dr. of Geographical Science, associate professor; I.N. Molodikova, Ph.D. (Central European University, Budapest); V.I. Naats, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor; T.G. Nefedova, Dr. of Geographical Sciences, Leading Researcher, Russian Academy of Sciences (IG RAS, Moscow); P.M. Polyani, Dr. of Geographical Sciences, Leading Researcher, Russian Academy of Sciences (IG RAS, Moscow); V.V. Razumov, Dr. of Geographical Sciences, Professor; L.D. Timchenko, Dr. of Veterinary Sciences, Professor; Tsururyan 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).
<b>Certificate</b>	ПИ № ФС77–52723 dated February 8th 2013.
<b>The Index</b>	The Journal is included in the DB «Russian index of the scientist quoting».
<b>The journal</b>	«Bulletin of the Stavropol state University» renamed in the journal «Science. Innovations. Technologies» due to renaming of the founder.
<b>The journal</b>	is recommended by the State Commission for Academic Degrees and Titles for publishing the dissertation research results
<b>Adress Phone Site E-mail</b>	355009, Stavropol, Pushkin street, 1 8 (8652) 33-07-32 www.ncfu.ru nit_ncfu@mail.ru
<b>ISSN</b>	2308–4758
©	FGAOU VPO «North Caucasus Federal University», 2017

# СОДЕРЖАНИЕ

«Наука. Инновации. Технологии», №1, 2017

## ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Бережной В.В.,  
Нагорнов Н.Н.** Обоснование выбора величин модулей для процессоров в системе остаточных классов . . . . . 7
- Кожевников А.А.** Синтез аналого-цифровых, первичных и вторичных модулярных измерительных преобразователей . . . . . 17
- Макоха А.Н.,  
Тышляк Т.Е.** Построение и анализ алгоритмов распараллеливания тензорных операций . . . . . 29
- Васькина А.В.,  
Наац В.И.** Моделирование и вычислительный эксперимент в задаче прогнозирования среднедушевых денежных доходов населения на основе методов корреляционно-регрессионного анализа . . . . . 39
- Федоренко В.В., Слюсарев Г.В.,  
Самойленко И.В.** Модель упорядоченного опроса параллельных каналов передачи данных . . . . . 53
- Диневич Л.,  
Лешем Ё.** Радарный мониторинг сезонной миграции птиц над центральным Израилем . . . . . 65

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ**

- Александрова А.Ю.** География туристских потоков в Российской Федерации: статистика, тренды, проблемы . . . . . 95
- Блужина А.С.,  
Бегдай И.В.** Особенности геохимических процессов на водосборе реки Калаус территории Ставропольского края . . . . . 109
- Гасумов Р.А., Копченков В.Г.,  
Лукьянов В. Т., Фёдорова Н.Г.,  
Овчаров С.Н.** Особенности строительства глубоких скважин в осложненных горно-геологических условиях Предкавказья . . . . . 123
- Гридин В.А.,  
Дубенко В.Е.,  
Димитриади Ю.К.,  
Серов А.В.** Экспериментальные исследования влияния технологических жидкостей на газопроницаемость песчаных коллекторов. . . . . 141
- Диденко А.Ю.,  
Набродова Е.Г.,  
Закинян Р.Г.** Математическое моделирование крупномасштабной атмосферной циркуляции . . . . . 149
- Токарев А.А.,  
Шальнев В.А.** Геохимический подход в изучении ритмики морфологических единиц ландшафта. . . . . 163
- Щитова Н.А.  
Корнева Л.И.** Полимасштабный анализ размещения инвестиций в регионах Европейской части России в постсоветское время . . . . . 175

**БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ**

<b>Коломиец О.И., Петрушкина Н.П., Быков Е.В.</b>	Особенности метаболических адаптационных изменений при различных физических нагрузках . . . . .	207
<b>Фишер В.В., Яцук И.В., Батурин В.А.</b>	Динамика показателей вариационной ритмопульсометрии и кальций-магниевое равновесия при операционном стрессе у пациентов с хирургическими вмешательствами в челюстно-лицевой области. . . . .	217
<b>ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ . . . . .</b>		229
<b>ABOUT THE AUTHORS . . . . .</b>		231

# ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

«Наука. Инновации. Технологии», №1, 2017

УДК 681.3

Бережной В.В. [Berezhnoy V.V.]  
Нагорнов Н.Н. [Nagornov N.N.]

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ВЕЛИЧИН МОДУЛЕЙ ДЛЯ ПРОЦЕССОРОВ В СИСТЕМЕ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ

The rationale selection of the modules values  
for processors in the system of residual classes

Рассмотрены наборы систем модулей для 32-х и 64-х разрядных процессоров в системе остаточных классов (СОК). Проведено обоснование критериев выбора величин модулей: минимум аппаратных затрат при табличной реализации процессора СОК; минимум аппаратных затрат при реализации процессора СОК в двоичной логике; однотипность модульных каналов. Предложены различные системы модулей в количестве 25 наборов для 32-х и 22 наборов для 64-х разрядных процессоров. Выполнены исследования для определения эффективности использования всех рассматриваемых наборов систем модулей по каждому из критериев. Представлен анализ результатов и выбраны оптимальные в соответствии с используемыми критериями системы модулей для рассматриваемых типов процессоров.

Considered the set systems of modules for 32-bit and 64-bit processors in the residue number system (RNS). Conducted the substantiation of the selection criteria values of the modules: with a minimum of hardware expenses tabular implementation of RNS processor; minimum hardware expenses in the implementation of RNS processor in binary logic; the same type of module channels. Considered various systems of modules in the amount of 25 sets for 32-bit and 22 sets for 64-bit processors. Conducted investigations to determine the effectiveness of the use of all sets under consideration systems of modules in terms of each of the criteria. Presents the analysis of the results and selected the best according criteria the systems of modules for each of the processors.

**Ключевые слова:** система остаточных классов, критерии выбора величин модулей, процессор системы остаточных классов, системы оснований.

**Key words:** residue number system, the selection criteria values of the modules, the processor of the system of residual classes, system basis.

### ВВЕДЕНИЕ

Система остаточных классов (СОК) представляет число  $A$  остатками от деления  $a_1, a_2, \dots, a_n$  на взаимно-простые модули (основания)  $p_1, p_2, \dots, p_n$  [1].

Операция получения остатка (вычета)  $a_i$  от числа  $A$  по модулю  $p_i$  определяется правилом

$$\forall A \in Z : |A|_{p_i}^+ \leftrightarrow A - \left[ \frac{A}{p_i} \right]^+ \cdot p_i$$

где  $Z$  – множество целых чисел;  
[·] – операция целочисленного деления.

Величина вычетов  $a_i$  по  $\text{mod } p_i$  представляет число в интервале  $[\overline{0}, p_i - 1]$ . В результате такого представления процессор оперирует мало-разрядными остатками, обрабатываемыми параллельными модульными вычислительными каналами.

СОК, обладая максимальным уровнем внутреннего параллелизма, повышает быстродействие выполнения арифметических операций, обеспечивает независимость параллельной обработки по модулям системы счисления, что в итоге приводит к существенному увеличению производительности процессора.

Диапазон представимых в СОК чисел определяется произведением взаимно-простых оснований  $P = p_1 \cdot p_2 \dots p_n$ . Поэтому для перекрытия необходимого диапазона  $P$  следует выбрать такой набор оснований, произведение которых равно или незначительно превышает величину  $P$ . Современные процессоры, функционирующие в позиционной системе счисления имеют разрядность, кратную степени 2, обычно 32 или 64 разряда. Перекрываемый ими диапазон представления чисел составляет соответственно  $P_{32} = 2^{32} \approx 4,29 \times 10^9 = 4,29E + 9$ ,  $P_{64} = 2^{64} \approx 1,84 \times 10^{19} = 1,84E + 19$ .

В своих исследованиях будем опираться на данные величины диапазонов представления чисел, т.к. основная роль вычислительных устройств в СОК – выполнять функции сопроцессоров к позиционным процессорам в тех операциях и функциях, которые дают существенный выигрыш в быстродействии перед позиционной системой счисления [1].

В современных исследованиях не рассматриваются вопросы выбора наборов модулей для процессоров, функционирующих в СОК. В [2] приведены величины наборов модулей для реально разработанных в 60–70-е года прошлого века ЭВМ Т-340А, К-340А, «Алмаз», 5Э53, но не сказано чем обосновывался выбор данных модулей. В ряде статей, например [3] проводится анализ модулей специального вида  $\{2^n - 1, 2^2, 2^{n+1}\}$ , которые имеют преимущества в выполнении модульных операций по сравнению с произвольными наборами взаимно-простых оснований, но, как правило, трех модулей недостаточно для одновременного перекрытия больших диапазонов представления чисел и обеспечения отказоустойчивости [4] процессора СОК.

В данной статье авторы предлагают свое видение на вопрос обоснования выбора величин модулей для 32-х и 64-х разрядных процессоров, функционирующих в СОК.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим возможные подходы к определению и выбору величин модулей СОК отдельно для 32-х разрядного и 64-х разрядного процессоров, т.к. существенно различные диапазоны представления чисел могут вносить свои коррективы в выбор оснований для системы остаточных классов.

Таблица 1. СИСТЕМЫ ОСНОВАНИЙ СОК ДЛЯ ДИАПАЗОНА  $2^{32}$ 

Номер набора											Разрядность в табличной реализации	Разрядность в двоичной реализации	Кодируемый диапазон
	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_6$	$p_7$	$p_8$	$p_9$	$p_{10}$			
1.	2(1)	3(2)	5(3)	7(3)	11(4)	13(4)	17(5)	19(5)	23(5)	29(5)	129	37	6,47E+09
2.	3(2)	5(3)	7(3)	11(4)	13(4)	17(5)	19(5)	23(5)	29(5)	31(5)	158	41	1E+11
3.	5(3)	7(3)	11(4)	13(4)	17(5)	19(5)	23(5)	29(5)	31(5)		155	39	3,34E+10
4.	7(3)	11(4)	13(4)	17(5)	19(5)	23(5)	29(5)	31(5)			150	36	6,69E+09
5.	11(4)	13(4)	17(5)	19(5)	23(5)	29(5)	31(5)	37(6)			180	39	3,53E+10
6.	13(4)	17(5)	19(5)	23(5)	29(5)	31(5)	37(6)	41(6)			210	41	1,32E+11
7.	17(5)	19(5)	23(5)	29(5)	31(5)	37(6)	41(6)				197	37	1,01E+10
8.	19(5)	23(5)	29(5)	31(5)	37(6)	41(6)	43(6)				223	38	2,56E+10
9.	23(5)	29(5)	31(5)	37(6)	41(6)	43(6)	47(6)				251	39	6,34E+10
10.	29(5)	31(5)	37(6)	41(6)	43(6)	47(6)	53(6)				281	40	1,46E+11
11.	31(5)	37(6)	41(6)	43(6)	47(6)	53(6)					252	35	5,04E+09
12.	37(6)	41(6)	43(6)	47(6)	53(6)	59(6)					280	36	9,59E+09
13.	41(6)	43(6)	47(6)	53(6)	59(6)	61(6)					304	36	1,58E+10
14.	43(6)	47(6)	53(6)	59(6)	61(6)	67(7)					330	37	2,58E+10
15.	47(6)	53(6)	59(6)	61(6)	67(7)	71(7)					358	38	4,26E+10
16.	53(6)	59(6)	61(6)	67(7)	71(7)	73(7)					384	39	6,62E+10
17.	59(7)	61(7)	67(7)	71(7)	73(7)	79(7)					410	40	9,87E+10
18.	61(6)	67(7)	71(7)	73(7)	79(7)	83(7)					434	41	1,39E+11
19.	67(7)	71(7)	73(7)	79(7)	83(7)	89(7)					462	42	2,03E+11
20.	71(7)	73(7)	79(7)	83(7)	89(7)	97(7)					492	42	2,93E+11
21.	73(7)	79(7)	83(7)	89(7)	97(7)	101(7)					522	42	4,17E+11
22.	79(7)	83(7)	89(7)	97(7)	101(7)						449	35	5,72E+09
23.	83(7)	89(7)	97(7)	101(7)	103(7)						473	35	7,45E+09
24.	89(7)	97(7)	101(7)	103(7)	107(7)						497	35	9,61E+09
25.	97(7)	101(7)	103(7)	107(7)	109(7)						517	35	1,18E+10

## ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ 32-Х РАЗРЯДНОГО ПРОЦЕССОРА

Для выполнения арифметических операций над числами в 32-х разрядном двоичном диапазоне необходимо подобрать взаимно-простые числа (модули СОК), произведение которых обеспечило бы перекрытие диапазона представления чисел  $2^{32} \approx 4,29 \times 10^9 = 4,29E + 9$ .

Однако выбор произвольных модулей не всегда будет удовлетворять требованию минимизации аппаратных затрат и технологичности проектирования модульных каналов. В связи с вышесказанным произведём подбор модулей и анализ полученной системы остаточных классов по следующим критериям:

1. Минимум аппаратных затрат при табличной реализации процессора СОК. Данный критерий оценивается суммарной разрядностью выбранных оснований СОК при табличной организации вычислений [2, 4].
2. Минимум аппаратных затрат при реализации процессора СОК в двоичной логике. Данный критерий оценивается суммарной разрядностью выбранных оснований СОК при их представлении в двоичной системе счисления.
3. Однотипность модульных каналов. Оценка данного критерия производится сравнением наименьшей и наибольшей разрядности модулей, составляющих систему оснований. Чем меньше отличия в разрядности модулей, тем более технологичным и однотипным будет процесс реализации модульных каналов [5].

Выбор оснований осуществлялся таким образом, чтобы можно было однозначно закодировать любое число в диапазоне  $2^{32} \approx 4,29 \times 10^9 = 4,29E + 9$ . То есть произведение величин модулей не должно быть меньше данного диапазона и, по возможности, минимально его превышать. Значительное превышение диапазона  $2^{32}$  приводит к существенному увеличению аппаратных затрат.

Системы оснований для 32-разрядного диапазона представлены в таблице 1, которая содержит 25 наборов оснований [6]. Первый набор составлялся по возрастанию взаимно-простых чисел, начиная с числа 2. Второй набор и далее подбирались по следующему алгоритму: удаляется наименьшее основание и, если набор перестает покрывать необходимый диапазон, добавляется новое основание, превышающее последнее основание на минимальную величину. Общим требованием к такому подбору являлась взаимная простота системы оснований. Результаты данного моделирования представлены в таблице 1.

Здесь в столбцах, соответствующих модулям СОК  $p_1, p_2, \dots, p_{10}$  представлены само основание и разрядность его реализации в двоичной системе счисления (число в скобках). Разрядность табличной реализации определяется суммой величин самих оснований [4], а разрядность двоичной реализации определяется суммой разрядности оснований в двоичной системе счисления (чисел в скобках).

По данным, представленным в таблице построим диаграммы табличной и двоичной реализации, а также величины кодируемого диапазона для всех наборов оснований (рис. 1–3).

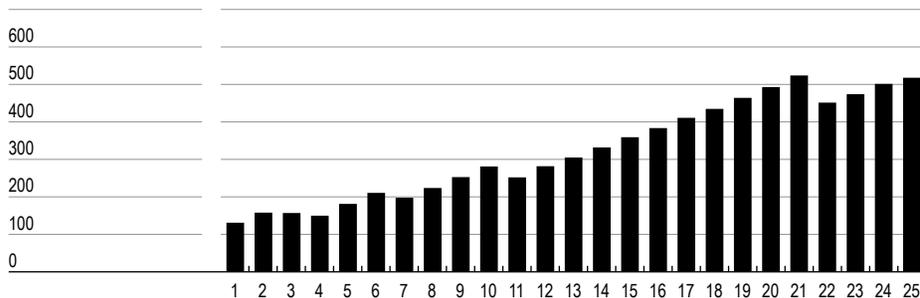


Рис. 1. Диаграмма разрядности табличной реализации.

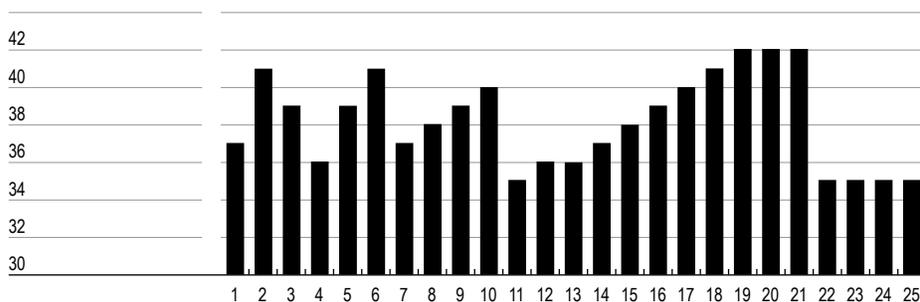


Рис. 2. Диаграмма разрядности двоичной реализации.

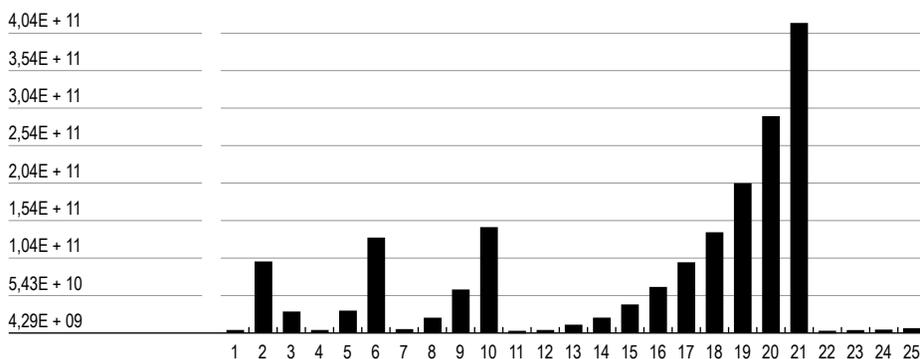


Рис. 3. Диаграмма величины кодируемого диапазона.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ 64-х РАЗРЯДНОГО ПРОЦЕССОРА

Проведем исследования систем оснований перекрывающих диапазон  $2^{64} \approx 1,84 \times 10^{19} = 1,84E + 19$ . Подход к определению величин оснований оставим то же, что и для 32-х разрядного процессора с некоторым ограничением величины основания. Выбор основания ограничим значением 127, таким образом, чтобы двоичная реализация модульного канала не превышала 7 разрядов. В результате предложены 22 наборов систем оснований, представленных в таблице 2.

Представим аналогичные диаграммы табличной и двоичной реализации, а также величины кодируемого диапазона для всех наборов оснований (рис. 4–6).

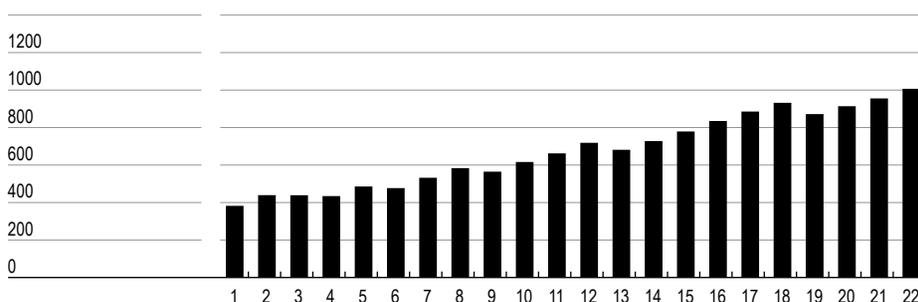


Рис. 4. Диаграмма разрядности табличной реализации.

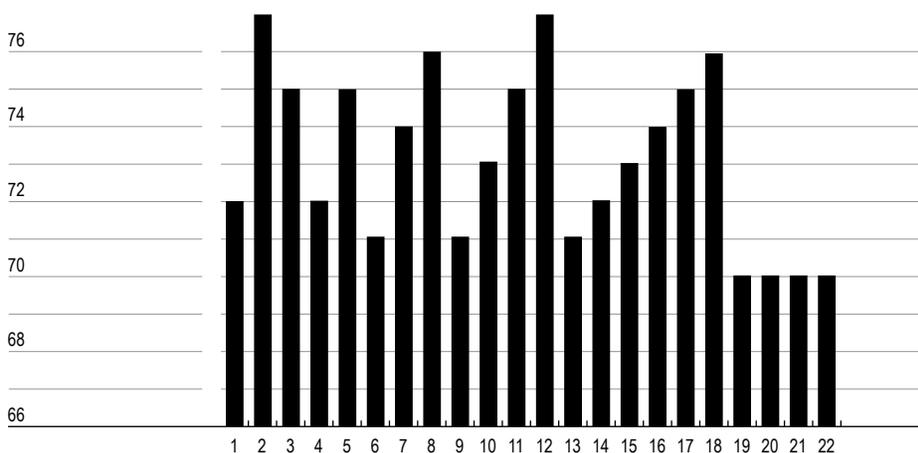
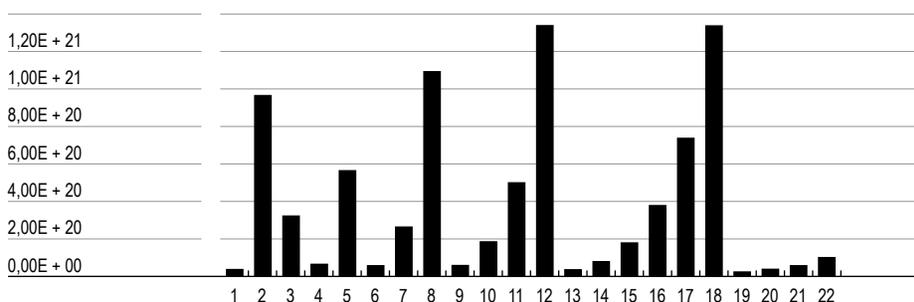


Рис. 5. Диаграмма разрядности двоичной реализации.

Таблица 2. СИСТЕМЫ ОСНОВАНИЙ СОК ДЛЯ ДИАПАЗОНА 2<sup>64</sup>

$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$	$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{14}$	$P_{15}$	$P_{16}$	Табличная реализация	Двоичная реализация	Кодируемый диапазон
2	3	5	7	11	13	17	19	23	29	31	37	41	43	47	53	381	72	3.2589E+19
3	5	7	11	13	17	19	23	29	31	37	41	43	47	53	59	438	77	9.6138E+20
5	7	11	13	17	19	23	29	31	37	41	43	47	53	59		435	75	3.2046E+20
7	11	13	17	19	23	29	31	37	41	43	47	53	59			430	72	6.4092E+19
11	13	17	19	23	29	31	37	41	43	47	53	59	61			484	75	5.5852E+20
13	17	19	23	29	31	37	41	43	47	53	59	61				473	71	5.0774E+19
17	19	23	29	31	37	41	43	47	53	59	61	67				527	74	2.6168E+20
19	23	29	31	37	41	43	47	53	59	61	67	71				581	76	1.0929E+21
23	29	31	37	41	43	47	53	59	61	67	71					562	71	5.7522E+19
29	31	37	41	43	47	53	59	61	67	71	73					612	73	1.8257E+20
31	37	41	43	47	53	59	61	67	71	73	79					662	75	4.9734E+20
37	41	43	47	53	59	61	67	71	73	79	83					714	77	1.3316E+21
41	43	47	53	59	61	67	71	73	79	83						677	71	3.5989E+19
43	47	53	59	61	67	71	73	79	83	89						725	72	7.8122E+19
47	53	59	61	67	71	73	79	83	89	97						779	73	1.7623E+20
53	59	61	67	71	73	79	83	89	97	101						833	74	3.7871E+20
59	61	67	71	73	79	83	89	97	101	103						883	75	7.3598E+20
61	67	71	73	79	83	89	97	101	103	107						931	76	1.3347E+21
67	71	73	79	83	89	97	101	103	107							870	70	2.1881E+19
71	73	79	83	89	97	101	103	107	109							912	70	3.5597E+19
73	79	83	89	97	101	103	107	109	113							954	70	5.6655E+19
79	83	89	97	101	103	107	109	113	127							1008	70	9.8564E+19



**Рис. 6.** Диаграмма величины кодируемого диапазона.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 32-х разрядный процессор

Из диаграммы разрядности табличной реализации (рис. 1) следует, что в большинстве случаев увеличения значений модулей СОК общие затраты на реализацию процессора возрастают. При этом имеются отдельные системы оснований, такие как под номерами 3, 4, 7, 11, 22, 23 в табл. 1, которые требуют меньше затрат, чем предшествующие им в таблице системы. Но несмотря на эти факты, наименьшие затраты для табличной реализации даст система оснований 1, которая подбиралась в последовательном возрастании оснований, начиная с  $p_i = 2$ .

Затраты на реализацию модульных каналов в двоичной системе счисления (рис. 2), не так зависят от увеличения значений модулей, наоборот, наименьшие затраты наблюдаются у систем оснований 22–25, где величины модулей СОК наибольшие. Такие же затраты у системы оснований 11.

Анализ величины кодируемого диапазона (рис. 3) показывает, что наибольшее отклонение от требуемого диапазона  $2^{32} \approx 1,29 \cdot 10^9$  наблюдается у систем оснований 2, 6, 10, 18–21. Эти же системы оснований требуют наибольших аппаратных затрат как для двоичной, так и табличной реализации процессора СОК. Из этого можно сделать вывод, что выбираемая система оснований будет требовать меньше затрат, если перекрываемый ею рабочий диапазон будет лишь незначительно превышать кодируемый диапазон чисел.

С точки зрения однотипности и технологичности проектирования модульных каналов, наилучшими системами оснований являются те, которые при реализации в двоичной системе счисления имеют одинаковое количество разрядов. Это системы 12, 13, 19–25. Однако системы 19–21 требуют больших аппаратных затрат как для двоичной, так и табличной реализации, следовательно их применение в процессоре СОК нецелесообразно.

Системами оснований, удовлетворяющих всем трем критериям, описанным выше, являются системы 12 и 13.

Это наборы оснований {37, 41, 43, 47, 53, 59}, {41, 43, 47, 53, 59, 61}.

### 64-х разрядный процессор

Из диаграммы разрядности табличной реализации (рис. 4) лучшими системами оснований с точки зрения минимума аппаратных затрат являются, первые четыре системы, а так же 6, 9, 13, 19, которые требуют меньше затрат, чем предшествующие им системы счисления. Тем не менее, наименьших затрат для табличной реализации требует система оснований 1, которая подбиралась в последовательном возрастании оснований, начиная с  $p_i = 2$ .

При реализации модульных каналов в двоичной системе счисления (рис. 5) наименьшие затраты наблюдаются у систем оснований 19–21, где величины модулей СОК наибольшие.

Результаты анализа величины кодируемого диапазона (рис. 6) утверждают, что наибольшее отклонение от требуемого диапазона  $2^{64} \approx 1,84 \times 10^{19}$  наблюдается у систем оснований 2, 5, 8, 12, 18. Эти же системы оснований требуют наибольших аппаратных затрат для табличной, и особенно, двоичной реализации процессора СОК.

С точки зрения однотипности и технологичности проектирования модульных каналов, наилучшими системами оснований являются системы 19–22, которые при реализации в двоичной системе счисления имеют одинаковое количество разрядов, равное 7. Эти же системы оснований требуют наименьших аппаратных затрат при реализации процессора в двоичной системе счисления и имеют незначительные отклонения от кодируемого диапазона  $2^{64} \approx 1,84 \times 10^{19}$ . Однако эти системы при табличной реализации требуют больших затрат. Поэтому их следует рекомендовать для двоичной реализации процессора и наилучшей системой оснований из наборов 19–22 является набор 19 – {67, 71, 73, 79, 83, 89, 97, 101, 103, 107}.

Для табличной реализации можно рекомендовать наборы 1, 4, 6, которые удовлетворяют требованиям минимизации аппаратных затрат и незначительному отклонению от диапазона представления чисел  $2^{64}$ .

К системе оснований, наиболее полно удовлетворяющей всем трем критериям, описанным выше, следует отнести систему 13 – {41, 43, 47, 53, 59, 61, 67, 71, 73, 79, 83}.

Но так как процессор СОК аппаратно может быть реализован либо в двоичной системе счисления, либо в табличном виде, то следует выбирать системы модулей отдельно для каждой реализации.

### ВЫВОДЫ

Предложенный подход к обоснованию выбора величин модулей для процессоров СОК, основанный на критериях минимизации аппаратных затрат и однотипности реализации модульных каналов, представляет один из вариантов научного подхода к решению данной задачи. Он позволит

разработчикам упростить процедуру определения оснований СОК и сократить затраты на реализацию процессора.

Последующие исследования в вопросах выбора модулей для процессоров СОК могут быть направлены на обоснование и выбор величин контрольных оснований для избыточной системы остаточных классов при построении отказоустойчивых вычислительных устройств.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. Машинная арифметика в остаточных классах. М.: Советское радио, 1968, 440 с.
2. Малашевич Б. М. Система остаточных классов и модулярные супер-ЭВМ // История отечественной электронной вычислительной техники. М.: ИД «Столичная Энциклопедия», 2014. С. 179–201.
3. Червяков Н.И., Альгальда С.С. Аппаратная реализация алгоритмов преобразования из двоичной системы счисления в систему остаточных классов // Наука. Инновации. Технологии: научный журнал Северо-Кавказского федерального университета. Ставрополь, 2016. №3. С. 119–136.
4. Торгашов В.А. Система остаточных классов и надежность ЦВМ. М.: Сов. радио, 1973. 118 с.
5. Червяков Н.И. Нейрокомпьютеры в остаточных классах. М.: Радиотехника, 2003. 271 с.
6. Бережной В.В., Нагорнов Н.Н., Шалалыгин Д.Г. Выбор систем оснований для 32-разрядных процессоров в СОК // Материалы III-й ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука – региону» (г. Ставрополь, 14–25 апреля 2015 г.). Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2015 г. С. 182–185.

#### REFERENCES

1. Akushskij I.Ja., Judickij D.I. Mashinnaja arifmetika v ostatochnyh klassah (Machine arithmetic residual classes). M.: Sovetskoe radio, 1968, 440 s.
2. Malashevich B. M. Sistema ostatochnyh klassov i moduljarnye super-EVM (Residue number system and modular super-computer) // Istorija otechestvennoj jelektronnoj vychislitel'noj tehniky. M.: ID «Stolichnaja Jenciklopedija», 2014. S. 179–201.
3. Chervjakov N.I., Al'gal'da S.Ch. Apparatnaja realizacija algoritmov preobrazovanija iz dvoichnoj sistemy schislenija v sistemu ostatochnyh klassov (Hardware implementation of the conversion algorithms of the binary system in residue number system). // Nauka. Innovacii. Tehnologii: nauchnyj zhurnal Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta. Stavropol', 2016. №3. S. 119–136.
4. Torgashov V.A. Sistema ostatochnyh klassov i nadezhnost' CVM (The system of residual classes and reliability of digital computer). M.: Sov. Radio, 1973. 118 s.
5. Chervjakov N.I. Nejrokomp'jutery v ostatochnyh klassah (Neurocomputers in residual classes). M.: Radiotekhnika, 2003. 271 s.
6. Berezhnoj V.V., Nagornov N.N., Shalalygin D.G. Vybory sistem osnovanij dlja 32-razryadnyh processorov v SOK (Selection of systems grounds for 32-bit processors in RNS). // Materialy III-j ezhegodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta «Universitetskaja nauka – regionu» (g. Stavropol', 14–25 aprelja 2015 g.). Stavropol': Izd-vo SKFU, 2015 g. S. 182–185.

УДК 004.622, 621.3.084 **Кожевников А.А. [Kozhevnikov A.A.]****СИНТЕЗ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ,  
ПЕРВИЧНЫХ И ВТОРИЧНЫХ МОДУЛЯРНЫХ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ****The synthesis of analog-to-digital, primary and secondary modular converters**

В работе рассмотрен параметрический принцип построения модулярных преобразователей различного типа. На примере «нелепого курвиметра» показаны подходы к построению первичных преобразователей и проблемы их применения на практике. В качестве решения предлагается осуществить поиск подходящих физических явлений. Представлен новый способ вторичного измерительного преобразования посредством перевода уровня входного напряжения к уровню выходного пропорционально вычету по основанию  $p$ . При линейном росте входного напряжения от 0 до  $E$ , выходное напряжение  $P/p$  раз линейно изменяется от 0 до  $E$ , мгновенно переходя в 0 при достижении уровня  $E$ . При дискретизации с частотой меньшей, чем у сигнала происходит смещение спектра из любой зоны Найквиста в первую (элайсинг), что и положено в основу работы рассматриваемого модулярного АЦП. Последовательное деление уровня входного сигнала с итоговым выделением остатка по модулю является наиболее популярным подходом при синтезе конвейерных модулярных АЦП.

The paper considers a parametric principle of building modular converters on the basis of a number of the measuring devices. On the example of «absurd odometer» shows the approaches to the construction of primary converters and problems of their application in practice. The solution is offered to search for suitable physical phenomena. A new method for measuring the secondary conversion by the input voltage level translation to the level of output in proportion to the deduction for  $p$  base. A linear increase in input voltage from 0 to the  $E$ , the output voltage of  $P/p$  times varies linearly from 0 to the  $E$ , immediately goes to 0 when it reaches the level of  $E$ . When sampling at a frequency less than that of the signal spectrum is shifted from any Nyquist zone in the first (aliasing), which form the basis of the work under consideration modular ADC. The consistent division of the input signal level to the final allocation of the balance of the module is the most popular approach in the synthesis of pipelined ADC modular.

**Ключевые слова:** система остаточных классов, модулярный преобразователь.

**Key words:** residual number system, modular converter.

**ВВЕДЕНИЕ**

Прежде чем попасть на «стол» цифровой обработки, сигнал должен быть извлечен и приведен к нужному формату. Этому процессу служат измерительные преобразователи всех типов. Сегодня активно исследуется возможность эффективного преобразования непосредственно к виду системы остаточных классов. Однако, исходя только из вычислительных методов модулярной арифметики [1–4], решить данную проблему оказалось невозможным. Сам же процесс преобразования, являясь по сути аналогом математической операции деления по модулю, вынужден опираться на различные физические явления, реализуемые в единой измерительной системе. Этот физико-математический дуализм ставит еще более фундаментальный вопрос: а что же такое есть «модулярный измерительный преобразователь»? В узком смысле ответом является устройство, реализующее функцию перевода входного сигнала к формату системы остаточных классов в цифровой или анало-

говой форме. В более широком – это набор принципов, раскрывающих алгоритм синтеза таковых устройств. Под параметрическим принципом понимается, что в результате преобразования информация о значении остатка по модулю содержится в амплитуде (уровне), частоте или разности фаз некоторой физической величины. Целью работы является иллюстрация подходов параметрического принципа на примере первичных, вторичных и аналого-цифровых модулярных измерительных преобразователей.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основным инструментом при синтезе модулярных преобразователей являются известные технические принципы построения в первую очередь позиционных устройств, поскольку их естественная природа взаимосвязи входного и выходного параметров, близкая к линейной, является причиной широчайшей номенклатуры существующих приборов. Среди измерительных преобразователей выделяют первичные, вторичные, аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые (ЦАП). Если рассмотреть эти устройства в виде модели «черного ящика», то отличие одного от другого будет заключаться исключительно в виде и форме представления входной и выходной физической величины.

Первичными преобразователями являются как маленькие датчики, так и пространственно разнесенные на большие расстояния системы, например гравитационно-волновые интерферометры [5]. Измерениям подвергаются всевозможные параметры всех физических субстанций, до которых могут «дотянуться» современные технические средства. Вид и форма выходной величины определяется подходом к дальнейшей обработке полученной информации. В бытность первых аналоговых вычислительных машин такие системы имели механическую природу. Сегодня наиболее распространены ЭВМ, поэтому преобразование производится к параметру электрической величины (тока, напряжения, сопротивления, индуктивности или емкости) не только в аналоговой, но и цифровой форме. Например, в энкодере часто угол поворота сразу приводится к коду Грея, что позволяет не только напрямую подключать этот датчик к вычислительной системе, но и использовать положительные качества помехозащищенности такого подхода. Также выходная информация может быть представлена параметрами электромагнитного излучения в силу его широкого применения в телекоммуникационных системах, а также потенциальных возможностей оптических вычислителей.

Вторичные преобразователи реализуются в рамках одной физической величины, например напряжения. Задача такого устройства состоит в изменении значения параметра или смена параметра в соответствии с заданной функцией. Самый простой пример – операционный усилитель, увеличивающий в зависимости от настройки входное напряжение в  $k$  раз, где  $k \geq 1$ . Преобразовать напряжение в частоту или продолжительность импульса (фа-

зу) позволяет интегратор, таким образом осуществляя переход от одного параметра применяемой величины к другому.

АЦП предназначены для получения информации об измеряемой величине в цифровой форме. В качестве входного обычно используется заранее подготовленный первичными и вторичными преобразователями, представленный в удобном для дальнейшей обработки виде сигнал, такой как аналоговое напряжение, ток или когерентное излучение. Базовые технические принципы построения АЦП отражаются в подходах к квантованию по уровню и дискретизации по времени. Это проявляется в методах преобразования в первую очередь наличием или отсутствием обратной связи в схеме взвешивания входной величины. Первые отличаются большей точностью, но меньшей скоростью, вторые – наоборот. Рассмотрим основные методы позиционного аналого-цифрового преобразования и реализующие их архитектуры устройств [7].

1) FLASH – параллельный, он же АЦП прямого взвешивания, – наиболее быстрый, но наименее точный. Такой АЦП содержит  $2^N$  резисторов одинакового номинала, соединенных в цепочку и формирующих опорные напряжения для  $2^N$  компараторов. Двоичный код с компараторов попадает на дешифратор, где формируется двоичный позиционный код разрядности  $N$ .

2) PIPELINE – конвейерный. Состоит из последовательного ряда каскадов, каждый из которых содержит flash-АЦП низкого разрешения, цифро-аналоговый преобразователь и усилитель. Они последовательно преобразуют аналоговый входной сигнал в цифровой, осуществляя конвейерную обработку данных.

3) SAR – последовательного приближения. В основе работы этого класса преобразователей лежит принцип дихотомии, т.е. пошагового сравнения измеряемой величины с последовательно изменяемым значением на  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/8$  и т.д. от максимального. Это позволяет для  $N$ -разрядного АЦП последовательного приближения выполнить весь процесс преобразования за  $N$  последовательных шагов.

4)  $\Sigma\Delta$  – сигма-дельта. Здесь избыточная дискретизация увеличивает полное отношение «сигнал-шум» на низких частотах, профилируя шум квантования таким образом, что наибольшая его часть оказывается за пределами рабочего диапазона частот. После чего цифровой фильтр устраняет этот шум за границей частотного диапазона, а дециматор вновь преобразует выходную частоту передачи данных к частоте Найквиста [6].

ЦАП гораздо более просто организованы нежели АЦП, поскольку входная информация жестко задана цифровой формой. Переход к аналоговому сигналу осуществляется посредством умножения разряда на некоторую константу в виде уровня тока или напряжения, и суммирования полученных слагаемых. Для сглаживания ступенек дискретного динамического перехода используется низкочастотная фильтрация.

Особенность работы вторичных преобразователей, АЦП и ЦАП в рамках одной физической величины нередко приводит к тому, что в состав одного типа устройств включается другой. Так сигма-дельта использует промежуточный переход от уровня в частоту сигналов, АЦП последовательного приближения передает через ЦАП полученный на  $i$ -ом шаге цифровой эквивалент обратно на взвешивание  $i + 1$ -й итерации и т.д. Таким образом, весь спектр рассмотренных технических подходов можно спроецировать на особенности математических эволюций, связывающих позиционное и непозиционное представление чисел и, соответственно, их эквиваленты в теле реализуемых устройств. При этом необходимо учитывать основное направление: исследование возможности использования любого параметра применяемой физической величины (напряжения) для синтеза модулярных измерительных преобразователей различного типа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Различия в технической реализации определенного параметра физической величины в рамках измерительного преобразователя одного типа накладывают ограничения на синтез эффективных устройств. С другой стороны, возможность иллюстрации сквозного проникновения реализуемого принципа через всю область текущего научного исследования показывает целесообразность данного подхода к рассматриваемому кругу проблем и задач.

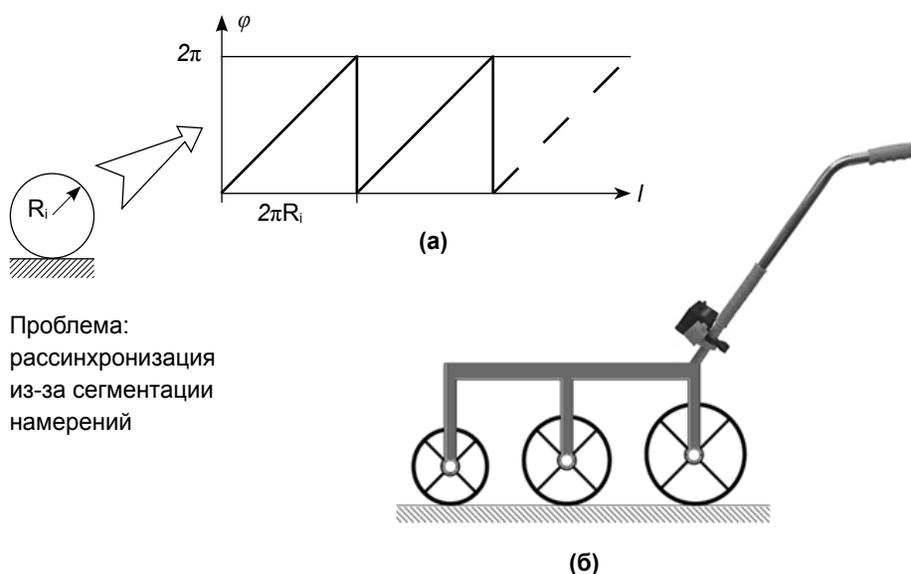
### Фазо-пространственное распределение

Значение фазы переменной физической величины распределено во времени и в пространстве проводника, при этом, в зависимости от природы явления, фиксирование разности фаз удобнее производить или в первом, или во втором измерении. В качестве примера фазо-пространственного распределения рассмотрим первичный преобразователь на основе колеса. Образцами таких устройств могут служить курвиметры или датчики угла поворота.

Вращаясь колесо курвиметра преобразует пройденное расстояние в угол поворота, соответственно распределяя фазу в пространстве (рис. 1, а). Механическая фаза затем преобразуется в пилообразный сигнал электрического тока или его аналог. Для синтеза модулярного курвиметра необходимо использовать количество колес равное числу оснований применяемой системы остаточных классов (СОК) (рис. 1, б), при этом  $i$ -й радиус есть:

$$R_i = \frac{p_i \cdot l_{\text{one}}}{2\pi}, \quad (1)$$

где  $p_i$  – основание СОК,  $i = (\overline{1, n})$ ,  
 а  $n$  – количество оснований СОК,  
 $l_{\text{one}}$  – единичная длина.

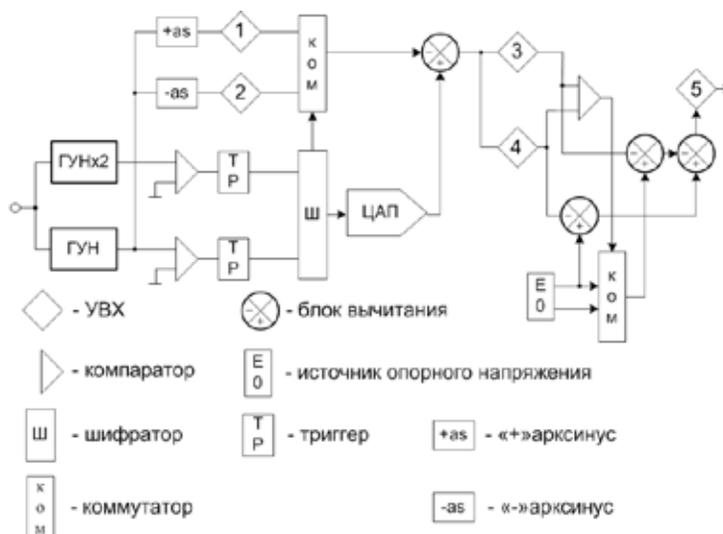


Проблема:  
рассинхронизация  
из-за сегментации  
намерений

**Рис. 1.** Работа секции преобразователя (а) и модулярный курвиметр (б).

Из рисунка следуют также и очевидные проблемы модулярных первичных преобразователей. Для нормального формирования числа в СОК необходима единовременная смена значений вычетов в каждом сегменте, что может быть не всегда достижимо, поскольку синхронизация осуществляется на уровне физики измеряемого параметра. Также необходимо учитывать что, пространственное разделение измеряющих сегментов (колес) при наличии градиента в скорости изменения параметра приведет к еще большим ошибкам. Вся эта совокупность требований к конструкции устройства для обеспечения физики преобразования выглядит крайне неэффективной и обозначается нами как проблема «нелепого курвиметра».

Отсутствие среди характеристик твердотельных датчиков близких к виду продолжительного пилообразного сигнала при линейном росте измеряемого параметра является еще более фундаментальной проблемой. Потенциально только аналоги физике туннельного диода, обладающего N-образной вольтамперной характеристикой, могут быть привлечены к построению первичных устройств. Таким образом, для синтеза эффективных модулярных первичных измерительных преобразователей необходимо не только нивелировать обозначенные конструкционные особенности, но осуществить поиск подходящих физических явлений.



**Рис. 2. Вторичный модулярный измерительный преобразователь.**

### Распределение фазы по времени

В силу большого значения длины волны ( $> 30$  см) в устройствах, работающих на свойствах электрического переменного тока догигагерцовой частоты, невозможно создать компактный преобразователь на основе фазо-пространственного распределения (не рассматриваются устройства на основе поверхностных акустических волн (ПАВ)). В таких системах традиционно осуществляется выборка фаз гармоники через жестко заданный промежуток времени, в течение которого частота сигнала постоянна, и определяется разность:

$$\Delta\varphi = [\varphi_{\text{кв}2} - (-1)^{k_2} \cdot \arcsin(\sin(2\pi f t_2))] - [\varphi_{\text{кв}1} - (-1)^{k_1} \cdot \arcsin(\sin(2\pi f t_1))], \quad (2)$$

где  $\varphi_{\text{кв}2}$  и  $\varphi_{\text{кв}1}$  – угол кратный  $90^\circ$  в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ ;  
 $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , принимающие значение «0» или «1» в зависимости от квадранта и режима;  
 $f$  – частота гармонического колебания.

Устройство на рис. 2 переводит уровень входного напряжения к уровню выходного пропорционально вычету по основанию  $p_1$ . При линейном росте входного напряжения от 0 до  $E$ , выходное напряжение  $P/p_1$  раз линейно изменяется от 0 до  $E$ , мгновенно переходя в 0 при достижении уровня  $E$ . Здесь  $P = \prod_{j=1}^n p_j$  – объем диапазона чисел СОК. Для применения метода (2) входной уровень преобразуется генератором управляемого напряжением

(ГУН) в гармонику. Поскольку разность фаз гармоники на постоянном промежутке времени прямо пропорциональна частоте, а частота с ГУН прямо пропорциональна входному напряжению, то первое эквивалентно последнему. Пусть изменению входного напряжения от 0 до  $E$  соответствует диапазон выходных частот ГУН от 0 до  $F_{\max}$ , тогда время между двумя замерами  $t_2 - t_1 = T_d$  – период дискретизации, есть:

$$T_d = \frac{P}{p_1 F_{\max}}. \quad (3)$$

Эквиваленты замеров фаз – уровни напряжения – в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  определяются из выражений:

$$\begin{cases} U_1 = U_{\text{кв}1} - (-1)^{k_1} \cdot E \cdot \arcsin(\sin(2\pi f t_1)) / (2\pi), \\ U_2 = U_{\text{кв}2} - (-1)^{k_2} \cdot E \cdot \arcsin(\sin(2\pi f [t_1 + T_d])) / (2\pi), \end{cases} \quad (4)$$

где  $U_{\text{кв}1,2}$  – напряжения, кратные  $E/4$  и определяемые по номеру квадранта,

$k_{1,2}$  – коэффициенты, определяемые по номеру квадранта. Конечный результат, соответствующий разности фаз и модулярному представлению входного уровня напряжения, есть:

$$\begin{cases} (E - U_1) - (E - U_2), U_2 \geq U_1 \\ (E - U_1) - (0 - U_2), U_2 < U_1. \end{cases} \quad (5)$$

Рассмотрим работу устройства. На вход подается преобразуемый уровень напряжения. ГУН синтезирует гармонический сигнал с частотой, пропорциональной входному уровню. ГУНх2 синтезирует гармонический синхронизированный с ГУН сигнал с удвоенной частотой. Гармоники преобразуются в прямоугольные сигналы на компараторах. На момент начала периода дискретизации запоминаются уровни напряжения арксинусов в УВХ 1 и 2, а также цифровые значения с компараторов – в триггерах. Далее шифратор синтезирует соответствующий определенному квадранту код, который преобразуется ЦАП в уровень аналогового сигнала. Из напряжения квадранта вычитается положительное или отрицательное значение арксинуса и запоминается УВХ 4 (напряжение  $U_1$ ), тем самым фиксируется первое значение фазы. Через время, равное периоду дискретизации (3), аналогичным образом замеряется вторая фаза, а ее эквивалент в виде уровня напряжения сохраняется в УВХ 3 (напряжение  $U_2$ ). Далее, полученные эквиваленты сравниваются компаратором, и если  $U_1 > U_2$ , то на блок вычитания через коммутатор поступает напряжение  $E$  с опорного источника, а если  $U_2 \geq U_1$ , то  $-0$ . В итоге, через несколько операций вычитания формируется результат выражения (5) и реализуется измерение входного уровня напряжения пропорционально модулярному представлению.

### Модулярное преобразование через смещение частоты

Частотный подход параметрического принципа рассмотрен в работах [7, 8]. Эффект элайсинга возникает при дискретизации на АЦП с частотой меньшей, чем у сигнала. Таким образом можно осуществить смещение спектра из любой зоны Найквиста в первую, что и положено в основу работы рассматриваемого модулярного АЦП. Для квантования уровня входного напряжения его сначала необходимо преобразовать в гармонику с частотой:

$$f = F \cdot \frac{U_{\text{вх}}}{E} + f_n, \quad (6)$$

где  $F$  – диапазон рабочих гармонических частот, который синтезируется ГУН,  
 $f_n$  – начальная частота ГУН,  
 $E$  – диапазон рабочих напряжений модулярного АЦП,  
 $U_{\text{вх}}$  – преобразуемый уровень входного сигнала.

Далее спектр синтезированной гармоники смещается в первую зону Найквиста посредством  $n$  основных элементарных АЦП  $i$  (рис. 3), работающих с частотой выборки:

$$f_i = F \cdot \frac{2 \cdot p_i}{P}, \quad (7)$$

где  $P = \prod_{i=1}^n p_i$  – количество уровней квантования модулярного АЦП.

Аналогичная ситуация реализована и в дополнительной ветви, за исключением того, что синтезируется  $n$  гармоник на ГУН( $d_i$ ) с начальной частотой увеличенной на  $f_i/4$ .

На  $n$  основных и  $n$  дополнительных АЦП формируется по  $2^K$  ( $K$  – целое положительное) выборок, что является обязательным для реализации быстрого преобразования Фурье (БПФ), при этом должно выполняться условие:

$$2^K_i > 2 \cdot p_i, 2^K_i \rightarrow \min. \quad (8)$$

Спецпроцессоры БПФ формируют по  $(2^{K-1}) + 1$  значений амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в пределах первой зоны Найквиста. Переход к непозиционному представлению можно осуществить через интерполяцию к вычетам по основаниям  $p_i$  для основной ветви, и по основанию 2 – в дополнительной. В представленном примере (рис. 4) по основанию  $p_i = 7$  максимальная площадь под кривой АЧХ в соответствующей непозиционной полосе частот дает значения: в основной ветви 2, а в дополнительной 1. Если спектр исходной гармоники располагался в четной зоне Найквиста, то в первой формируется отраженное изображение и, соответственно, отражен-

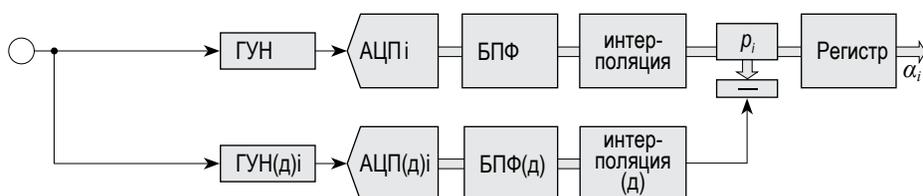


Рис. 3. Тракт модулярного АЦП на основе злайсинга.

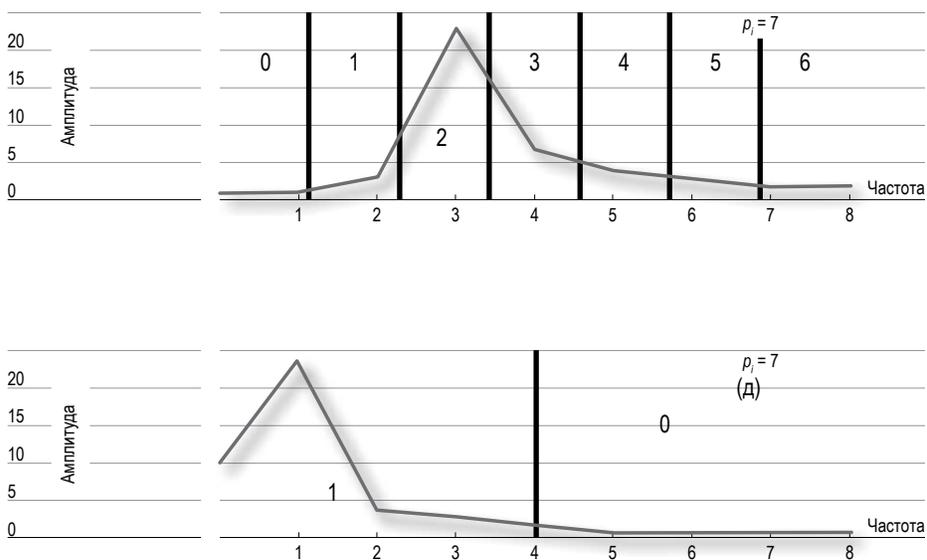


Рис. 4. Результат работы блоков БПФ и интерполяция к вычету по модулю  $p_i = 7$ .

ное значение вычета. Исходя из признака четности, синтезируемого в дополнительной ветви, производится или не производится вычитание полученного остатка из значения  $p_i - 1$ . В рассмотренном примере (рис. 4) окончательное значение вычета по основанию  $p_i = 7$  есть  $\alpha_i = (7 - 1) - 2 = 4$ . Таким же образом формируется код вычетов и в остальных трактах.

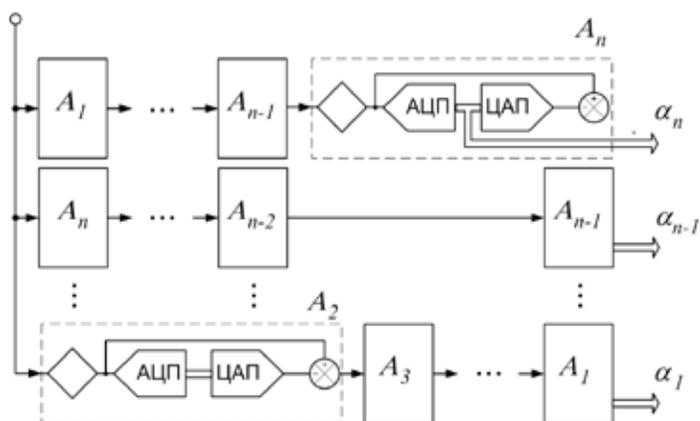


Рис. 5. Конвейерный модулярный АЦП.

### Деление уровня по модулю

Последовательное деление уровня входного сигнала с итоговым выделением остатка по модулю является наиболее популярным подходом при синтезе конвейерных модулярных АЦП [4, 9–11]. Рассмотрим базовый вариант таких устройств (рис. 5, обозначения аналогичны рис. 2).

АЦП в СОК с конвейерной параллельной структурой по  $n$  основаниям  $p_1, p_2, \dots, p_n$  состоит из  $n$  трактов, по  $n$  звеньев «АЦП  $A_i$ » ( $i = 1, n$ ) в каждом тракте. Каждое звено «АЦП  $A_i$ » содержит элементарный АЦП и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) с количеством уровней квантования, равным  $p_i$ . В каждом звене формируются целая часть от деления на модуль  $p_i$  и вычленяется остаток в виде разницы в аналоговом сигнале между входным значением и значением с ЦАП. После чего остаток в виде уровня напряжения усиливается в  $p_i$  раз. В  $n$ -ом по порядку звене тракта в качестве целой части от деления на  $p_i$  формируется значение вычета как последний разряд полиадического числа. Крайние разряды всех трактов и определяют число в СОК.

### ВЫВОДЫ

Приведенные примеры наглядно иллюстрируют влияние рассмотренного принципа на алгоритмы построения и функционирования устройств, пока не претендуя на дальнейшую их реализацию в реальных приборах. Тем не менее, понимание пределов применимости подходов параметрического принципа позволит оценить правильность выбранного направления при синтезе эффективных модулярных преобразователей.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ  
СПИСОК**

1. Акушский И.Я. Машинная арифметика в остаточных классах / И.Я. Акушский, Д.И. Юдицкий // М.: Сов. радио. 1968. 440 с.
2. Амербаев В.М. Применение информационной избыточности для повышения надежности арифметического узла вычислительного элемента бимодульной арифметики / В.М. Амербаев, Е.С. Балака, Д.В. Тельпухов, Р.А. Соловьев // Наука. Инновации. Технологии. 2015. №1. С. 36-50
3. Лавриненко А.В. Метод преобразования кода системы остаточных классов в позиционный с коррекцией ошибок на основе искусственных нейронных сетей / А.В. Лавриненко // Наука. Инновации. Технологии. 2015. №3. С. 7–36.
4. Аппаратная реализация алгоритмов модулярной арифметики: сб. статей / Под ред. В.П. Ирхина, А.А. Кожевникова // LAP LAMBERT Academic Publishing. 2015. 85 с.
5. Гусев А.В., Руденко В.Н., Юдин И.С. Низкочастотные сигналы больших гравитационно-волновых интерферометров / А.В. Гусев, В.Н. Руденко, И.С. Юдин // ЖЭТФ. 2014. Т. 146. №4(10). С. 779–793.
6. Аналого-цифровое преобразование / Под ред. Уолта Кестера. / Пер. с англ. М.: Техносфера. 2007. 1016 с.
7. Кожевников А.А. Методы непозиционного аналого-цифрового преобразования / А.А. Кожевников, К.П. Беспалов // Автометрия. 2015. Т. 51. №6. С. 125–130.
8. Пат. 2589388 Российская Федерация, МПК7 H03M1/34. Алиасный аналого-цифровой преобразователь / Кожевников А.А. и др. – заявл. 12.01.2015; опубл. 10.07.2016.
9. Кожевников А.А. Аналого-цифровые преобразователи в системе остаточных классов / А.А. Кожевников // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. 2010. №9. С. 26–28.
10. Кожевников А.А. Конвейерные аналого-цифровые преобразователи, функционирующие в системе остаточных классов / А.А. Кожевников, К. П. Беспалов // Динамика сложных систем – XXI век. 2014. № 3. С. 11–14.
11. Пат. 2546621 Российская Федерация, МПК7 H03M1/28. Аналого-цифровой преобразователь в системе остаточных классов/ Кожевников А.А. и др. – заявл. 09.01.2014; опубл. 10.04.2015.

**REFERENCES**

1. Akushskii I.Y. Mashinnaya arifmetika v ostatochnih klassah (Machine arithmetic in residual classes) / I.Y. Akushskii, D.I. Yuditskii // M. : Sov. Radio. 1968. 440 p.
2. Amerbaev V.M. Primenenie informatsionnoy izbitochnosti dlya povsheniya nadezhnosti arifmeticheskogo uzla vichislitel'nogo elementa bimodul'noy arifmetiki (The use of information redundancy to improve the reliability of the arithmetic unit computational element bimodule arithmetic) / V.M. Amerbaev, E.S. Balaka, D.V. Telpuhov,

- R.A. Solovyov // Science. Innovations. Technologies. 2015. №1. P. 36–50.
3. Lavrinenko A.V. Metod preobrazovaniya koda sistemi ostatochnih klassov v pozitsionniy s korrektsiey oshibok na osnove iskusstvennih neyronnih setey (A method of converting from the residual code into the positional number system with correction based on the error of artificial neural networks) / A.V. Lavrinenko // Science. Innovations. Technologies. 2015. №3. P. 7–36.
  4. Apparalnaya realizatsiya algoritmov modularnoy arifmetiki: sbornik statey (Hardware implementation of modular arithmetic algorithms: a collection of articles) / Edited by Irkhin V.P., Kozhevnikov A.A. // LAP LAMBERT Academic Publishing. 2015. 85 p.
  5. Gusev A.V., Rudenko V.N., Yudin I.S. Nizkochastotniye signali bolshih gravitacionno-volnovih interferometrov (Low-frequency signals of large-scale gravitational-wave interferometers) / A.V. Gusev, V.N. Rudenko, I.S. Yudin // ZhETF. 2014. V. 146. №4(10). P. 779–793.
  6. Analogo-tcifrovoye preobrazovanie (Analog-Digital Conversion) / Edited by Walt Kester // M: Tehnosfera. 2007. 1016 p.
  7. Kozhevnikov A.A. Metodi nepozitsionnogo analogo-tcifrovogo preobrazovaniya (Nonpositional analog-digital conversion methods) / A.A. Kozhevnikov, K.P. Bepalov // Avtometriya. 2015. V. 51. №6. P. 125–130.
  8. Patent RF № 2589388, MPK7 H03M1/34. Aliasny analogo-tcifrovoy preobrazovatel (Analog-to-digital converter based on aliasing) / A.A. Kozhevnikov etc. – appl. 01.12.2015; publ. 07.10.2016.
  9. Kozhevnikov A.A. Analogo-tcifrovie preobrazovateli v sisteme ostatochnih klassov (Analog-to-digital converters in residual number system) / A.A. Kozhevnikov // Neurocomputers: development and application. 2010. №9. P. 26–28.
  10. Kozhevnikov A.A. Konveyerniye analogo-tcifrovie preobrazovateli, funkcioniruyutshie v sisteme ostatochnih klassov (Pipelined analog-to-digital converters operating in a residual number system) / A.A. Kozhevnikov, K.P. Bepalov // Dynamics of complex systems - XXI century. 2014. № 3. P. 11–14.
  11. Patent RF № 2546621, MPK7 H03M1/28. Analogo-tcifrovoy preobrazovatel v sisteme ostatochnih klassov (Analog-to-digital converter in residual number system) / A.A. Kozhevnikov etc. - appl. 09.01.2014; publ. 04.10.2015.

УДК 004.272+514.743.2 **Макоха А.Н. [Makokha A.N.],**  
**Тышляр Т.Е. [Tyshlyar T.E.]**

## **ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ТЕНЗОРНЫХ ОПЕРАЦИЙ**

### **Constructing and analyzing algorithms of tensor operation paralleling**

В данной статье алгоритмы сложения, умножения и свертки тензоров рассмотрены с точки зрения возможности их распараллеливания. Разработаны графы этих алгоритмов и проведен их анализ с точки зрения прогнозируемых величин ускорения и эффективности. Предполагается, что время выполнения любых вычислительных операций является одинаковым и равно некоторой единице времени, а передача данных между вычислительными устройствами выполняется мгновенно без каких-либо затрат времени (что допустимо, например, для параллельной вычислительной системы с общей разделяемой памятью). В частности, показано, что для операции сложения тензоров время наиболее быстрого исполнения алгоритма при неограниченном числе процессоров будет равно длине максимального пути графа, то есть минимальное время выполнения алгоритма будет достигнуто при количестве процессоров, равном количеству компонент тензора. Аналогичный анализ проведен для алгоритмов выполнения операций умножения и свертки тензоров. Все результаты исследований подтверждены соответствующими математическими выкладками и наглядно проиллюстрированы на соответствующих графах.

The algorithms of tensors' summing, multiplying and collapsing are observed in that issue from the perspectives of those paralleling possibilities. The graphs of these algorithms are developed and analyzed from the point of the forecasted values of the acceleration and efficiency. It is assumed that the time of execution for all computing operations is same and equal to a unit of time, and data transfer between computer devices is performed instantaneously without any time consuming (it is acceptable, for example, a parallel computing systems with shared memory). In particular, it is shown that for the tensors' addition the time of the fastest execution of algorithm for an unlimited number of processors is equal to the length of the maximum path in the graph. In other words, the minimum time of the algorithm will be achieved when the number of processors is equal to the number of components of the tensor. A similar analysis was performed for the algorithms of multiplication and convolution of tensors.

**Ключевые слова:** тензорные операции, параллельные вычисления, граф алгоритма, ускорение, эффективность.

**Key words:** tensor operations, paralleling calculations, graph of the algorithm, acceleration, efficiency.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Тензорные вычисления имеют широкую область применения. Они являются необходимым инструментом в различных естественнонаучных направлениях, таких как геометрия, физика, механика, квантовая химия, кристаллофизика и многих других. В частности, разработка квантовой теории относительности, теории объединенных полей, теории наноструктур ведется главным образом методами тензорного исчисления [4].

Использование тензорного аппарата подразумевает большие объемы вычислений, которые крайне сложно производить вручную, поэтому необходима

автоматизация при выполнении тензорных операций. Чаще всего при проведении исследований используются следующие подходы к автоматизации тензорных вычислений: разработка программных комплексов с использованием языков высокого уровня; использование специализированных математических пакетов; моделирования операций над тензорами на нейронных сетях.

Разработка программных комплексов обычно используется для решения какой-то конкретной задачи (либо класса задач) и не подразумевает универсальности. Все сведения об используемых тензорах и выполняемых над ними операциях вводятся на этапе разработки, а пользователь только задает определенные параметры для вычислений. Примерами подобных комплексов могут послужить: программный комплекс для автоматизации моделирования нестационарных процессов в механических системах и системах иной физической природы PRADIS (модуль «Элементы сплошной среды», в котором для вычисления интенсивности напряжений используется расчет значений компонент тензора напряжений); ЭСПРИ 2013 (разделы «Стальные конструкции» и «Железобетонные конструкции»), в которых на основании значений тензора напряжений определяются значения главных деформаций, углы наклона главных напряжений к текущим осям, а также угол наклона плоскости трещины к оси  $X$ .

Для получения более универсальных вычислительных средств необходима автоматизация основных операций над тензорами: сложения, умножения, умножения на число, свертки, симметрирования, альтернирования и ковариантного дифференцирования тензоров. Для выполнения подобных операций возможно применение математических пакетов.

Наиболее популярными программными пакетами для работы с многомерными объектами являются Maple, Mathcad, Matlab и Mathematica. В пакетах Mathcad, Matlab и Mathematica нет специализированных средств для работы с тензорами, однако тензор может быть представлен как многоиндексный (вложенный) массив, и операции над ним производятся как операции над матрицами.

Выполнение операций над тензорами, особенно в многомерных пространствах, делает актуальным вопрос об их распараллеливании. Как одна из возможностей для распараллеливания в работах [5]–[8] рассматривались модели нейронных сетей для реализации операций тензорной алгебры: сложения, умножения тензоров, умножения тензора на скаляр, симметрирования и альтернирования тензора.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Рассмотрим алгоритмы выполнения некоторых алгебраических операций над тензорами с точки зрения из распараллеливания. Одним из важнейших моментов при разработке параллельных вычислительных алгоритмов, является оценка получаемого ускорения процесса вычислений (уменьшения времени выполнения вычислений).

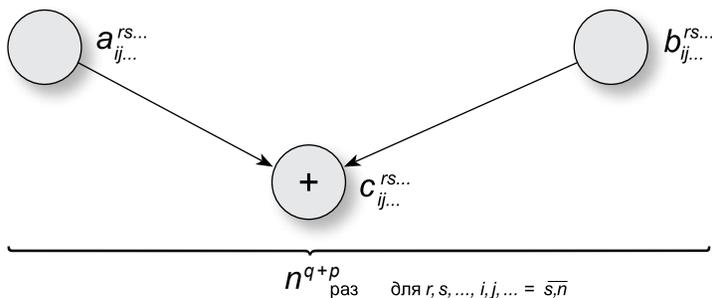
Будем представлять алгоритмы в виде ациклического ориентированного графа алгоритма  $G = (V, R)$ , где  $V$  – множество вершин графа,  $R$  – множество дуг графа [1, 3]. Вершинам графа соответствуют операции алгоритма. Дуга  $r = (i, j)$  принадлежит графу только в том случае, если операция  $j$  использует результат операции  $i$ . Для простоты модели будем предполагать, что время выполнения любых вычислительных операций является одинаковым и равно некоторой единице времени. Кроме того примем, что передача данных между вычислительными устройствами выполняется мгновенно без каких-либо затрат времени (что допустимо, например, для параллельной вычислительной системы с общей разделяемой памятью).

Операции алгоритма, между которыми нет пути в рамках выбранной схемы вычислений, могут быть выполнены параллельно. Зададим множество  $H_p = \{(i, P_i, t_i) : i \in V\}$  (где  $p$  – количество используемых процессоров), в котором для каждой операции  $i \in V$  указывается номер используемого для операции процессора  $P_i$  и время начала операции  $t_i$ . При этом один процессор не может выполнять разные операции в один и тот же момент времени, и к назначенному времени выполнения операции все используемые для нее данные должны быть вычислены.

Граф  $G$  совместно с множеством  $H_i$  может рассматриваться как модель параллельного алгоритма, исполняемого с использованием  $p$  процессоров. При этом можно говорить о следующих оценках:

- $T_p(G, H_p) = \max_{i \in V} (t_i + 1)$  – время выполнения параллельного алгоритма;
- $T_p(G) = \min_{H_p} T_p(G, H_p)$  – минимальное время исполнения алгоритма для выбранной схемы вычислений при использовании оптимального расписания  $H_p$ ;
- $T_p = \min_G T_p(G)$  – минимальное время исполнения алгоритма при использовании наилучшей вычислительной схемы;
- $T_\infty = \min_{p \geq 1} T_p$  – минимально возможное время выполнения параллельного алгоритма при использовании неограниченного количества процессоров;
- $T_i$  – время выполнения алгоритма при использовании одного процессора (время выполнения последовательного алгоритма решения задачи).

Ускорение, получаемое при использовании параллельного алгоритма для  $p$  процессоров, по сравнению с последовательным вариантом выполнения вычислений определяется величиной  $S_p = T_i/T_p$ , т.е. как отношение времени последовательного решения задачи к времени выполнения параллельного алгоритма.



**Рис. 1.** Граф алгоритма для операции сложения тензоров.

Средняя доля времени выполнения алгоритма, в течение которой процессоры реально задействованы для решения задачи, называется эффективностью использования параллельным алгоритмом процессоров при решении задачи и определяется соотношением

$$E_p = \frac{T_1}{pT_p} = \frac{S_p}{p} \quad [3]$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### 1. Операция сложения тензоров

Сложение тензоров определяется формулой

$$c_{ijk}^{rsK} = a_{ijk}^{rsK} + b_{ijk}^{rsK},$$

где  $a_{ijk}^{rsK}$ ,  $b_{ijk}^{rsK}$ ,  $c_{ijk}^{rsK}$  – тензоры, валентности  $g + q$ , где  $g$  – число нижних индексов,  $g$  – верхних, при этом каждый из индексов принимает значение от 1 до  $n$ , где  $n$  – размерность пространства, в котором заданы тензоры.

Таким образом, при сложении двух тензоров складываются их соответствующие компоненты. Результатом будет тензор той же валентности, что и тензоры-слагаемые. Вычисление каждой из компонент тензора выполняется независимо от остальных компонентов.

Количество компонентов такого тензора, и, соответственно, необходимое количество операций сложения компонентов тензора для выполнения сложения, равно  $n^{g+q}$ .

Граф алгоритма для выполнения данной операции представлен на рис. 1. Проанализируем предложенную вычислительную схему.

Время последовательного выполнения данного алгоритма будет равно количеству вершин схемы без учета вершин ввода, т.е.  $T_i = n^{g+q}$ .

Время наиболее быстрого исполнения алгоритма при неограниченном числе процессоров будет равно длине максимального пути графа, т.е.  $T_\infty = 1$ .

Времени выполнения алгоритма, сопоставимого с минимальным временем, можно достичь при количестве процессоров  $p \geq T_1/T_\infty$  [3], в данном случае  $p \geq \frac{n^{g+q}}{1} = n^{g+q}$ . То есть минимальное время выполнения алгоритма будет достигнуто при количестве процессоров, равном количеству компонент тензора.

Когда количество процессоров меньше количества компонент тензора, время выполнения алгоритма может быть оценено равенством  $T_p = \left\lceil \frac{n^{g+q}}{p} \right\rceil$ , где знак  $\lceil \cdot \rceil$  означает ближайшее сверху целое число.

Тогда величина ускорения алгоритма

$$S_p = \frac{n^{g+q}}{\left\lceil \frac{n^{g+q}}{p} \right\rceil}.$$

При  $n^{g+q}$  кратном  $p$  ускорение при использовании параллельных вычислений будет равно  $p$ , в противном случае – будет близко к числу  $p$ , то есть будут выполняться неравенства

$$\frac{n^{g+q} p}{n^{g+q} + p} < S_p \leq p.$$

Эффективность выполнения алгоритма может быть оценена неравенствами

$$\frac{n^{g+q}}{n^{g+q} + p} < E_p \leq 1.$$

Для сравнения, основываясь на проведении моделирования операции сложения тензоров на нейронной сети, при вычислении суммы тензоров удается сократить время в  $2n^p$  раз, где  $p$  – валентность складываемых тензоров,  $n$  – размерность пространства.

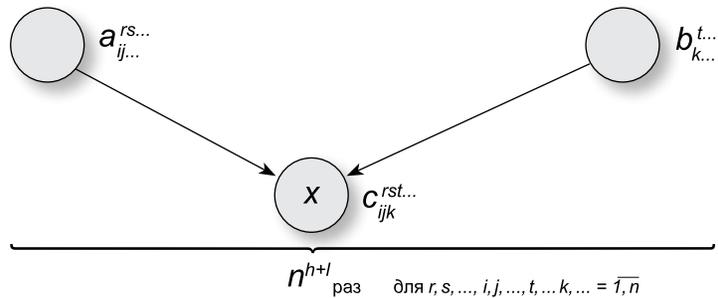
## 2. Операция умножения тензоров

Операция умножения тензоров определяется формулой

$$c_{ijk}^{rstK} = a_{ijK}^{rsK} b_{kK}^{rsK},$$

где  $a_{ijK}^{rsK}$  – тензор валентности  $h$ ,  
 $b_{kK}^{rsK}$  – тензор валентности  $l$ ,  
 $c_{ijk}^{rstK}$  – тензор валентности  $h + l$ .

При этом каждый из индексов принимает значение от 1 до  $n$ , где  $n$  – размерность пространства, в котором заданы тензоры.



**Рис. 2.** Граф алгоритма для операции умножения тензоров.

То есть операция умножения двух тензоров сводится к умножению каждой компоненты первого тензора на каждую компоненту второго тензора.

Таким образом, количество вершин ввода графа должно соответствовать количеству компонент двух тензоров-сомножителей, то есть равно  $nh + nl$ , а количество операций умножения будет соответствовать числу компонент искомого тензора, то есть равно  $nh + l$ .

Граф алгоритма для выполнения данной операции представлен на рис. 2.

Проанализируем предложенную вычислительную схему. Поскольку алгоритм по структуре распараллеливания аналогичен алгоритму для операции сложения, то будут получены аналогичные оценки.

Время последовательного выполнения алгоритма будет равно  $T_1 = n^{h+l}$ .

Минимальное время исполнения алгоритма при неограниченном числе процессоров  $T_\infty = 1$ .

Времени выполнения алгоритма, сопоставимого с минимальным временем, можно достичь при количестве процессоров  $p \geq n^{h+l}$ .

Время выполнения алгоритма при использовании  $p$  процессоров может быть вычислено как

$$T_p = \left\lceil \frac{n^{h+l}}{p} \right\rceil$$

Ускорения алгоритма соответствует неравенствам

$$\frac{n^{h+l} p}{n^{h+l} + p} < S_p \leq p,$$

а эффективность – неравенствам

$$\frac{n^{h+l}}{n^{h+l} + p} < E_p \leq 1.$$

Операция умножения тензора на число является частным случаем операции умножения тензоров.

При моделировании операции умножения тензоров над полем комплексных чисел на нейронной сети количество входов сети должно в два раза превышать количество компонент двух тензоров-сомножителей, то есть должно быть равно  $2(n^p + n^q)$ , где  $p$  – общая валентность первого тензора,  $q$  – общая валентность второго тензора,  $n$  размерность пространства. Количество входов сети равно  $2n^{p+q}$ .

Отметим частный случай, когда один из двух перемножаемых тензоров один, например первый, имеет нулевую валентность, то есть является просто числом (скаляром). Тогда операция умножения этого скаляра на второй тензор сводится к умножению всех координат второго тензора на скаляр. Из этого следует, что операция вычитания тензоров одинакового строения сводится к умножению вычитаемого тензора на (-1) и последующему сложению компонент этих тензоров.

### 3. Свертка тензора

Тензор  $a'_{j\dots}$ , полученный из тензора  $a^{rs\dots}_{ij\dots}$  по формуле  $a'_{j\dots} = a^{as\dots}_{aj\dots}$ , называется сверткой тензора  $a^{rs\dots}_{ij\dots}$  [2], где  $a^{rs\dots}_{ij\dots}$  – тензор валентности  $q$ . Операция свертки смешанного тензора по одному верхнему и одному нижнему индексам заключается в суммировании соответствующих компонент тензора и приводит к уменьшению его валентности на 2.

Таким образом, для выполнения свертки тензора необходимо рассчитать  $n^{q-2}$  сумм, в каждой из которых по  $n^{q-2}$  слагаемых.

Рассмотрим сначала алгоритм распараллеливания операции сложения  $m$  чисел.

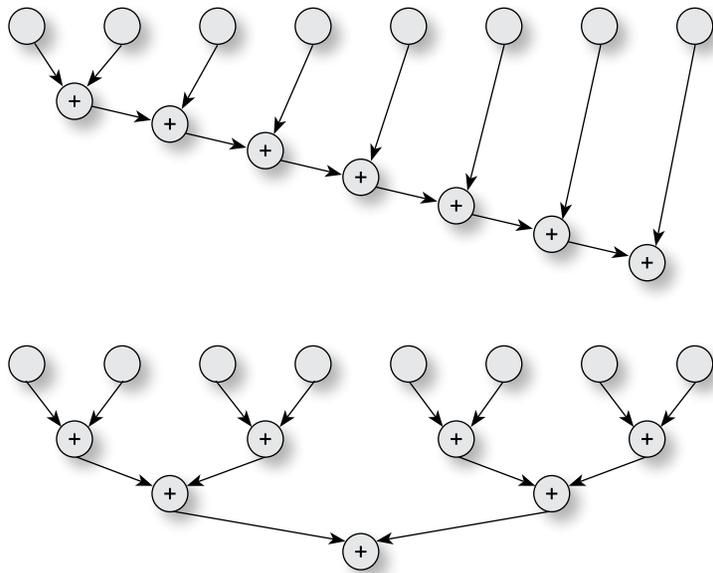
При последовательном выполнении операции суммирования на каждом шаге к сумме прибавляется одно из слагаемых. Для сложения  $m$  чисел понадобится  $m-1$  единица времени. Данный алгоритм не допускает распараллеливания, поэтому для параллельного вычисления суммы необходимо использовать другой алгоритм, например, алгоритм сдваивания. Этот алгоритм заключается в том, что на первом шаге его выполнения исходные данные разбиваются на пары и между ними выполняется операция сложения. На следующих шагах все полученные суммы также разбиваются на пары, и выполняется очередное суммирование. Данная вычислительная схема основана на свойстве ассоциативности операции сложения.

Графы для последовательного алгоритма и для алгоритма сдваивания сложения чисел при  $m = 8$  представлены на рисунке 3.

При использовании одного процессора время выполнения операций будет равно

$$T_1 = \frac{m}{2} + \frac{m}{4} + \dots + 1 = m - 1.$$

Очевидно, что для параллельной реализации такого алгоритма необходимо количество процессоров  $p = \frac{m}{2}$ . Минимальное время ис-



**Рис. 3.** Графы для последовательного алгоритма и для алгоритма сдваивания.

полнения алгоритма  $T_p = \lceil \log_2 m \rceil$ . В этом случае показатели ускорения и эффективности алгоритма сдваивания для суммирования можно оценить выражениями

$$S_p = \frac{m-1}{\lceil \log_2 m \rceil}$$

и

$$E_p = \frac{m-1}{p \lceil \log_2 m \rceil} = \frac{m-1}{\frac{m}{2} \lceil \log_2 m \rceil}$$

соответственно. Таким образом, алгоритм показывает высокое ускорение, но при увеличении  $m$  эффективность использования процессоров будет снижаться (так как  $\lim_{m \rightarrow \infty} E_p \rightarrow 0$ ). Для улучшения данной ситуации может быть использован модифицированный алгоритм сдваивания [3].

Вернемся к задаче свертки тензора. Для каждой из сумм  $m = n^{q-2}$ . Кроме того количество таких сумм равно  $n^{q-2}$ .

Тогда

$$T_1 = (n^{q-2} - 1)n^{q-2};$$

$$p = \frac{n^{q-2}}{2} n^{q-2} = \frac{n^{2(q-2)}}{2}.$$

$$T_p = \lceil \log_2 n^{q-2} \rceil$$

останется неизменным, так как увеличится количество операций на каждом этапе вычислительной схемы, но количество этапов не изменится. Ускорение алгоритма свертки можно оценить выражением

$$S_p = \frac{n^{q-2}(n^{q-2} - 1)}{\lceil \log_2 n^{q-2} \rceil},$$

а эффективность – выражением

$$E_p = \frac{n^{q-2}(n^{q-2} - 1)}{p \lceil \log_2 n^{q-2} \rceil} = \frac{n^{q-2}(n^{q-2} - 1)}{\frac{n^{2(q-2)}}{2} \lceil \log_2 n^{q-2} \rceil} = \frac{2(n^{q-2} - 1)}{n^{(q-2)} \lceil \log_2 n^{q-2} \rceil}.$$

При моделировании данной операции на нейронной сети необходимо спроектировать сеть таким образом, чтобы количество ее входов было в два раза больше количества компонент тензора. Количество выходов сети и, соответственно, количество нейронов в слое будет в два раза больше различных компонент искомого тензора. Основываясь на проведенном моделировании, можно утверждать, что использование нейронной сети для свертки тензора общей валентности  $p$  в комплексном  $n$ -мерном пространстве позволит сократить время вычислений в  $2n^2$  раз.

## ВЫВОДЫ

Проанализировав предложенные алгоритмы, можно сделать вывод о том, что операции сложения и умножения тензоров хорошо поддаются распараллеливанию и показывают высокое ускорение при сохранении эффективности использования вычислительных элементов. Операция свертки тензора при распараллеливании дает высокое ускорение, однако при увеличении валентности тензора и размерности пространства, эффективность использования вычислительных элементов будет невысока.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воеводин В.В. Параллельные вычисления / В.В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. СПб.: БХВ-Петербург, 2002. 599 с.
2. Гельфанд И.М. Лекции по линейной алгебре / И.М. Гельфанд. М.: Добросвет, Московский центр непрерывного математического образования, 1998. 320 с.
3. Гергель В.П. Теория и практика параллельных вычислений. [Электронный ресурс] URL: [http://www.intuit.ru/goods\\_store/ebooks/8321](http://www.intuit.ru/goods_store/ebooks/8321) (дата обращения: 11.06.2016).
4. Димитриенко Ю.И. Тензорное исчисление: Учебное пособие для вузов / Ю.И. Димитриенко. М.: Высш. шк., 2001. 575 с.
5. Макоха А.Н. Имитационные модели нейронных сетей, реализующих операции тензорной алгебры над полем комплексных чисел / А.Н. Макоха, Т.Е. Тышляра // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. М.: Изд-во «Радиотехника», 2010. №9. С. 64–70.

6. Макоха А.Н. Моделирование операций тензорной алгебры на базе нейронных сетей / А.Н. Макоха, Т.Е. Тышляр // Международная школа-семинар по геометрии и анализу памяти Н.В. Ефимова, Абрау-Дюрсо, 9–15 сентября 2008 г. Ростов-на-Дону: Изд-во Северо-Кавказского научного центра высшей школы. 2008. С. 187-189.
7. Макоха А.Н. Построение нейронной сети, реализующей операции симметрирования и альтернирования тензорной алгебры / А.Н. Макоха, Т.Е. Тышляр // Научно-инновационные достижения ФМФ в области физико-математических и технических дисциплин: Материалы 53-й научно-методической конференции преподавателей и студентов Ставропольского государственного университета «Университетская наука – региону». Ставрополь: Изд-во СГУ. 2008. С. 19–22.
8. Макоха А.Н. Построение нейронной сети для классификации точек линейного комплекса плоскостей общего типа / А.Н. Макоха, Т.Е. Тышляр // Вестник Северо-Кавказского федерального университета, 2013. №2 (35). С. 20–23.

#### REFERENCES

1. Voevodin V.V., Voevodin VI.V. Parallel'nye vychisleniya (Parallel computing). SPb.: BHV-Peterburg, 2002. 599 s. (rus)
2. Gelfand I.M. Lekcii po lineinoj algebre (Lectures on linear algebra). M.: Dobrosvet, Moskovskij centr nepreryvnogo matematicheskogo obrazovaniya, 1998. 320 s. (rus).
3. Gergel V.P. Teoriya i praktika parallel'nyh vychislenij (Theory and practice of parallel computing). [Elektronnyj resurs] URL: [http://www.intuit.ru/goods\\_store/ebooks/8321](http://www.intuit.ru/goods_store/ebooks/8321) (data obrashcheniya: 11.06.2016) (rus).
4. Dimitrienko Yu.I. Tenzornoe ischislenie: Uchebnoe posobie dlya vuzov (The tensor calculus: A manual for the high school). M.: Vysch. shk., 2001. 575 s. (rus).
5. Makokha A.N., Tyshlyar T.E. Imitacionnye modeli nejronnyh setej, realizuyushchih operacii tenzornoj algebrы nad polem kompleksnyh chisel (Simulation models of neural networks, realizing the operation of the tensor algebra over the field of complex numbers) / Nejrokomp'yutery: razrabotka i primenenie. M.: Izdatel'stvo «Radiotekhnika», 2010. №9. S. 64–70 (rus).
6. Makokha A.N., Tyshlyar T.E. Modelirovanie operacij tenzornoj algebrы na baze nejronnyh setej (Modeling of operations of the tensor algebra based on neural networks) / Mezhdunarodnaya shkola-seminar po geometrii i analizu pamyati N.V. Efimova, Aбраu-Dyurso, 9–15 sentyabrya 2008 g. Rostov-na-Donu: Izdatel'stvo Severo-Kavkazskogo nauchnogo centra vysshej shkoly. 2008. S. 187–189 (rus).
7. Makokha A.N., Tyshlyar T.E. Postroenie nejronnoj seti, realizuyushchej operacii simmetrirovaniya i al'ternirovaniya tenzornoj algebrы (Building a neural network that implements the operation balancing and the alternation of the tensor algebra) / aучно-innovacionnye dostizheniya FMF v oblasti fiziko-matematicheskix i tekhnicheskix disciplin: Materialy 53-j nauchno-metodicheskoy konferencii prepodavatelej i studentov Stavropol'skogo gosudarstvennogo universiteta «Universitetskaya nauka – regionu». Stavropol': Izd-vo SGU. 2008. S. 19-22 (rus).
8. Makokha A.N., Tyshlyar T.E. Postroenie nejronnoj seti dlya klassifikacii toček lineynogo kompleksa ploskostej obščego tipa (Construction of neural networks for classification points of linear complex of planes of general type) / Vestnik Severo-Kavkazskogo universiteta, 2013. №2 (35). S. 20–23 (rus).

УДК 519.25

Васькина А.В. [Vaskina A.V.],  
Наац В.И. [Naats V.I.]**МОДЕЛИРОВАНИЕ  
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ  
В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
СРЕДНЕДУШЕВЫХ ДЕНЕЖНЫХ  
ДОХОДОВ НАСЕЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ  
МЕТОДОВ КОРРЕЛЯЦИОННО-  
РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА****Modeling and computing experiment  
in the problem of predicting the per capita  
monetary income of the population based on the  
methods of correlation and regression analysis**

Рассматривается задача о среднедушевых денежных доходах населения Ставропольского края за период с 2000 по 2015 годы и на основе построенных в работе многофакторных моделей, и соответствующего программного обеспечения осуществляется прогноз на 2016 – 2018 годы. Численные расчеты сопровождаются получением статистических оценок прогнозных показателей рассматриваемой экономико-математической модели, выполняется обсуждение и анализ полученных результатов. Созданное программно-алгоритмическое обеспечение на основе регрессионных моделей, а также методика проведения соответствующего вычислительного эксперимента могут быть использованы в других прикладных задачах экономико-математического моделирования.

The paper considers the problem of average per capita monetary incomes of the population of the Stavropol territory over the period 2000 to 2015 and on the basis constructed in the work of multi-factor models, and software is forecast for 2016 – 2018. The numerical calculations are accompanied by statistical evaluations of predictive performance of the considered mathematical model, performed the analysis and discussion of the results. Created algorithmic software based on the regression models and methodology for conducting the corresponding computational experiment can be used in other applications of economic-mathematical modeling.

**Ключевые слова:** Методы корреляционно-регрессионного анализа, экономико-математическое моделирование, прогнозирование, статистический анализ, вычислительный эксперимент, программно-алгоритмическое обеспечение.

**Key words:** Methods of correlation and regression analysis, economic-mathematical modeling, forecasting, statistical analysis, computational experiments, algorithmic software.

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящей работе рассматривается задача о среднедушевых денежных доходах населения Ставропольского края за период с 2000 по 2015 годы и при этом требуется осуществить прогноз на 2016–2018 годы. Для решения данной задачи в работе выполняется построение многофакторной регрессионной модели. При этом используется аппарат теории корреляцион-

но-регрессионного анализа. В первой части статьи излагаются краткие теоретические сведения, рассматриваются методы, применяемые в соответствующей данной задаче экономико-математической модели. В следующей части на основе статистических данных выполняется моделирование, разрабатывается соответствующее программно-алгоритмическое обеспечение, проводится вычислительный эксперимент по оценке соответствующих статистических параметров модели, выполняется анализ и обсуждение полученных результатов.

### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Приведем краткие теоретические сведения и рассмотрим методы, применяемые в соответствующей данной задаче экономико-математической модели [1]. На основе методов корреляционно – регрессионного анализа можно не только рассчитать статистические данные многих показателей экономико-математических моделей, но и выполнить наиболее достоверный прогноз определенных экономических процессов. Большинство экономических процессов зависят от действия многих факторов, поэтому при их исследовании может использоваться математический аппарат множественной регрессии. Многофакторный корреляционно-регрессионный анализ позволяет оценить степень влияния на исследуемый результативный показатель каждого из включенных в модель факторов. Это позволяет дать вероятностное описание объектов исследования и построить наиболее адекватные вероятностно-статистические модели, по которым делается прогноз на будущее или проверяется достоверность экономических данных. Всё это свидетельствует о необходимости овладения методами множественного регрессионного анализа как инструментом проведения статистического анализа при моделировании экономических процессов [2].

#### *Основная задача регрессионного анализа*

заключается в исследовании зависимости рассматриваемой переменной от различных факторов и отображении их взаимосвязи в форме регрессионной модели. В регрессионных моделях зависимая (объясняемая) переменная  $Y$  может быть представлена в виде функции  $f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ , где  $X_1, X_2, \dots, X_k$  – независимые (объясняющие) переменные, или факторы  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ .

Важнейшим этапом построения многофакторной регрессионной модели является выбор формы связи, т.е. функции регрессии. Для этих целей используются наиболее известные функции, среди которых широкое распространение получила линейная функция. Это связано не только с ее простотой,

но и с тем свойством, что путем логарифмирования или замены переменных многие используемые для этих целей функции можно свести к линейным.

Основные предпосылки регрессионного анализа:

1. Зависимая переменная  $y_i$  (или возмущение  $\varepsilon_i$ ) есть случайная величина, а объясняющая переменная  $x_i$  – неслучайная величина.
2. Математическое ожидание возмущения  $\varepsilon_i$  есть ноль:  
 $M(\varepsilon_i) = 0$ .
3. Дисперсия зависимой переменной  $y_i$  (или возмущение  $\varepsilon_i$ ) постоянно для любого  $i$ :  $D(\varepsilon_i) = \mu^2$ .
4. Переменные  $y_i$  и  $\varepsilon_j$  (или возмущения  $\varepsilon_i$  и  $\varepsilon_j$ ) не коррелированы:  $M(\varepsilon_i \varepsilon_j) = 0$  ( $i \neq j$ ).
5. Зависимая переменная  $y_i$  (или возмущение  $\varepsilon_i$ ) есть нормально распределенная случайная величина [3].

Для получения уравнения регрессии достаточно четырех первых предпосылок. Выполнение пятой предпосылки необходимо для оценки точности уравнения регрессии.

Таблица 1. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ РЕГРЕССИОННОЙ СТАТИСТИКИ [3]

Наименование показателя в отчете Excel	Принятые наименования	Формула
Множественный R	Коэффициент множественной корреляции, индекс корреляции	$R = \sqrt{R^2}$
R – квадрат	Коэффициент детерминации $R^2$	$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}$
Нормированный R – квадрат	Скорректированный $R^2$	$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-k-1}$
Стандартная ошибка	Среднеквадратическое отклонение от модели	$S_e = \sqrt{\frac{1}{n-k-1} \sum_{i=1}^n e_i^2}$
Наблюдения	Количество наблюдений $n$	$n$

Данная таблица 1 нам необходима для расчетов, выполняемых ниже.

*Оценка параметров модели множественной регрессии.*

Для построения множественной модели регрессии при отображении зависимости между переменной  $Y$  и независимыми переменными  $X_1, X_2, \dots, X_k$  так же могут использоваться параболическая, показательная и другие функции. Наибольшее распространение получили модели линейной взаимосвязи, в том случае если факторы входят в модель линейно.

Линейная модель множественной регрессии представляется в виде:

$$y_i = a_0 + a_1 x_{i1} + a_2 x_{i2} + \dots + a_k x_{ik} + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $k$  – количество факторов включенных в модель.

Коэффициент регрессии  $a_j$  показывает, в среднем на какую величину изменится результативный признак  $Y$ , если переменную  $X_j$  увеличить на единицу измерения,  $a_j$  есть нормативный коэффициент [4].

Анализ (1) уравнения и определение параметров стали более подходящими, а расчетные процедуры упрощаются. Рассмотрим матричную форму записи модели (1):  $Y = X \cdot a + \varepsilon$ , где  $Y$  – вектор зависимой переменной, которая имеет размерность  $n \times 1$ , имеющая  $n$  наблюдений значений  $y_i$ ;  $X$  – есть матрица наблюдений  $n$  с независимыми переменными  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , размерность этой матрицы равна  $n \times (k + 1)$ ;  $a$  – это вектор неизвестных параметров с размерностью  $(k + 1) \times 1$ ;  $\varepsilon$  – это вектор случайных отклонений, с такой же размерностью как вектор  $Y$ . Исходя из этого, получаем,

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_2 & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nk} \end{pmatrix}, \quad a = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_k \end{pmatrix}, \quad \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}.$$

В линейной модели (1) содержатся значения неизвестных величин  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_k$ . Данные параметры оцениваются на основе выборочных наблюдений, поэтому полученные показатели являются ложными и представляют собой их статистические оценки.

Запишем модель линейной регрессии, у которой вместо истинных значений представлены их оценки (именно эти регрессии применяются на практике):

$$Y = XA + e = \widehat{Y} + e,$$

где  $A$  – это вектор оценок параметров;  
 $e$  – это вектор «оцененных» регрессионных отклонений,  
 $e = Y - XA$  – остатки регрессии,  $\widehat{Y}$  – оценка значений  $Y$ , равная  $XA$  [5].

При помощи метода наименьших квадратов проводится оценка параметров модели множественной регрессии. Формулу вычисления параметров регрессионного уравнения приведем без вывода [5]:

$$A = (X'X)^{-1} X'Y. \quad (2)$$

Отбор наиболее существенных факторов, влияющих на результат при построении множественной модели регрессии, проводится на основе качественного теоретического анализа совместно со статистическими приемами. Чтобы получить надежные оценки в модель не стоит включать много факторов. Затем проводится сравнительная оценка и отсев части факторов. На основе данных полученных путем анализа парных коэффициентов корреляции и оценки их значимости, составляется матрица парных коэффициентов корреляции, измеряющих тесноту связи с результативным признаком и между собой. Затем переходят к математическому описанию определенного вида зависимостей с применением регрессионного анализа.

Между объясняющими переменными точной линейной зависимости не существует, но между ними существует тесная корреляционная зависимость – этот случай носит название реальной или частичной мультиколлинеарности (просто мультиколлинеарность) – существование тесных статистических связей между переменными. Итак, мультиколлинеарность – это проблема, когда тесная корреляционная зависимость между регрессорами ведет к получению ненадежных оценок регрессии [5].

Рассмотрим некоторые способы для определения отсутствия или наличия мультиколлинеарности:

- Если определитель  $X'X$  матрицы близок к нулю, то можно говорить о наличии мультиколлинеарности;
- Если коэффициент парной корреляции между двумя переменными больше 0,8, то мультиколлинеарность в исходных данных является установленной:

$$r_{x_i, x_k} > 0,8.$$

В таких случаях оставляют ту переменную, которая имеет больший коэффициент корреляции с зависимой переменной.

Следующая схема пошаговой регрессии исходит из последовательного исключения факторов с помощью  $t$  – критерия Стьюдента [5].

Анализ статистической значимости коэффициентов регрессии  $t$  – статистики проводится путем проверки гипотезы о равенстве  $j$ -го параметра уравнения исключая свободный член:

$$t_{a_j} = \bar{a}_j / S_{a_j}, \quad (3)$$

где  $S_{a_j}$  – среднеквадратическое отклонение коэффициента уравнения регрессии  $a_j$ .

Смысл заключается в том, что после построения уравнения регрессии и оценки значимости коэффициентов регрессии из модели исключают один из факторов, коэффициент при котором незначим и имеет наименьшее значение  $t$  – критерия Стьюдента. Процесс исключения останавливается на том шаге, когда все регрессионные коэффициенты значимы [5].

#### *Оценка качества модели множественной регрессии.*

Качество модели регрессии проверяется на основе анализа остатков регрессии  $\mathcal{E}$ . Этот анализ дает право получить информацию о том, насколько правильно выбрана модель и насколько хорошо выбран метод оценки коэффициентов. Для оценки качества регрессионных моделей также можно использовать коэффициент множественной корреляции (индекс корреляции):

$$R^2 = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (4)$$

Приведенный коэффициент универсален, так как в нем отражается теснота связи и точность модели, может быть использован при любой форме связи переменных [6].

Для проверки значимости уравнения регрессии используют  $F$  – критерий Фишера, вычисляемый по формуле:

$$F = \frac{R^2/k}{(1 - R^2)/(n - k - 1)}. \quad (5)$$

Если расчетное значение со степенями свободы  $v_1 = k$  и  $v_2 = n - k - 1$ , где  $k$  – количество включенных в модель факторов, больше табличного при заданном уровне значимости  $\alpha$ , тогда модель считается значимой [6].

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

**Моделирование и прогнозирование среднедушевых денежных доходов населения.** Рассмотрим задачу прогнозирования среднедушевых денежных доходов населения и для ее решения применим теоретический аппарат корреляционно-регрессионного анализа, рассмотренный выше. Кроме того, для проведения расчетов в качестве основного программного пакета будем использовать интерфейс Microsoft Excel, в который входит набор

средств анализа данных (так называемый пакет анализа), предназначенный для решения сложных статистических и инженерных задач.

*Постановка задачи.*

Среднедушевые денежные доходы населения (в месяц) применяются в анализе уровня жизни, исчисляются делением общей суммы годового денежного дохода на 12 и среднегодовую численность наличного населения. Моделирование и прогнозирование среднедушевых денежных доходов населения всегда было и остается актуальной задачей.

Для составления прогноза на основе статистических данных по Ставропольскому краю за 2000–2015 годы [7] построим многофакторную регрессионную модель, с помощью которой предскажем величину среднедушевых денежных доходов населения в крае на 2016–2018 годы.

Таблица 2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О СРЕДНЕДУШЕВЫХ ДЕНЕЖНЫХ ДОХОДАХ НАСЕЛЕНИЯ ПО СТАВРОПОЛЬСКОМУ КРАЮ ЗА 2000–2015 гг. [7].

Среднедушевые денежные доходы населения в месяц, руб. (фактор Y)	Годы	Среднемесячная номинальная начисленная заработная плата одного работающего в экономике, руб. (фактор X1)	Средний размер назначенных месячных пенсий в среднем за месяц, руб. (фактор X2)	Величина прожиточного минимума населения (в среднем на душу населения в месяц), руб. (фактор X3)
1405	2000	1438	780,8	1038
1767	2001	2099	1096,9	1296
2335	2002	2837	1378,4	1619
3065	2003	3654	1649,6	1947
3861	2004	4497	1890,8	2193
5117	2005	5416	2365,5	2810
6488	2006	6733	2627,3	3274
8122	2007	8648	3407,5	3532
9746	2008	11110	4171,5	4375
11244	2009	12966	5653,8	4978
13016	2010	13949	6814,3	5471
14440	2011	15589	7444,9	6479
17088	2012	18446	8147,4	6033
19768	2013	20667	8902,3	6443
21386	2014	22597	9645,7	6956
22759	2015	22759	10802,0	8231

Для выявления взаимосвязей между величиной (Y), (X1), (X2) и (X3) проводим корреляционный анализ, используя инструмент «Корреляция» в пакете Excel (таблица 2). Таблица 3 показывает, что (Y) имеет тесную взаимосвязь со всеми рассматриваемыми показателями, так как коэффициент корреляции близок к 1. Для построения двухфакторной регрессионной модели в качестве факторных признаков выберем: (X1) и (X2), ссылаясь на теоретический материал, представленный ранее.

Таблица 3. МАТРИЦА КОЭФФИЦИЕНТОВ ПАРНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ

	Y	X1	X2	X3
Y	1			
X1	0,99802026	1		
X2	0,994054993	0,993206872	1	
X3	0,98099502	0,982020439	0,985602	1

Для проведения регрессионного анализа используем инструмент «Регрессия» в пакете Excel.

Таблица 4. ПРОТОКОЛ ВЫПОЛНЕНИЯ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА В ПАКЕТЕ EXCEL

ВЫВОД ОСТАТКА		
Наблюдение	Предсказанное Y	Остатки
1	1086,367034	318,6329661
2	1735,220409	31,77959128
3	2427,781706	-92,78170627
4	3176,432813	-111,4328132
5	3931,667298	-70,66729794
6	4849,499181	267,5008186
7	5978,049067	509,9509332
8	7797,34645	324,6535503
9	10029,6125	-283,6125047
10	12116,94614	-872,9461429
11	13390,02647	-374,0264735
12	14931,303	-491,3030019
13	17439,55493	-351,554931
14	19482,62611	285,3738869
15	21297,02184	88,97815531
16	21937,54503	821,4549696

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,9983133
R-квадрат	0,99662944
Нормированный R-квадрат	0,99611089
Стандартная ошибка	453,791127
Наблюдения	16

Дисперсионный анализ					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	791564908,9	395782454	1921,9609	8,51268E-17
Остаток	13	2677043,031	205926,39		
Итого	15	794241951,9			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	
Y-пересечение	-366,7723098		204,7908982	-1,790960014	0,096599694
X1	0,768188322		0,134290171	5,720361492	7,04928E-05
X2	0,446317286		0,297130066	1,502093988	0,156968915

На основании расчетных данных таблицы 4, уравнение (1) регрессионной зависимости ( $Y$ ) от ( $X_1$ ) и ( $X_2$ ) можно записать в следующем виде:

$$y = -366,772 + 0,768x_1 + 0,446x_2. \quad (6)$$

Рассмотрим содержание протокола регрессионного анализа, где показаны важные для наблюдений итоги расчетов. Пояснения расчетов, представленных в таблице «Регрессионная статистика» приведены в таблице 1, а «Дисперсионный анализ» пакета *Excel* – в таблице 5.

Таблица 5. ПОЯСНЕНИЕ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА

	<i>df</i> – число степеней свободы	<i>SS</i> – сумма квадратов	<i>MS</i> – среднее значение
Регрессия	$k = 2$	$\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	$\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 / k$
Остаток	$n - k - 1 = 13$	$\sum_{i=1}^n e_i^2$	$\sum_{i=1}^n e_i^2 / (n - k - 1)$
Итого	$n - 1 = 15$	$\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	

В таблице 4, во втором столбце содержатся коэффициенты уравнения регрессии  $a_0, a_1, a_2$ .

Значение коэффициентов детерминации и множественной корреляции можно найти в поле «Регрессионная статистика», а так же рассчитать это значение самостоятельно (табл. 4).

Коэффициент детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2} = 1 - 2677043,03 / 794241951,9 = 0,9966$$

Коэффициент детерминации показывает, что около 99% вариации зависимой переменной учтено в модели и обусловлено влиянием включенных факторов.

Коэффициент множественной корреляции

$$R = \sqrt{R^2} = 0,998$$

показывает очень высокую тесноту связи зависимой переменной  $Y$  с двумя включенными в модель объясняющими факторами.

Теперь оценим значимость уравнения регрессии. Проверку значимости уравнения выполним на основе вычисления  $F$  – критерия Фишера (5):

$$F = \frac{R^2/k}{(1-R^2)/(n-k-1)} = \frac{0,9966/2}{(1-0,9966)/(16-2-1)} = \frac{0,4983}{0,0002593} = 1921,9.$$

Значение  $F$  – критерия Фишера можно найти в «Дисперсионном анализе» протокола Excel (табл. 4).

Табличное значение  $F$  – критерия Фишера можно найти при помощи функции FРАСПОБР. При доверительной вероятности 0,05  $\nu_1 = k = 2$  и  $\nu_2 = n - k - 1 = 16 - 2 - 1 = 13$  оно составляет 3,81.

$$F_{\text{расч}} = 1921,96;$$

$$F_{\text{табл}} = 3,81.$$

Поскольку  $F_{\text{расч}} > F_{\text{табл}}$ , уравнение регрессии следует считать адекватным.

Оценим с помощью  $t$  – критерия Стьюдента статистическую значимость коэффициентов уравнения множественной регрессии  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ , используя формулу (3):

$$t_{a_j} = \hat{a}_j / S_{a_j}$$

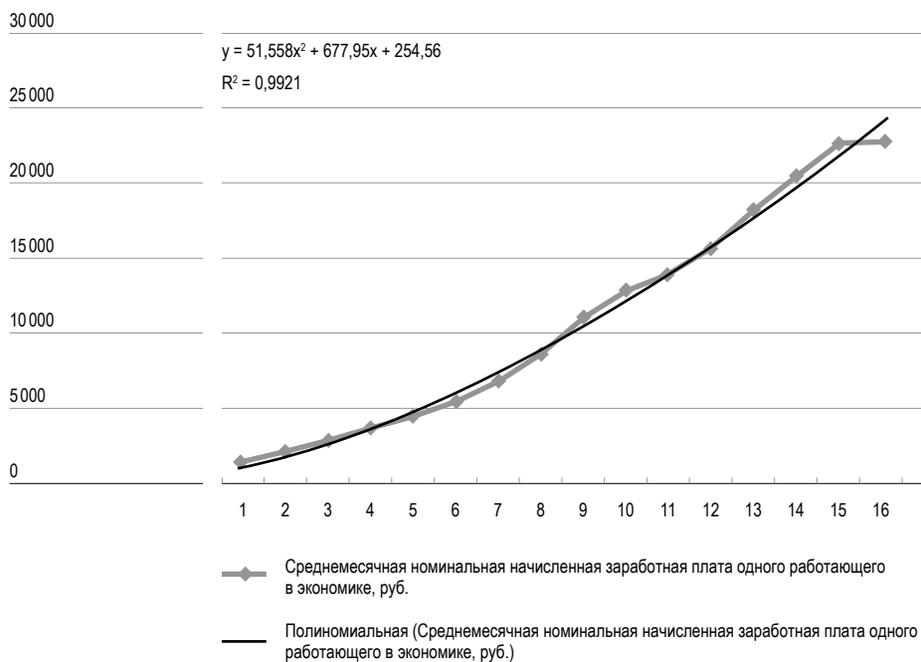
$$t_{a_0} = -366,77/204,79 = -1,79$$

$$t_{a_1} = 0,768/0,134 = 5,731$$

$$t_{a_2} = 0,446/0,297 = 1,502$$

Расчетные значения  $t$  – критерия Стьюдента приведены в четвертом столбце (табл. 4), сравнивая их с полученными, видим что они практически равны, из чего следует: коэффициенты  $a_1$ ,  $a_2$  значимы (существенны).

Для дальнейшего прогнозирования ( $Y$ ), представим графически зависимость ( $X1$ ) и ( $X2$ ) от времени. На рисунке 1 видим, что величина достоверности аппроксимации равна 0,992, что близко к 1, значит, прогноз будет достаточно точным, с небольшими ошибками.

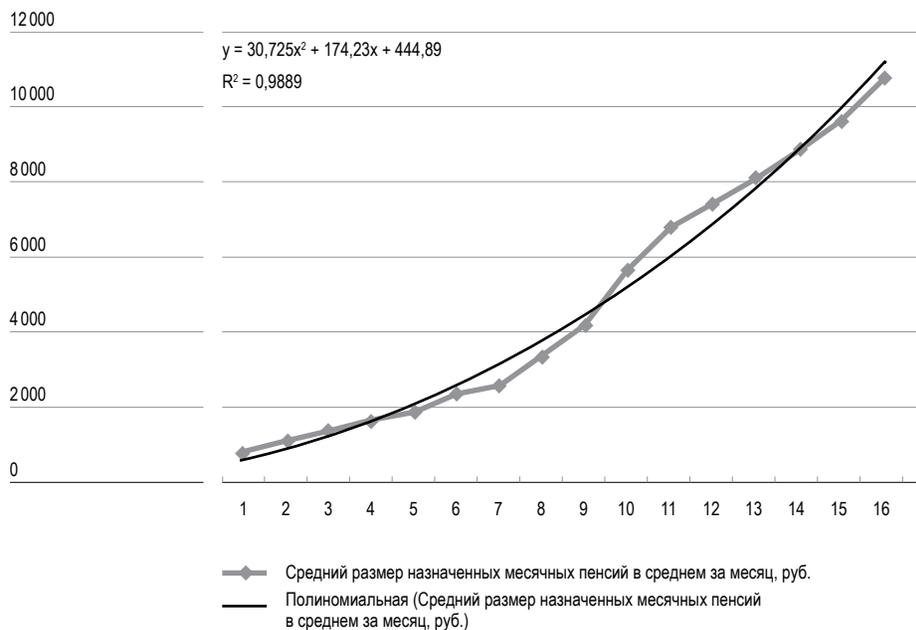


**Рисунок 1. Трендовая модель показателя (X1).**

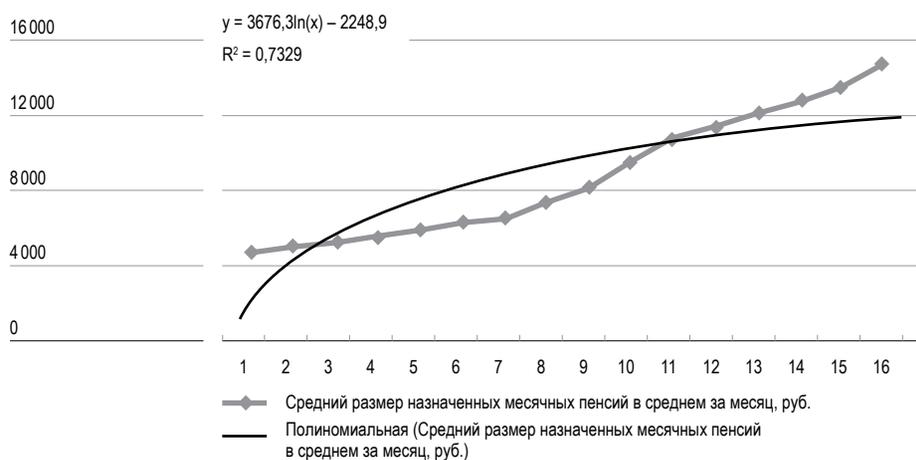
Для временного ряда ( $X2$ ) в качестве аппроксимирующей функции был выбран также полином второй степени, величина достоверности аппроксимации равна 0,989, что также близко к 1.

Для сравнения в качестве коэффициента детерминации возьмем логарифмическую функцию (рисунок 3), видим, что коэффициент детерминации приблизительно равен 0,7329, что не позволяет результатам быть максимально точными.

Используя полученные в Excel трендовые модели, рассчитаем прогноз ( $X1$ ) и ( $X2$ ) на 2016–2018 годы. Подставив полученные значения в составленное нами уравнение регрессии (6), получим прогнозные значения ( $Y$ ) в Ставропольском крае на 2016–2018 годы, представленные в таблице 6.



**Рисунок 2. Трендовая модель показателя (X2).**



**Рисунок 3. Трендовая модель показателя (X2) для не оптимального решения.**

**Таблица 6. ПРОГНОЗНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ СРЕДНЕДУШЕВЫХ ДЕНЕЖНЫХ ДОХОДОВ НАСЕЛЕНИЯ НА 2016-2018 гг.**

(Y) в месяц, руб.	Годы	(X1) за месяц, руб.	(X2) за месяц, руб.
25599,76	2016	26676,75	12284,28
28063,28	2017	29158,90	13533,68
30633,39	2018	31744,15	14844,52

Таким образом, с помощью, построенной двухфакторной регрессионной модели, составлен прогноз среднедушевых денежных доходов населения в Ставропольском крае на 2016–2018 годы. Эти результаты могут быть использованы на практике при исследовании экономических процессов и планировании на их основе различных видов деятельности.

### ВЫВОДЫ

В работе на основе статистических данных о среднедушевых денежных доходов населения по Ставропольскому краю построена многофакторная регрессионная модель, с помощью встроенных в математический пакет Microsoft Excel статистических программных модулей проведены расчеты показателей модели, получены статистические оценки параметров модели, выполнен анализ и обсуждение полученных результатов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Основы эконометрики: Учебник для вузов в 2-х т. Т. 2. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2013. 432 с.
2. Васькина А.В. Множественная регрессия и некоторые её приложения // Естественные науки – основа настоящего и фундамент для будущего: Материалы ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука – региону». Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2016. 190–192 с.
3. Андронов А.М., Копытов Е.А., Гринглаз Л.Я. Теория вероятностей и математическая статистика. СПб.: Питер, 2014. 461 с.
4. Орлова И.В., Половников В.А. Экономико-математические методы и модели: компьютерное моделирование. Учебное пособие; изд., испр., и доп. М.: Вузовский учебник, 2008. 365 с.
5. Бережная Е.В., Бережной В.И., Математические методы моделирования экономических систем: Учеб. пособие. 2-е изд. М.: Финансы и статистка, 2006, 432 с.
6. Буре В.М., Евсеев Е.А. Основы эконометрики: Учебн. Пособие. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2009. 72 с.
7. Официальный сайт Управления Федеральной службы Государственной статистики по Ставропольскому краю. [http://stavstat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_ts/stavstat/ru/statistics/stavStat/](http://stavstat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/stavstat/ru/statistics/stavStat/) (дата обращения 20.01.2016 г.)

### REFERENCES

1. Ajvazyan S.A. Prikladnaya statistika. Osnovy ehkonometriki: Uchebnik dlya VUZov v 2-h t. T. 2. M.: YUNITI-DANA, 2013. 432 s.

2. Vas'kina A.V. Mnozhestvennaya regressiya i nekotorye eyo prilozheniya // Estestvennye nauki – osnova nastoyashchego i fundament dlya budushchego: Materialy ezhegodnoj nauchno – prakticheskoy konferencii Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta «Universitetskaya nauka – regionu». Stavropol': Izd-vo SKFU, 2016. 190–192 s.
3. Andronov A.M., Kopytov E.A., Gringlaz L.YA. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika. SPb.: Piter, 2014. 461 s.
4. Orlova I.V., Polovnikov V.A. EHkonomiko – matematicheskie metody i modeli: komp'yuternoe modelirovanie. Uchebnoe posobie – izd., ispr., i dop. M.: Vuzovskij uchebnyk, 2008. 365 s.
5. Berezhnaya E.V., Berezhnoj V.I., Matematicheskie metody modelirovaniya ehkonomicheskikh sistem: Ucheb. posobie. 2e izd., M.: Finansy i statistika, 42006, 432 s.
6. Bure V.M., Evseev E.A. Osnovy ehkonometriki: Uchebn. Posobie. SPb.: Izd-vo S. Peterb. Un-ta, 2009. 72 s.
7. Oficial'nyj sayt Upravleniya Federal'noj sluzhby Gosudarstvennoj statistiki po Stavropol'skomu krayu. [http://stavstat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_ts/stavstat/ru/statistics/stavStat/](http://stavstat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/stavstat/ru/statistics/stavStat/) (data obra-shcheniya 20.01.2016g.)

УДК 681.5

**Федоренко В. В. [Fedorenko V. V.],  
Слюсарев Г. В. [Slyusarev G. V.],  
Самойленко И. В. [Samoylenko I. V.]****МОДЕЛЬ УПОРЯДОЧЕННОГО ОПРОСА  
ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ  
ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ****Models of ordered polling of parallel data  
transmission channels**

Предложена модель системы упорядоченного опроса каналов с данными от измерительных датчиков, реализующей алгоритм двухэтапного поиска сигнала тревоги (аварии): на первом этапе осуществляется предварительный укороченный опрос каналов реверсивными регистрами с последующей их ранжировкой; на втором этапе – окончательный опрос в порядке ранжировки. За счет усложнения алгоритма и схемы просмотра сигналов с выхода датчиков среднее время, проходящее между началом просмотра и обнаружением объекта с сигналом тревоги, может быть существенно сокращено. В случае экспоненциального распределения времени обнаружения сигнала тревоги на втором этапе опроса каналов систему с двухэтапной коммутацией можно интерпретировать как систему массового обслуживания с ограниченной очередью со следующими характеристиками: заявками на обслуживание являются сигналы параметров, уровень которых превысил пороговое значение; количество мест ожидания определяется числом реверсивных регистров; обслуживающим прибором является устройство опроса каналов на втором этапе поиска сигнала тревоги; среднее время обслуживания заявки представляет собой среднее время опроса каналов на втором этапе до момента определения сигнала тревоги.

A model of orderly polling system of channels with data from sensors is proposed. Algorithm of two-stage search of alarm is realized: the first stage is presented as short channel polling of reversible registers, followed by their ranking; the second stage is presented as the final polling in order of ranking. Due to the complexity of the algorithm and schematic view of the sensor output signals, the average time between early viewing and alarm detection can be significantly reduced. In case of exponential distribution of alarm detection time in the second stage of the channel polling the system with two-stage switching can be interpreted as a queueing system with limited queue. Its characteristics are: the customers are signals with exceeded threshold; queueing nodes are defined by reversible registers; serving device is polling unit at the second stage; the average serving time is average polling time at the second stage until alarm detection.

**Ключевые слова:** датчик, сигнал тревоги (аварии), опрос каналов, двухэтапный поиск, реверсивные регистры.

**Key words:** sensor, alarm, channel polling, two-stage search, reversible registers.

**ВВЕДЕНИЕ**

В различных системах мониторинга состояния технических, промышленных и других сложных объектов применяются методы упорядоченного опроса каналов передачи данных, содержащих результаты измерения параметров объектов. Стратегии упорядоченного опроса и их модели получили название поллинга [1, 2]. В зависимости от числа каналов их циклический опрос может занимать значительное время.

Если число контролируемых параметров системы мониторинга превосходит несколько сотен, то индивидуальный опрос каждого датчика может быть весьма продолжительным по времени, а следовательно есть риск, что реальная аварийная ситуация на каком либо объекте может быть выявлена несвоевременно. Модели последовательного поллинга каналов, когда просмотр каждого из них ведется до вынесения решение о наличии или отсутствии в этом канале сигнала тревоги, не обеспечивают высокую эффективность системы мониторинга. Однако за счет усложнения алгоритма и схемы просмотра датчиков среднее время, проходящее между началом просмотра и обнаружением канала с сигналом тревоги, может быть существенно сокращено [3, 4].

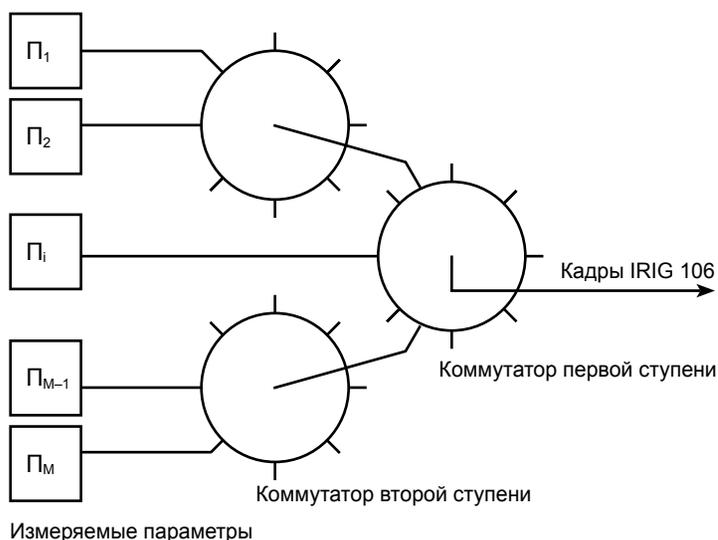
### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В данной работе исследуется модель двухэтапного опроса параллельных каналов в системе мониторинга, когда коммутатор второй ступени содержит накопительные элементы в виде реверсивных регистров (РР), реализующих последовательную процедуру Вальда [5, 6].

При адаптивном динамическом поллинге частота опроса каналов зависит от динамичности измерительных данных, т. е. изменения значений контролируемых параметров. Очередность опроса каналов технически реализуется с помощью системы коммутаторов, которая позволяет изменять число каналов и тактовую частоту опроса при предварительной настройке системы мониторинга в соответствии с программой измерений параметров объектов. В стандарте IRIG-106, который поддерживается организацией Telemetry Group RCC [7, 8], определяется двухступенчатая схема коммутации каналов передачи данных мониторинга, приведенная на рис. 1 [9].

Каналы датчиков для измерения параметров, как правило, подключаются к коммутаторам первой ступени. При этом параметры, подключенные к коммутатору второй ступени, опрашиваются с максимальной частотой. Выходы коммутаторов второй ступени подключены к входам коммутатора первой ступени, который осуществляет опрос каналов в течение времени, достаточном для вынесения решения о состоянии объекта по измеренному параметру с заданной точностью.

С технической точки зрения реализация алгоритмов последовательного анализа Вальда в их чистом виде затруднительна, так как связана с построением непрерывных накопителей (например, устройств выборки и хранения на конденсаторах) – сложных и неустойчивых в работе устройств. С учетом перспектив развития цифровой техники более простыми и надежными оказываются устройства с квантованием сигнала и накопителями дискретного типа. Данные накопители с математической точки зрения представляют автоматы с линейной тактикой [4], а технически могут быть реализованы на базе реверсивных регистров (РР) сдвига [6].



**Рис. 1.** Схема коммутации каналов передачи данных.

Анализ состояния объекта реализуется методом интервального оценивания, т.е. путем сравнения результатов измерения параметра с двумя уровнями: нижним  $U_H$  и верхним  $U_B$ , причем они расположены симметрично порогового уровня  $U_H$  на равном расстоянии, т.е.  $U_B = -U_H$ .

Рассмотрим в качестве системы обнаружения сигнала тревоги (как факта превышения измеренным значением параметра  $U_X$  порогового уровня) цифровое накопительное устройство в виде реверсивного регистра сдвига, имеющего  $d + 1$  состояний (по числу элементов памяти), пронумерованных от 0 до  $d$ . В каждом состоянии  $j$  ( $j = \overline{0, d}$ ) по принятому сигналу  $U_X$  вычисляется логарифм отношения правдоподобия:

$$\Lambda = \ln[W(U_X|H_1)] / \ln[W(U_X|H_0)],$$

где  $H_0$  – гипотеза об отсутствии сигнала тревоги;

$H_1$  – гипотеза о наличии сигнала тревоги;

$W(X|H_0)$ ,  $W(X|H_1)$ , – условные плотности вероятностей величин  $X$  при соответствующих гипотезах  $H_0$ ,  $H_1$ .

Если окажется, что  $\Lambda \geq U_B$ , то реверсивный регистр из состояния  $j$  переходит в состояние  $j + 1$  (число логических «единиц» в ячейках памяти РР увеличивается); если  $\Lambda \geq U_H$ , то регистр из состояния с номером  $j$  переходит в состояние  $j - 1$  (содержание ячеек памяти РР уменьшается на одну логическую «единицу»); если же  $U_H < \Lambda < U_B$ , то регистр остается в состоянии  $j$ .

Движение начинается из состояния  $j_0$ . Состояния 0 (отсутствуют «единицы» в РР) и  $d$  (все ячейки памяти РР заполнены логическими «единицами») являются конечными: достижение состояния 0 приводит к решению в пользу гипотезы  $H_0$ , достижение состояния с номером  $d$  – к решению в пользу гипотезы  $H_1$ . Поведение такого регистра полностью описывается заданием графа, число вершин которого равно числу состояний РР  $d + 1$ , а веса ребер графа соответствуют вероятностям переходов, которые могут быть вычислены, если известны плотности вероятностей величины  $\Lambda$  при гипотезах  $H_0$  и  $H_1$ . При этом вероятности переходов не зависят от номера состояния и определяются выражениями[4]:

$$p = P(\Lambda \geq U_B | U_1) = P(\Lambda \leq U_H | H_0);$$

$$q = P(\Lambda \geq U_B | U_1) = P(\Lambda \leq U_H | H_1);$$

$$r = 1 - p - q = P(U_H < \Lambda < U_B).$$

Наиболее важной характеристикой рассматриваемой системы поиска является среднее время, проходящее между началом поиска и обнаружением канала с сигналом тревоги. Перейдем к его вычислению.

#### На первом этапе

опроса коммутатор второй ступени подключается к соответствующему датчику  $l$ -го ( $l = \overline{1, N}$ ) измеряемого параметра и опрашивает канал в течении  $\varpi$  тактов, причем  $\varpi \ll \bar{\nu}$ , где  $\bar{\nu}$  – среднее число тактов для получения окончательной оценки по опросу канала. В исходном положении в элементы регистра записано  $j_0$  битовых «единиц».

Текущее значение напряжения с датчика  $U_X$  сравнивается с двумя пороговыми уровнями: нижним  $U_H$  и верхним  $U_B$ , которые устанавливаются индивидуально для каждого параметра. В случае  $U_X \geq U_B$  разрешающий сигнал с выхода «+» компаратора подается на суммирующий вход регистра РР1, при этом состояние регистра увеличивается на одну логическую «единицу». Если  $U_X \geq U_H$ , то по сигналу с выхода «-» компаратора состояние регистра уменьшится на «единицу». При  $U_H < U_X < U_B$  сигнал с компаратора отсутствует и состояние регистра остается неизменным.

По результатам опроса датчиков упорядочиваются номера контролируемых каналов в блоке памяти, содержащем  $N$  реверсивных регистров. При этом номер 1 получает объект с датчиком того параметра, реверсивный регистр которого содержит максимальное число логических «единиц». Объект, РР которого имеет несколько меньшее число «единиц», получает номер 2 и т.д. Номер  $N$  получает объект с датчиком параметра, регистр которого содержит наименьшее число «единиц».

На *втором этапе*

опроса коммутатор первой ступени «досматривает» каналы в течении  $v_+$  тактов в порядке убывания номеров состояний своих реверсивных регистров.

Обозначим через  $v_+$  число переходов реверсивным регистром за  $\varpi$  тактов предварительного просмотра в состояния с большим номером,  $v_-$  – число переходов РР в состояния с меньшим номером, а  $v_0$  – число тактов, когда РР не меняет своего состояния, так что  $v_+ + v_- + v_0 = \varpi$ . Разность  $v_+ + v_-$  для РР канала с аварийным сигналом обозначим через  $\eta$ , а для РР канала с безаварийным сигналом – через  $\gamma$ . Тогда через  $\varpi$  тактов предварительного просмотра РР канала с аварийным сигналом будет находиться в состоянии с номером  $k = j_0 + \eta$ , а РР  $l$ -го канала с безаварийным сигналом – в состоянии с номером  $j_l = j_0 + \gamma_l$ .

Вероятность того, что за  $\varpi$  тактов предварительного просмотра РР канала с сигналом совершит  $v_+$  переходов в состояния с большим номером,  $v_-$  переходов в состояния с меньшим номером и  $v_0$  раз перейдет в состояние с тем же номером, равна [4]:

$$P(v_+, v_-, v_0 | \varpi) = \frac{\varpi!}{v_+! v_-! v_0!} p^{v_+} q^{v_-} (1-p-q)^{v_0}. \quad (1)$$

где  $p$  и  $q$  – вероятности принятия соответственно правильного и ошибочного решений на первом этапе опроса каналов.

Условное среднее время, проходящее между началом поиска и обнаружением аварийного сигнала, равно:

$$\bar{T}_{\text{оби}} = T_{PP} + \bar{T}_{\text{опроса}} = N\varpi + \sum_{l=1}^{N-1} \bar{T}_{j_{\varpi}}^{(0)}(\gamma_l) \cdot \mathcal{A}(\gamma_l - \eta) + \bar{T}_{j_{\varpi}}^{(1)}, \quad (2)$$

где  $T_{PP} = N\varpi$  – число временных тактов на первом этапе опроса;  
 $\bar{T}_{j_{\varpi}}^{(0)}(\gamma_l)$  – среднее число тактов, необходимое для вынесения решения на втором этапе, если после первого этапа  $l$ -й регистр находится в состоянии  $\gamma_l > \eta$  ( $\eta$  – состояние регистра аварийного параметра);  
 $\mathcal{A}(\gamma_l - \eta) = 1$  (при  $\gamma_l > \eta$ ),  $= 0$  (при  $\gamma_l < \eta$ ),  $= 1/2$  (при  $\gamma_l = \eta$ );  $\bar{T}_{j_{\varpi}}^{(1)}$  – среднее число тактов для анализа канала с аварийным сигналом на втором этапе.

Усредненное (по возможным значениям числа «единиц» в регистрах) время обнаружения аварийного сигнала определяется выражением [4, 6]:

$$\bar{T}_{обн} / N = \varpi_1 + N^{-1} \left\{ \sum_{l=1}^{N-1} \bar{T}_{j\sigma}^{(0)}(\gamma_l) \cdot \mathcal{G}(\gamma_l - \eta) \right\} + N^{-1} M\{\varpi_j\}, \quad (3)$$

где  $M\{\cdot\}$  – математические ожидания соответствующих случайных величин (первого или второго слагаемого в выражении для  $\bar{T}_{обн}$ ).

Выражение (3) является аналитической моделью упорядоченного опроса параллельных каналов передачи данных в системе с двухэтапной коммутации, которую можно интерпретировать как систему массового обслуживания с ограниченной очередью со следующими характеристиками [10]:

- заявками на обслуживание являются сигналы  $U_x$ , представляющие поток случайных событий, который при возрастании порогового уровня  $U_{п} \rightarrow \infty$  переходит при этом в простейший пуассоновский поток с интенсивностью  $\lambda$ ;
- количество мест ожидания  $m_1$  определяется числом реверсивных регистров  $N$ ;
- обслуживающим прибором является устройство опроса объектов на втором этапе поиска сигнала тревоги;
- среднее время обслуживания заявки представляет собой среднее время опроса объектов на втором этапе до момента определения сигнала тревоги и определяется величиной

$$\bar{T}_{опроса} = \sum_{l=1}^{m_1-1} \bar{T}_{j\sigma}^{(0)}(\gamma_l) \cdot \mathcal{G}(\gamma_l - \eta) + \bar{T}_{j\sigma}^{(1)};$$

- само время обслуживания заявки, как случайная величина, подчиняется экспоненциальному закону распределения, так как после ранжировки реверсивных регистров наибольшая вероятность наличия сигнала тревоги будет у первого опрашиваемого канала. Следовательно, вероятностная характеристика  $W(T_{опроса})$  времени обнаружения сигнала тревоги на втором этапе является ниспадающей;
- дисциплина обслуживания является приоритетная по существу – приоритетом обладает РР с большим показателем состояния  $j$ . Однако после ранжировки такой РР получает первый номер на обслуживание, что можно расценивать как дисциплину марковской цепи FCFS (первый пришел – первым обслужился) [11].



$$\alpha_D = P(D_U \leq \sigma^* t_{v,\alpha} / \sqrt{v}), \quad (6)$$

где  $v$  – выборка измерений при полном опросе состояния объекта (анализе канала);

$t_{v,\alpha}$  – коэффициент Стьюдента, значения которого табулированы для соответствующих значений величин  $v$  и  $\alpha_D$  [13]. Доверительная вероятность нахождения результата измерения  $U_\xi$  с погрешностью в пределах интервала  $D_U$ :

$$\alpha_D = \frac{\int_{M\{U_\xi\} - D_U/2}^{M\{U_\xi\} + D_U/2} W(U_\xi) dU_\xi}{M\{U_\xi\}} \quad (7)$$

где  $M\{U_\xi\}$  – оценка математического ожидания случайной величины  $U_\xi$ .

Вероятность принятия решения о наличии аварийного сигнала в анализируемом канале, который после ранжировки (к началу второго этапа) оказался на первом месте, определяется выражением:

$$\pi_1 = \int_{U_B}^{\infty} W(U_\xi) dU_\xi. \quad (8)$$

Считаем, что нижняя граница доверительного интервала совпадает с верхним пороговым уровнем, т. е.  $U_B = M\{U_\xi\} - D_U/2$ . В этом случае выражение (8) преобразуется к виду:

$$\pi_1 = \int_{U_B}^{M\{U_\xi\} + D_U/2} W(U_\xi) dU_\xi + \int_{M\{U_\xi\} + D_U/2}^{\infty} W(U_\xi) dU_\xi. \quad (9)$$

Для симметричных распределений второе слагаемое в выражении (9) равно  $(1 - \alpha_D^{(1)})/2$ , где верхний индекс при доверительной вероятности  $\alpha_D^{(1)}$  означает принадлежность к первому этапу опроса каналов. Следовательно, с учетом (7) и (9),  $\pi_1 = \alpha_D^{(1)} + (1 - \alpha_D^{(1)})/2$ , откуда доверительная вероятность для первого этапа опроса:

$$\alpha_D^{(1)} = 2\pi_1 - 1. \quad (10)$$

Чтобы обеспечить экспоненциальность распределения  $W(T_2)$ , требуется найти такое значение выборки  $\varpi_1 < v$  для первого этапа, чтобы при фиксированных  $D_U$  и  $\sigma^*$  вероятности  $\alpha_D^{(1)}$  и  $\pi_1$  были связаны выражением (10), причем численное значение  $\pi_1$  определяется первым уравнением из системы (5).

Решение задачи находится по табулированным значениям коэффи-

циентов Стьюдента таким образом, чтобы выполнить полученное на основании (6) и (10) условие:

$$2\pi_1 - 1 = P(D_U \leq \sigma^* t_{\pi_1, \alpha} / \sqrt{\varpi_1}). \quad (11)$$

При этом для доверительной вероятности  $\alpha_D^{(1)} = 2\pi_1 - 1$  подбирается такое значение параметра  $\varpi_1$ , которое обеспечивает отношение

$$\frac{t_{\pi_1, \alpha}}{\sqrt{\varpi_1}} = \frac{D_U}{\sigma^*},$$

где правая часть равенства является известной.

Таблица 1. ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ СТЬЮДЕНТА  $t_{\varpi_1, \alpha}$

Выборка $\omega_1$	Значения доверительной вероятности $\alpha_D$									
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,995
2	0.16	0.51	1.00	2.0	3.1	6.3	12.7	31.8	63.7	636.7
3	0.14	0.45	0.82	1.3	1.9	2.9	4.3	7.0	9.9	31.6
4	0.14	0.42	0.77	1.3	1.0	2.4	3.2	4.5	5.8	12.9
5	0.13	0.41	0.74	1.2	1.5	2.1	2.8	3.7	4.6	8.6
6	0.13	0.41	0.73	1.2	1.5	2.0	2.6	3.4	4.0	6.9
7	0.13	0.40	0.72	1.1	1.4	1.9	2.4	3.1	3.7	6.0
8	0.13	0.40	0.71	1.1	1.4	1.9	2.4	3.0	3.5	5.4
9	0.13	0.40	0.71	1.1	1.4	1.9	2.3	2.9	3.4	5.0
10	0.13	0.40	0.70	1.1	1.4	1.8	2.3	2.8	3.3	4.8
11	0.13	0.40	0.70	1.1	1.4	1.8	2.2	2.8	3.2	4.6
12	0.13	0.40	0.70	1.1	1.4	1.8	2.2	2.7	3.1	4.5
13	0.13	0.40	0.70	1.1	1.4	1.8	2.2	2.7	3.1	4.3
14	0.13	0.39	0.69	1.1	1.4	1.8	2.2	2.7	3.0	4.2
15	0.13	0.39	0.69	1.1	1.3	1.8	2.1	2.6	3.0	4.1
16	0.13	0.39	0.69	1.1	1.3	1.8	2.1	2.6	2.9	4.0
17	0.13	0.39	0.69	1.1	1.3	1.7	2.1	2.6	2.9	4.0
18	0.13	0.39	0.69	1.1	1.3	1.7	2.1	2.6	2.9	4.0
19	0.13	0.39	0.69	1.1	1.3	1.7	2.1	2.6	2.9	3.9

## ВЫВОДЫ

1. Применительно к исследованию состояния объектов мониторинга безопасности ставится задача не получения количественных оценок качества принятой информации, а определения вероятного наличия сигнала тревоги в анализируемом канале. В этом случае удобно осуществлять поиск решения в терминах теории проверки статистических гипотез.
2. Практическое применение алгоритма классического последовательного анализа может быть ограничено наличием следующих трудностей. Во-первых, точное определение среднего объема выборки  $\bar{v}$  для последовательной процедуры Вальда представляет собой крайне трудную задачу. Во-вторых, поскольку при последовательном анализе размер выборки – величина случайная, то ее значение может быть значительно больше ожидаемого среднего. Требуется усечение последовательной процедуры некоторым допустимым значением выборки  $v_{\text{дон}}$ .
3. Реализация алгоритмов последовательного анализа Вальда в их чистом виде связана с построением непрерывных накопителей (например, устройств выборки и хранения на конденсаторах) – сложных и неустойчивых в работе устройств. С учетом перспектив развития цифровой техники более простыми и надежными оказываются устройства с квантованием сигнала и накопителями дискретного типа. Данные накопители с математической точки зрения представляют автоматы с линейной тактикой, а технически могут быть реализованы на базе реверсивных регистров сдвига.
4. Как следует из [4, 6], при значениях вероятности принятия правильного решения на первом этапе опроса каналов  $p \approx 0,95$  и вероятностью ошибки второго рода с диапазоном значений  $\beta \in [10^{-7}, 10^{-3}]$  использование двухэтапного поиска сигналов тревоги позволяет в 1,5–2,4 раза уменьшить среднее время обнаружения по сравнению с последовательным просмотром каналов.
5. В случае экспоненциального распределения времени обнаружения сигнала тревоги на втором этапе опроса объектов можно интерпретировать как систему массового обслуживания с ограниченной очередью со следующими характеристиками: заявками на обслуживание являются сигналы  $U_x$  с объектов, уровень которых превысил пороговое значение  $U_{п}$ ; количество мест ожидания  $m1$  определяется числом реверсивных регистров  $N$ ; обслуживающим прибором является устройство опроса объектов на втором этапе поиска сигнала тревоги; среднее время обслуживания заявки представляет собой среднее время опроса объектов на втором этапе до момента определения сигнала тревоги.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Вишнеvский В.М., Семенова О.В. Системы поллинга: теория и применение в широкополосных и беспроводных сетях. М.: Техносфера, 2007.
2. Богомолова Н. Е., Маликов А.Ю. Стратегия группового опроса датчиков в сетях мониторинга // Наука и образование. 2012. №5. С. 348–353.
3. Винограденко А.М., Федоренко И.В., Гальвас А.В. Многофазная организация обслуживания в информационно-телеметрических системах // Информационные системы и технологии. 2010. № 3. С. 121–125.
4. Терпугов А.Ф., Шапиро Ф.А. Двухэтапный поиск сигналов в многоканальной системе линейными автоматами // Автоматика и телемеханика. 1978. № 8. С. 101–107.
5. Патент РФ № 105777 на полезную модель «Устройство поиска сигнала тревоги в многоканальной измерительной системе» от 20.06.2011 г., бюл. №17 по заявке № 2011102136. Слюсарев Г.В., Федоренко В.В., Федоренко И.В.
6. Слюсарев Г.В., Федоренко И.В. Моделирование подсистемы сбора и обработки измерительной информации в SCADA-системе // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2010. № 6. С. 26–28.
7. Telemetry Standards, IRIG Standard 106-13. New Mexico: Secretariat Range Commanders Council US Army White Sand Missile Range. 2013.
8. IRIG 106-07 Chapter 10 Programming Handbook. New Mexico: Secretariat Range Commanders Council U.S. Army White Sands Missile Range. 2007.
9. Сидякин И. М., Эльшафеи М. А. Имитация передачи данных телеизмерений в канале с шумами // Инженерный вестник. 2014. № 1. С. 38–51.
10. Федоренко В.В., Федоренко И.В. Модель формирования сигнала тревоги в интегрированной телеметрической системе // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2013. № 11. С. 41–45.
11. Цимбал В.А., Сорокин О.И., Лягин М.А., Бережной А.А., Крючков Н.В., Хоптар В.В. Правила автоматизированного синтеза конечной марковской цепи, описывающей доведение многопакетного сообщения в соединении «точка-точка» // Наука. Инновации. Технологии. 2016. № 4. С. 91–98.
12. ГОСТ Р 50779.10-2000. Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2001.
13. Маркин Н.С. Основы теории обработки результатов измерений. М.: Изд-во стандартов, 1991.

**REFERENCES**

1. Vishnevskij V.M., Semenova O.V. Sistemy pollinga: teorija i primenenie v shirokopolosnyh i besprovodnyh setjah. M: Tehnosfera (Polling systems: theory and applications in broadband and wireless networks), 2007.
2. Bogomolova N. E., Malikov A. Ju. Strategija gruppovogo oprosa datchikov v setjah monitoring (Strategy group polling of sensors in monitoring networks) // Nauka i obrazovanie. 2012. № 5. p. 348-353.
3. Vinogradenko A.M., Fedorenko I.V., Gal'vas A.V. Mnogofaznaja organizacija ob-sluzhivaniya v informacionno-telemetricheskikh sistemah (Multiphase service organization in information and telemetry systems) // Informacionnye sistemy i tehnologii. 2010. № 3. p. 121–125.
4. Terpugov A.F., Shapiro F.A. Dvuhjetapnyj poisk signalov v mnogokanal'noj sisteme linejnymi avtomatami (A two-stage search for signals in a multi-channel system of linear machines) //Avtomatika i telemekhanika. 1978. № 8. S. 101–107.
5. Patent RF № 105777 na poleznuju model' «Ustrojstvo poiska signala trevogi v mnogokanal'noj izmeritel'noj sisteme (Device search alarm in a multi-channel measuring system)» ot 20.06.2011 g., bjul. №17 po zajavke № 2011102136. Sljusarev G.V., Fedorenko V.V. , Fedorenko I.V.
6. Sljusarev G.V., Fedorenko I.V. Modelirovanie podsistemy sbora i obrabotki izmeritel'noj informacii v SCADA-sisteme (The modeling subsystem of gathering and processing the measuring data in the SCADA-system) // Avtomatizacija, telemehanizacija i svjaz' v neftjanoj promyshlennosti. 2010. № 6. S. 26-28.
7. Telemetry Standards, IRIG Standard 106-13. New Mexico: Secretariat Range Commanders Council US Army White Sand Missile Range. 2013.
8. IRIG 106-07 Chapter 10 Programming Handbook. New Mexico: Secretariat Range Commanders Council U.S. Army White Sands Missile Range. 2007.
9. Sidjakin I. M., Jel'shafei M. A. Imitacija peredachi dannyh teleizmerenij v kanale s shumami (Simulation of the transmission of telemetry data in the channel with noise) // Inzhenernyj vestnik. 2014. №1. p. 38-51.
10. Fedorenko V.V., Fedorenko I.V. Model' formirovaniya signala trevogi v integririrovannoj telemetricheskoy sisteme (The model of the formation of the alarm in the integrated telemetric system) // Avtomatizacija, telemehanizacija i svjaz' v neftjanoj promyshlennosti. 2013. № 11. S. 41-45.
11. Tsimbal V.A., Sorokin O.I., Lyagin M.A., Berezhnoy A.A., Kruchkov N.V., Hoptar V.V. Rules of the automated synthesis final markovskoy a chain describing finishing of the multipackage message in connection "point-point" // Nauka. Innovacii. Tehnologii. 2016. № 4. p. 91-98.
12. GOST R 50779.10-2000. Statisticheskie metody. Verojatnost' i osnovy statistiki. Terminy i opredelenija (Statistical methods. Probability and fundamentals of statistics. Terms and definitions). M.: Standartinform, 2001.
13. Markin N.S. Osnovy teorii obrabotki rezul'tatov izmerenij (Fundamentals of the theory of processing of measurement results). M.: Izd-vo standartov, 1991.

Диневич Л. [Dinevich L.],  
Лешем Ё. [Leshem Y.]

## **РАДАРНЫЙ МОНИТОРИНГ СЕЗОННОЙ МИГРАЦИИ ПТИЦ НАД ЦЕНТРАЛЬНЫМ ИЗРАИЛЕМ**

### **Radar monitoring of seasonal bird migration over Central Israel**

На базе метеорологического лоатора МРЛ-5 и специально разработанного алгоритма была создана станция радарной орнитологии. Система позволяет в радиусе 60 км строить графики, сочетающие метеорологические данные и векторное поле полетов птиц на различных высотах, и передавать эти данные онлайн в операторные центры контроля безопасности полетов. Собранные в исследовании данные предоставляют возможность получить некоторые характеристики сезонной миграции птиц через центральный Израиль. Данная система и результаты исследования станут интегральной частью обеспечения безопасности полетов военной авиации Израиля.

A radar ornithological station has been created based on the meteorological radar MRL-5 and a specially designed algorithm. The system enables to plot radar charts within the radius of 60 km combining meteorological data with vectors of bird field flying at different heights and pass these charts online over to air traffic control operators. The data accumulated in the study made it possible to obtain certain characteristics of seasonal bird migration over Central Israel. The system and the results of the study have become an integral part of ensuring air safety for Israeli military aircraft.

**Ключевые слова:** радарная орнитология, радарная метеорология, радарное эхо, птицы, миграция птиц, орнитология, безопасность воздушных полетов

**Key words:** radar ornithology, radar meteorology, radar echo, birds, bird migration, ornithology, air traffic safety.

#### **INTRODUCTION**

The number of collisions between aircraft and birds directly depends on flight velocities, flight intensity and the concentration of both aircraft and birds in the air [Leshem and Gauthreaux, 1996; Yakobi, 1974]. These collisions lead to loss of human life, highly expensive equipment and death of birds [Bahat and Ovadia, 2005; Thorpe, 2005; Richardson and West, 2005].

The problem is especially acute for military aviation. Striving towards high speeds and high maneuverability within significant height range, as well as towards optimum ratio between the net load capacity and the dead weight make is difficult to protect military planes from partial destruction caused by its collision with birds. In Israel, during the period and within the air layers of intensive seasonal bird migration the number of bird can reach over 500 species per square kilometer of air [Bruderer, 1992]. At the same time, a relatively small territory and Israel's special situation in the region the requires extremely high concentration of military aircraft in the air.

In order to develop a concept of coexistence of birds and aircraft within the common air space, one needs, first and foremost, to get a detailed picture of how birds use the air space, namely, to obtain data on maximum bird concentration, diurnal bird activity, as well as dominant directions, speeds and heights of large and

small bird flocks engaged in intercontinental migration. These data can be successfully obtained with the help of radars that enable not only to establish bird presence in the air, but also to measure online the abovementioned characteristics of bird lights within the radius available within the radar's range of coverage. A computerized ornithological radar system of this type was created in Israel for bird monitoring and has been used both for research and operational purposes [Dinevich et al, 2000; Dinevich et al, 2004; Dinevich and Leshem, 2007].

The aim of this paper is to give a brief description of the system and to present some results of the research into the parameters of seasonal bird migration over central Israel.

#### THE PRINCIPLES UNDERLYING THE COMPUTERIZED BIRD MIGRATION MONITORING SYSTEM BASED ON MRL-5 METEOROLOGICAL RADAR

##### *Theoretical essentials of using radars for bird monitoring*

Schaefer (1966, 1968) and Shestakov (1971) measured the dielectric properties and calculated the electromagnetic constants typical of different parts of a bird's body. According to the calculations, 83% of a bird's mass is tissues with high water content and the mean complex conductivity of  $52 - 17 \cdot i$ ; 17% of a bird's mass is adipose tissues, bones etc. with the mean of  $3 - 1 \cdot i$ . If we average over these values taking into account the percentage of different body parts, we will obtain the mean value of the dielectric constant to be  $44 - 15 \cdot i$ . Hence radar echo from birds depend mostly on the reflection from the globe-shaped body (71%) and less on the muscular stem of a wing (11%), the head (6%) and the neck (5%). The plumage has the least contribution to the reflected wave ( $< 2\%$ ) just as the reflection from wings and legs (2 and 3%, respectively). The complex conductivity of cloud drops at the temperature of 20 °C ranges between  $78,5 - 12,3 \cdot i$  for  $\lambda = 10$  cm and  $34,2 - 35,9 \cdot i$  for  $\lambda = 1,24$  cm [Stepanenko, 1973]. Thus the reflectance of a large bulk of a bird's body is close to that of cloud drop and is sufficient, therefore, for radar monitoring of birds just as a radar monitors clouds, meteorological radars being suitable for this purpose.

A review by Eastwood (1967) compares capabilities of various pulse radars for bird monitoring. In a number of works [Shupyatcky, 1959; Atlas, 1964; Chernikov, 1979; Stepanenko, 1973; Houghton, 1964; Larkin, Evans et al, 2002; Buurma, 1999; Ganja et al, 1991; Gauthreaux et al, 1998; Gauthreaux and Belser, 2003; Bruderer and Joss, 1969; Zrnica and Ryzhkov, 1998] different echo properties are presented that make it possible to recognize bird echoes against the background of other echoes and evaluation is made regarding application of various wave widths and radar types for bird monitoring.

In Israel, a two-wave high-grade meteorological radar MRL-5 has been used for bird monitoring. The radar is mainly intended for measuring the structure as well as the dynamic and microphysical parameters of cloud formations. The radar enables to simultaneously scan the surrounding on two wavelengths (3.3 cm and

10 cm) using a narrow beam ( $0,5^\circ$  and  $1,5^\circ$ , respectively), the scanning being performed both by the azimuth ( $0-360^\circ$ ) and by the elevation within the upper hemisphere ( $-2 \div +90^\circ$ ). The main parameters of the radar station are presented in (Abshayev et al., 1980).

Operating MRL-5 simultaneously on both wavelengths allows to reach equality of radar scan ranges and of both transmitter-receivers. Using this mode of operations, the echo ratio at the two wavelengths is determined entirely by the properties of the target.

The MRL-5 used in Israel for ornithological purposes is computerized and equipped with a supplementary device for measuring fluctuations of radar targets echoes and with an auxiliary polarization device (see Appendix).

The accuracy and the resolution of MRL-5 in bird monitoring, as well as the limitation of surveillance range due to the Earth's curvature are described in [Dinevich and Kaplan, 2000]. Briefly, these limitations are the following. Within short distances, the main factor that determines the possibility of locating low-flying birds is the values by which the antenna elevation exceeds a certain critical value that is equal to  $r \cdot \theta / 2$  ( $r$  is the distance from the radar to the target,  $\theta$  is the magnitude of the beam). At longer distances, the elevation can be decreased, but then the curvature of the Earth will have an impact. Both factors can be taken into account in the formula stating the dependency between the minimum height (in m) at which a target is detectable and the distance (m), being the root of the sum of squares

$$h_{\min} > \sqrt{(r\theta/2)^2 + 3,25 \times 10^{-15} r^4} \quad (1)$$

where the first item under the root depends on the beam width while the second one does not. As the width of the beam decreases, the radar's ability for detecting low-flying birds increases, however, the smallest extreme can not reach zero being dependent on the Earth's curvature. At regular refraction level, the radar being located at the sea level and the beam width of  $0,5^\circ$  (at 3.2 cm wavelength) the minimum height at which birds are detectable is: 100 m at the distance of 25 km; 350 m at the distance of 50 km and 1000 m at the distance of 100 km. If the radar is located above the sea level, these values decrease correspondingly. For example, the MRL-5 in Israel is located in Latrun at 270 m above the sea level. At the regular refraction level, at the distance of 25 km the radar detects all the birds flying at the level of the skyline ( $\theta = 0^\circ$ ) and even at a certain negatively oriented angle. At the distances of 50 km and 100 km the radar detects birds flying at the heights of 100 m and 700 m, respectively.

In view of these considerations and based on the calculation of the Effective Scattering Area (ESA)  $\sigma$  cm<sup>2</sup> (see Appendix for more details on ESA) we see that at low heights the main factor that limits the distance of radar location of birds is not the station's potential but rather the Earth's curvature and the beam widths. According to experimental results, the ESA of a singly stork enables the MRL-5 in Latrun to locate it at the distance of 100 m if the bird is flying at the height not below 700m above the radar level.

Fig. 1 (a,b) presents birds' ESA measured at both radar wavelengths. For the sake of comparison, results obtained to this effect by other researches who used radars of different types are presented as well [Chernikov, 1979]. We calculated the value of  $\sigma$  by the following formulas [Stepanenko, 1973]:

$$\text{for } \lambda = 3,2 \text{ cm, } \sigma \text{ cm}^2 = 0,6 \cdot 10^{-24} 10^{0,1n} R^4, \quad (2)$$

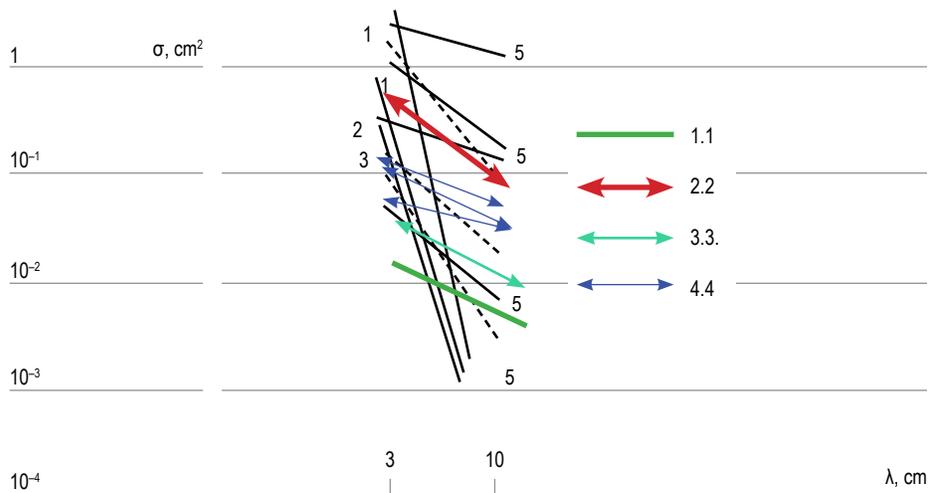
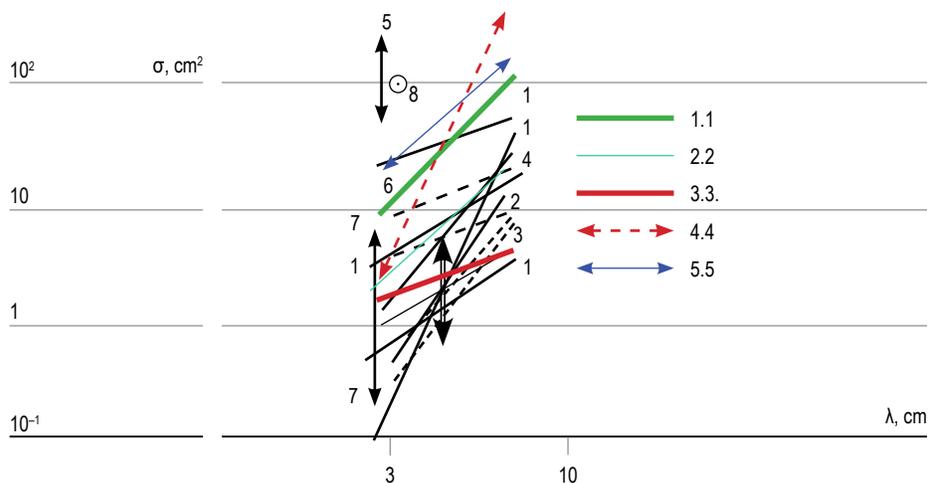
$$\text{for } \lambda = 10 \text{ cm, } \sigma \text{ cm}^2 = 0,28 \cdot 10^{-25} 10^{0,1n} R^4, \quad (3)$$

where  $n$  is the radar reflectance of the target measured in dB and  $R$  is the distance to the target (m). The coefficients in the formulas are calculated based on values of the corresponding parameters of the antenna, the transmitters and the receivers. The principle used in the study for isolation of bird echoes is described in [Dinevich et al, 2001].

### ***Selecting MRL-5 wavelength for bird monitoring***

Fig. 1(a) shows that the bird ESA value on the second channel is greater than on the first one; our results are similar to findings those obtained by other authors [Chernikov, 1979]. In some cases, authors attributed ESA with certain values to echoes from insects (Fig. 1 (b)). Those ESA values are greater on 3-cm wavelength than on the 10-cm one. Visual observations made within the surface air (at nighttime) detected a significant increase in the number of insects (midges, moths, mosquitoes etc.). The insects were clearly seen in the light of street lights, car lights and observed immediately at close distance. According to radiosonde data, higher humidity and light west-north/west breeze took place in the surface air at the time of these observations. For example, in case 2.2 presented in Fig. 1(b) (October 25, 21.30) the first inversion level was at the height of 800–1200 m; the moon was seen through ambient light. On both MRL-5 channels, a weak but spacious echo was detected, reflected from an invisible atmospheric formation about 500 m thick. One can assume the presence of vertical air flows in the bottom sub-inversion air layer, which led to buildup of different admixtures, among them insects. A characteristic feature of this echo was the difference between the values of differential reflectance measured at its top and bottom levels. Differential reflectance was measured by the dependency  $dP = P_{||}/P_{\perp}$ , where  $dP$  is the differential reflectance (a dimensionless quantity,  $P_{||}$  is the power of the reflected signal in mW (a wave of horizontal polarization was transmitted and received) and  $P_{\perp}$  is the power of the reflected signal in mW (a wave of vertical polarization was transmitted and received). The wave's polarization was altered pulse-by-pulse. At the rate of 500 pulse per second the frequency of polarization alteration is 1.500 sec. Within a time segment that short, positions of the targets relevant for our tasks (clouds, atmospheric inhomogeneities or birds) can not change.

The value of differential reflectance in the top part of the echo was close to unity (or 0 dB) which is typical of reflections either from globular cloud particles or the boundaries of atmospheric layers with a high temperature-humidity gradient [Chernikov, Shupyatcky, 1967; Dinevich et al, 1990; Zrnec, Ryzhkov, 1998].



- a) 1.1; 2.2; 3.3; 5.5. – night-flying birds of various species, 4.4 – storks (Dinevich, MRL-5); 2. pigeons (Houghton); 3. sparrows (Konrad et ell.); 4. sea-gulls (Richardson et al.); 5. albatrosses (Rinehart); 6. starlings (Houghton); 7. sparrows (Houghton).
- b) 1. mantises (Glover et al); 2. bees (Chernikov); 3. dragonflies (Chernikov); 1.1; 2.2; 3.3; 4.4 samples of night-time observations in Israel (Dinevich, МРЛ-5).

Fig. 1.

Effective scattering area for birds and insects on two wavelengths (3 cm and 10 cm).

This phenomenon can be accounted for by the isotropic reflection properties of atmospheric inhomogeneities (invisible thermics or mesofronts), small global cloud drops or small crystals with chaotic spatial orientation (though there could be no crystals in the case above considered).

Differential reflectance of the lower part of the echo was  $> 1$  which is typical of non-spherical reflectors horizontally oriented UN the space [Dinevich et al, 1990, 1994]. It suggests that the lower part of the echo was formed not only due to the temperature-humidity gradient, but also due to the horizontally-oriented doublets that are present in the sub-inversion level and that can be caused only by insects or oblong plant seeds. In addition, it should be noted that, according to the radiosonde readings that were closest in time, all these echoes shifted under the direction of and at the velocity of wind at the height. Thus, one can conclude that the echoes we observed within the sub-inversion level on both radar channels were echoes from insects. In all the cases, the ESA on the 3-cm wavelength was greater than that on the 10-cm band, which well agrees with findings by other authors [Glover, Hardy, 1966; Chernikov, 1979].

The results of the observations showed that the 10-cm band is more efficient for bird monitoring, i.e. both the number of birds located and the distance of location are higher. This can be attributed to the higher potential of the band and a wider beam that is able to cover birds from a larger space, as well as to the general laws of dispersion for different ratios of a target dimensions and the wave lengths.

In view of all these considerations, the second channel, namely, the 10-cm band was chosen for bird monitoring ( $\lambda = 10$  cm).

Taking into account the diversity of radar targets in the atmosphere (clouds, precipitation, invisible atmospheric inhomogeneities, aircraft etc.), the main goal of the study is finding the properties that are typical of bird radar echo.

Table 2 presents ESA ( $\sigma$ ) for different bird species at the wavelength ( $\lambda = 10$  cm).

The ESA value of the same bird can alter by factor of 10 depending on the bird's body position relative to radar [Houghton, 1964, Eastwood, 1967, Bruderer and Joss, 1969]. The data obtained in bird ESA measurements in an anechoic room at different angles relative to the radar beam [Zavirukha, Stepanenko, 1978] found the echo maximum to be between 65 and 115 degrees relative to the radiation beam, which corresponds to the side-ward exposure (beam directed onto a bird's beak is assumed to be  $0^\circ$ ). Besides, variations in ESA values can be caused by wing flapping, when the value can increase by factor of 10 or drop down to almost zero. The frequency of these fluctuation can reach 2–24 Hz [Chernikov, 1979]. Therefore, ESA of a bird depends on its dimensions, its body projection relative to the radar and the instant configuration of the flapping wings. Hence alterations in the amplitude of an echo reflected from a single bird flying at the same body angle relative to the radar will depend entirely on the wing flapping frequency. The research we conducted into fluctuation characteristics of different types of reflectors enabled to find a fluctuation pattern specific only for birds. On the basis of this pattern and

**Table 1.****Reflectors typically present within bird monitoring area**

Table 1 presents the most typical reflectors and their echo properties.

\* only a few of the scholars who studies echo properties from various reflectors are mentioned in the table.

Reflectors	Characteristic echo properties	Researchers*
Ground clutter (hills, buildings, trees).	Occupy large space, high power, wide fluctuation spectrum both by amplitude and by frequency, relative immobility	Atlas, 1967; Hajovsky et al, 1966; Chernikov, 1979
Clouds of different types, including convective and stratus clouds.	Occupy large space, shift along the direction of the dominant wind flow. Unlike bird echo, the echo from atomized clouds and precipitation is larger at 3 cm wavelength than on 10 cm one. Echo from globular clouds, at both wavelengths, are significantly larger than bird echo. Polarization parameters of signals in atomized clouds are typical of spherical targets. Differential reflectivity, being the ratio between horizontally oriented reflected signal (when the radiated signal is horizontally polarized) to vertically oriented signal (when the radiated signal is vertically polarized) is close to unity for small drops. Although clouds evolve in time and space, echo from them remains for a long time located in the same coordinate points, unlike echo from birds.	Atlas, 1967; Shupiyatcky, 1959; Chernikov, 1979; Stepanenko, 1973; Doviak, Zmic, 1984; Dinevich et al, 1990, 1994; Zmic and Ryzhkov, 1998.
Invisible atmospheric inhomogenities	Low power, chaotic shift patterns in space. Polarization echo parameters are close to similar parameters of spherical hydrometeors.	Shupiyatcky, 1959; Battan, 1963b; Lofgren, Battan, 1969; Khardy, 1969; Kropfii, 1970; Chernikov, 1979; Сальман, Брылёв, 1961; Doviak, Zmic, 1984; Zmic and Ryzhkov, 1998; Venema, Russchenberg et al, 2000.
Aircraft	Significant powers. High shift velocities.	Daniel et al, 1999; Skolnik, 1970.
Active noise caused by outside radiators (nearby radars)	Radial orientation, random pattern of signals in time and space.	Skolnik., 1970; Dinevich et al, 2001.
Insects	Low power, the direction and velocity of shift coincide with wind direction. ESA at 3 cm wavelength is larger than that on 10 cm wavelength.	Hajovsky et al, 1966; Glover, Hardy, 1966; Skolnik, 1970.
Birds	Relatively low power $0 < z < 30$ dBZ, forward and relatively straightforward movement, maximum amplitude fluctuations within the low-frequency range (up to 10 dB within the frequency range of 2–50 Hz). Echo is larger on 10 cm wavelength than on 3 cm one. Polarization parameters of signal are characteristic of horizontally oriented targets. Differential reflectivity is significantly higher than unity. The mean ESA** values of different bird species at the value of radar wavelength less than 10 cm or 15 cm <sup>2</sup> (Sparrow) до 400 cm <sup>2</sup> (Albatross).	

Table 2.  $\Sigma$  VALUES FOR DIFFERENT BIRD SPECIES WITH WINGS FOLDED MEASURED AT DIFFERENT BODY POSITIONS ORIENTATION RELATIVE TO THE RADAR (data obtained by Zavirukha, Stepanenko, 1978)

Bird species	$\sigma$ m <sup>2</sup> value of birds exposed to radiation in different projections		
	Side	Head	Tail
Rook	$2.5 \cdot 10^{-2}$	–	–
Pigeon	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Starling	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Domestic sparrow	$7,0 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$

a vast statistics obtained concerning different types of reflectors, a special low-frequency filter was developed for isolating bird echoes [Dinevich et al, 2004]. The filter enables, at radar antenna haltered, to isolate averaged 1–15-sec echo samples reflected from a bird flock at the accuracy of over 80%, and echoes from a single bird at the accuracy up to 95%.

Several researchers [Shupijatsky, 1959; Houghton, 1964; Chernikov, Shupyatsky, 1967; Lofgren, Battan, 1969] point to a distinct dependence of bird ESA on the polarization of the signal both transmitted and received, as well as on bird's body position relative to the radar. According to [Chernikov, Shupyatsky, 1967], the depolarization degree for bird echoes is about dB. For a polarimeter with a linear depolarization of transmission and reception, depolarization id defined as the ratio between of the values of the main component of the reflected signal and its orthogonal component. In case the waves have horizontal polarization, the depolarization expression can be written as

$$\Delta P_x = P_{xy} / P_{xx} \text{ or } \Delta P_x \text{ (дБ)} = 10 \lg P_{xy} / P_{xx} \quad (4)$$

In case of vertical wave polarization, the expression is written as  $\Delta P_y = P_{yx} / P_{yy}$ . Here,  $P_{xx}$ ,  $P_{yy}$ ,  $P_{xy}$ ,  $P_{yx}$  stand for the components of the received signal power, where the first index is the transmittance polarization type and the second index is the reception polarization type, while x and y stand for the horizontal and vertical polarization, respectively.

In case of pulse-by-pulse alteration of polarization while transmitting and receiving the same signals, differential polarization can be calculated as

$$dP = P_{xx} / P_{yy} \text{ or } dP = 10 \lg P_{xx} / P_{yy} \quad (5)$$

In a number of studies [Shupyatsky, 1959; Dinevich, Kapitalchuk, Shupyatsky, 1990, 1994] it was shown that values of depolarization and of

differential polarization are functionally related only to the shape of the target and its orientation in space, while being independent from other parameters including the permittivity, signal attenuation etc. Using the two polarization components  $\Delta P_x$  and  $dP$ , one can calculate birds' orientation in space and their shape, i.e. the ration between the length and the width.

The formula for calculating the angle of a bird's spatial orientation [Shupyatecky, 1959] is

$$\operatorname{tg}2\theta = 2 dP^{1/2} \Delta P^{1/2} [dP^{1/2} - 1], \quad (6)$$

where  $\theta$  is the angle of a bird's spatial orientation. The opportunity of isolating bird echo by polarization properties is also mentioned by [Zrnec and Ryzhkov, 1998]. It should be noted that identifying bird echo, either by polarization properties or fluctuation pattern, requires that a sufficient number of echoes is obtained enabling their averaging. According to experimental data, at the rate of 500 pulses per second it takes not less than 10 sec to obtain the requires number of echoes on the basis of the fluctuation pattern, and not less than half a second at each azimuth on the basis of polarization properties. This fact makes it difficult to use those properties for identifying echoes from large numbers of reflectors in real time within the radar scan range (e.g., 60 km in radius) with a rapidly rotating antenna.

As we see both from Tables 1 and 2, as well as from the above considerations, signals from all the reflectors mentioned not only have distinct features typical of a certain type of reflectors, but also vary within a wide dynamic changeability range. Due to this fact, all the properties described above, including fluctuation and polarization properties, can not be sufficient for online monitoring of the ornithological situation within radar scan range. It was necessary to find more distinctive properties that characterize bird radar echo.

These newly determined properties, as well as the algorithm of their application and the principles of the radar ornithological system based on MRL-5 radar are fully described in [Dinevich, Leshem, 2007]. Here we will present the main principles of the solution and some examples of its practical implementation in monitoring bird migration.

#### THE ALGORITHM SCHEME

Digitalized signals are entered into the computer and undergo limitation and filtration procedures. In order to increase the "signal/noise" ratio signals obtained over several pulses are summated (usually 16 pulses). Periodically, signals undergo calibration using the design values of the radar constant and the receivers noise level.

Table 3

	Radar	Registration
Resolution by azimuth	0.5°	0.176°
Resolution by distance	150 m	60 m

For greater efficiency, data are collected more often than it is required due to the radar resolution by distance [Abshaev, Kaplan, Kapitannikov, 1984]. Each bird is presented in the coordinates “distance-angle” in the form of a spot rather than a dot. Resolution parameters of the radar and the registration system are shown in Table 3.

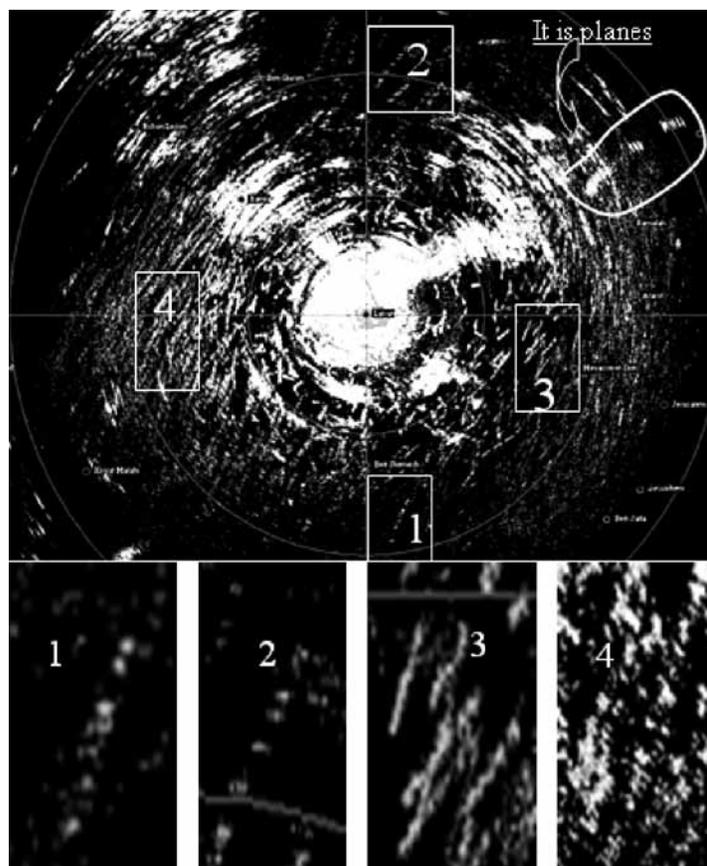
In the study described here we obtained a number of additional properties characteristics of a bird’s echo. They are related to the time and space patterns of birds’ behavior in the course of flying (Fig. 2).

Fig. 2 shows the total echo field over 18 scans after digital processing. One can clearly see the dot structure of echo streaks obtained from flying birds. Thus, an essential property of bird echo is the character of its motion resulting in transformation of a set of dots into streaks. As can be seen from the enlarged fragments (1, 2, 3, 4) the streaks are relatively straightforward. The increment in the streak length is due to the straightforward motion of echo in time.

It is noteworthy that, at the same coordinate point, echoes from ground clutter, clouds and other spacious targets remain unchanged from scan to scan. Only bird echo change, being characterized by small dimensions and mobility. In we remove all echoes that at the same coordinate point remain unchanged more than a set number of times (1–2) from a summated echo obtained over several scans, we can say with high certainty that signals remaining are entirely bird echoes. In order to analyze echoes obtained within a hemisphere, the radar must scan the space within a preset range several times, each time at a different tilt. The duration of a single scan is 10 sec, the number of scans at the same tilt was experimentally determined to be 8, and the number of tilts, usually not exceeding 6, depends on the beam dimensions and bird flight heights. Further analysis of signals thus selected enables to perform an additional filtration of bird echoes and to the plot corresponding vectors representing their flight direction, velocity and height.

Fig. 3 shows the flow chart of the algorithm used for bird identification and measuring their flight velocities. The algorithm includes several stages of echo field processing, the main stages being:

- analyzing echo power;
- excluding echoes whose power is below the noise level and above theoretical maximum of a bird echo;
- summation of all remaining echoes over a preset number of



**Fig. 2.**

**The echo field after digital processing. Lines formed by sequential dot-like echoes represent bird flight routes. Areal shapeless echoes are reflections from hills. The isolated fragments clearly show how bird flight route lines are being formed by dot-like bird echoes, among them:**

1. A single bird of a single bird group,
2. Two birds or two bird groups,
3. Several birds or several bird groups.,
4. Many birds or many bird groups within a zone of high bird density.

scans (in this study, 8 scans were chosen as a result of experiments);

- isolation of a single bird (bird group) from other reflectors by selecting bird echoes on the basis of motion and the motion pattern;
- calculating velocity vector for each bird (bird group);
- excluding false vectors using a special method of analyzing

- vector fields based on additional properties (values of radar reflectance, velocities and the degree of chaotic state in flight directions);
- plotting ornithological charts of several kinds.

For each bird echo thus isolated, the location of the echo's center of gravity is calculated taking into account the echo's power

$$\begin{aligned}\bar{X}(j) &= \sum_i S_{ij} X_i / \sum_i S_{ij} \\ \bar{Y}(j) &= \sum_i S_{ij} Y_i / \sum_i S_{ij}\end{aligned}\quad (7)$$

where  $S_{ij}$  is a signal power value,  $i$  is the number of a point within each scan and  $j$  is the number of a scan.

On the basis of values  $\bar{X}(j)$ ,  $\bar{Y}(j)$ ,  $t(j)$  (time) root-mean-square linear regression dependencies  $X(t)$ ,  $Y(t)$ ,  $Y(X)$  are formulated. Tangents of angles of slope for dependencies  $X(t)$  and  $Y(t)$  serve as evaluations of bird's velocity components  $V_x$  and  $V_y$ . Correlation coefficients  $R_{xt}$ ,  $R_{yt}$ ,  $R_{xy}$  obtained as a result of forming said regression dependencies are modulus of precision in evaluating velocity components.

Performing all the stages of selection of reflected signals on the basis of properties described above [Dinevich, Leshem, 2007] we get a corpus of data obtained over a preset scan range, including separate data on echoes from different targets, such as ground clutter, clouds, precipitation, local and migrating birds etc.

#### GRAPHIC REPRESENTATION OF BIRD MONITORING DATA (INCLUDING THE BACKGROUND OF HILLS AND ATMOSPHERIC FORMATIONS)

Fig. 4 presents a chart of bird vectors within the radar scan range. As an example, two vectors are shown enlarged together with the interim echo spots used for plotting these vectors.

The presence and the pattern of motion are the main characteristics underlying isolation of bird echoes against the background of other reflectors. The actual application of the selection procedure is described in detail in (Dinevich, Leshem, 2007). After we project bird echoes extracted from the summated data file onto a horizontal plane, we obtain vectors representing the birds within the radar scan range. If we map on this horizontal projection cursors, roads, cities, the coastline etc and orient the map along the cardinal directions, we will obtain a radar ornithological chart (analogous to a weather chart). The summated data file contains, be-

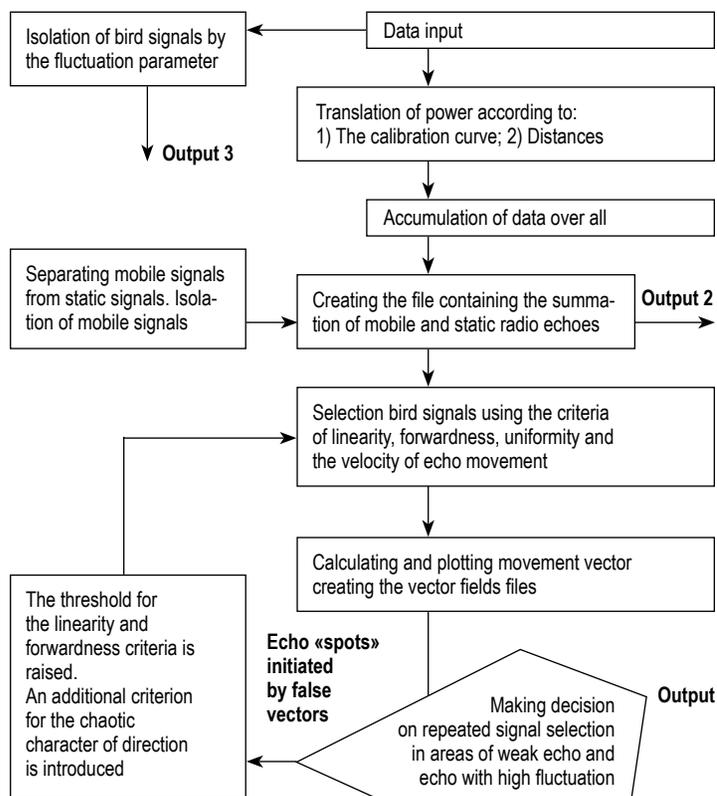


Fig. 3.

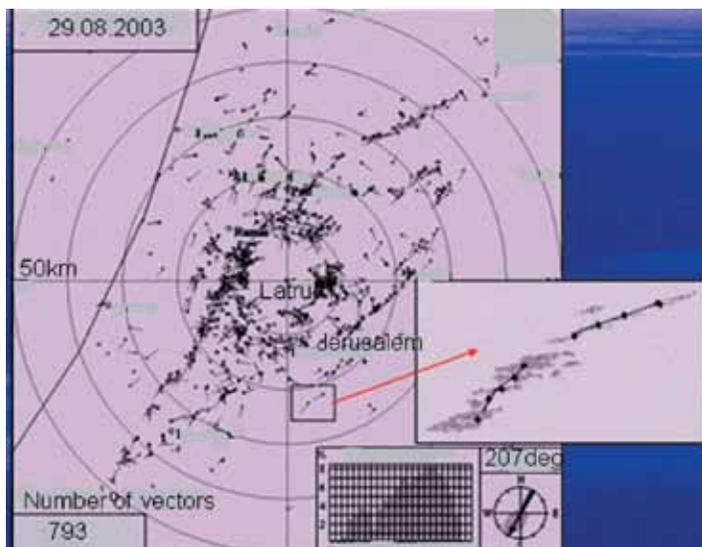
**Flow chart of the algorithm for identifying birds and measuring their flight velocities.**

sides the bird monitoring data, also some data on ground clutter, clouds, precipitation etc. Using colors or other symbols, we can present this information in ornithological charts.

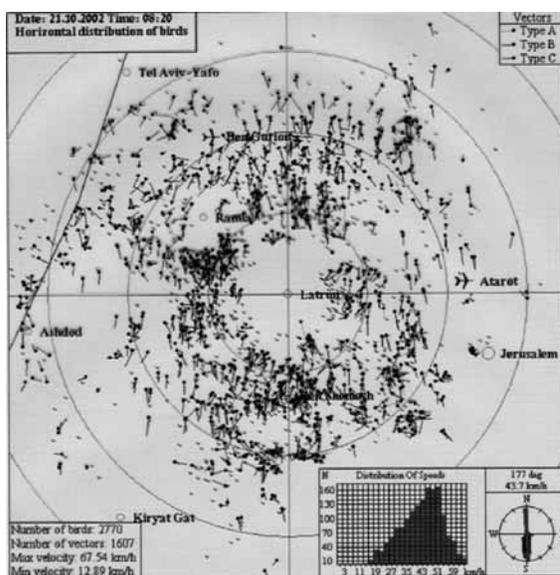
By way of example, Fig. 5 (a) presents an ornithological chart (in 1:30 km scale) plotted for 21.10.2002, 8.20 a.m. For comparison, Fig. 5 (b) presents the total echo chart with bird echoes not isolated, and Fig. 5(c) shows the bird vector field against the background of ground clutter (green-colored echo) and clouds (blue-colored echo).

Using the chart as an example, we may see the type and volume of information it contains:

1. The total number of birds within the 30-km distance range from the radar is 2770 (usually charts of this type are plotted in scales of 1:30, 1:40 and 1:60).
2. The number of echoes from birds flying in a certain direction (number of vectors) is 1670.



**Fig. 4.** Ornithological chart for 29.08.2003. Top part – direction towards the north. Thin solid line in the west – the border between the land and the sea. Streaks formed by vectors represent birds. An enlarged fragment showing two vectors enables to understand the principle of plotting two vectors formed by the centers of echoes gradually shifting from scan to scan.



**Fig. 5 (a).** Ornithological chart in a vector form. Early morning.  
 Y – local birds flying in sporadically changing directions;  
 red vectors – birds, flying with unchanged direction and velocity for significant segments of time; blue vectors – birds flying in the same direction for significant segment of time but changing velocities; brown vectors – birds frequently changing both flight directions and velocities.

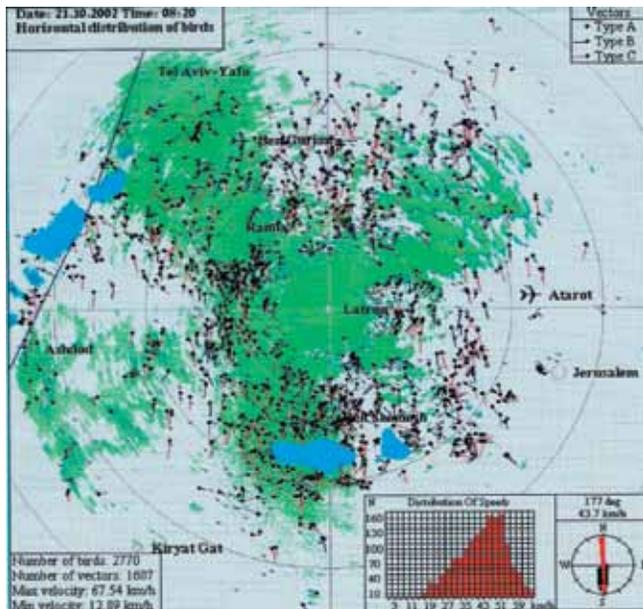


Рис. 5 (b)

Chart of the total echo (Chart 4(a) before the algorithmic echo processing).

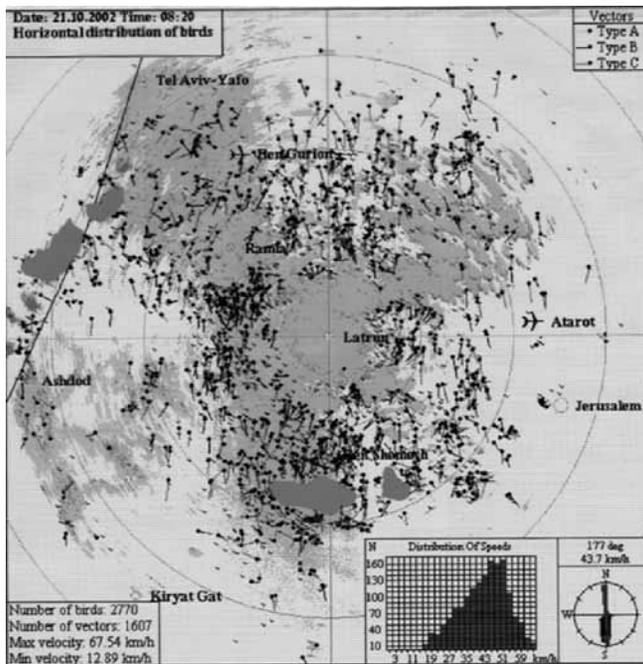


Fig. 5 (c)

Ornithological hart against the background of ground clutter and atmospheric formations (ground clutter – green color, blue colored echo – clouds).

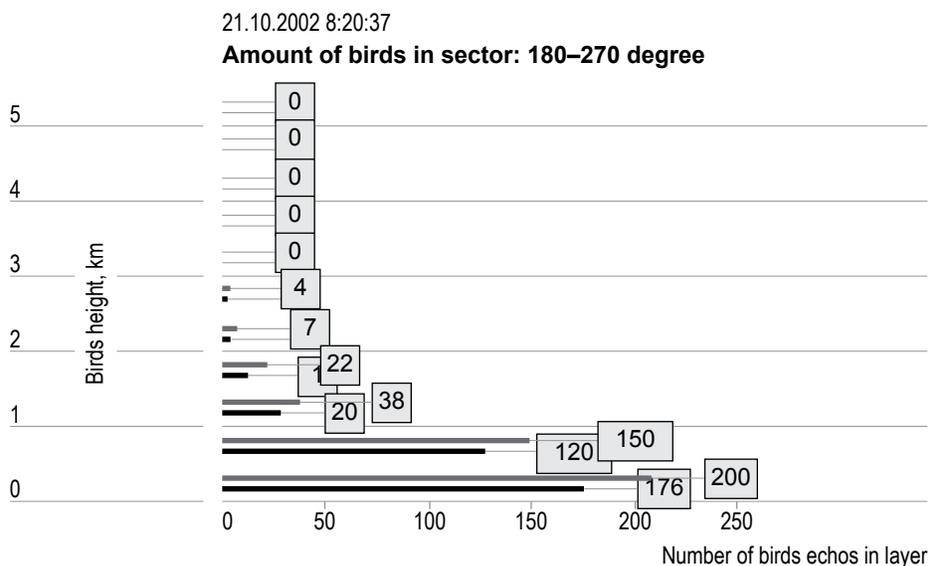


fig. 5(d))

**The maximum concentration of birds is observed within the layer up to 500 m from the ground surface (209 bird groups); a significant number of birds are flying within the 500–1000-m layer (150 bird groups), while a small number of birds are found even in the layer of 1000–3000 m (13 bird groups were observed within 2000–3000-m layer).**

Different colors mark birds with different flight patterns: red – straightforward uniform motion; blue – straightforward non-uniform motion; brown – non-straightforward and non-uniform motion.

3. Maximum bird echo movement velocity relative to the radar is about 68 km/h.
4. Minimum bird echo shift velocity relative to the radar is about 13 km/h.
5. Most bird echoes move at the speed of 45–50 km/h.
6. The dominant flight direction is 177°.
7. The majority of birds fly at a variable speed and deviate from a linear direction; however, there are many birds that, while deviating from a linear direction, fly at a uniform speed.
8. Within the scan range against the ground clutter (hills), one can isolate several groups that differ in bird density.
9. Within the cloud layer, birds tend to fly around clouds over their perimeter or to squeeze through separate cloud cells (to the south of the radar, a bird flock is trying to fly between cloud cells 1 and 2).

10. Within the 180–270° sector (see fig. 5(d)) the maximum concentration of birds is observed within the layer up to 500 m from the ground surface (209 bird groups); a significant number of birds are flying within the 500–1000-m layer (150 bird groups), while a small number of birds are found even in the layer of 1000–3000 m (13 bird groups were observed within 2000–3000-m layer). A complete analysis of the ornithological situation enables to get all this information for the entire hemisphere (360° sector). The red stripe shows the total number of birds within a layer (both local species flying about chaotically directions and migrating birds flying along a certain directions) while the blue stripe represents only migrating birds who echoes can be used for plotting vectors.

The system enables to obtain this total data corpus within the radius of 60 km from the radar every 10–15 minutes online and the forward this information to any user via the Internet. In addition, there are several issues to mention:

Atmospheric formations out into in the charts described above enable only to get some data about their locations and shifts. More detailed information about atmospheric formations (clouds, precipitation, atmospheric inhomogeneities) can be found in other radar meteorological charts that are plotted simultaneously with the ornithological ones but are based on data collected through different procedures. For example, one of the requirements for collecting such data is antenna elevation up to 85°. A sample of a meteorological chart is presented in [Dinevich et al, 2000].

Fig. 6 shows a sample of a volumetric picture of birds' distribution over a certain ground area. The arrow placed outside the figure points at the north. A symbol on the grounds stands for the radar location. In the west the terrain adjoins the costal line, in the east there are hills. Horizontal terrains lie at different heights. The software program enables to view this volumetric picture angle.

Each part of Fig. 7 (1, 1a – 11, 11a, 12) presents two samples of two types of charts illustrating changes in flight intensity for flocks of storks during day hours 29.08.2003.

In the left part of each chart one can see how echoes from airborne targets changed with time (hills, planes, atmospheric inhomogeneities, birds), while the right part presents the corresponding changes in vectors representing bird flights.

These examples are typical of two types of bird migration, namely, night flights including small hours of the morning when there are no ascending air flows (Fig. 5) and daytime flights when there are convective flows in the troposphere (Fig. 7). In the first case, the birds fly in large flocks over occupying large squares and within multiple heights. In the second case the bird flocks form long streaks [Leshem, Yom-Tov, 1998, 1996; Alpert, Tannhauser, 2000].

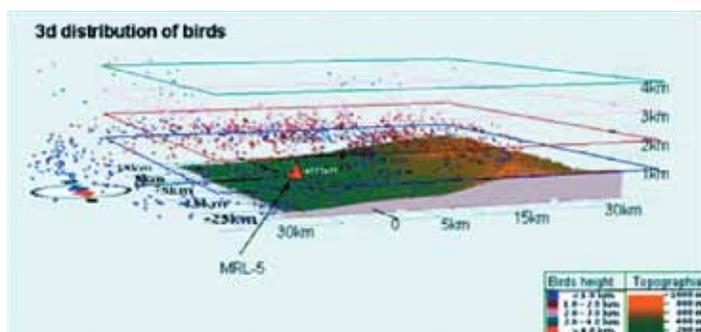


Fig. 6. A fragment of Fig. 4. Distribution of birds over vertical layers within a prescribed sector.

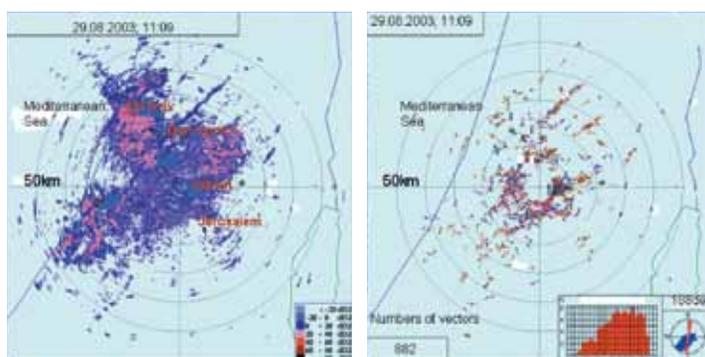


Fig. 7 (1, 1a)

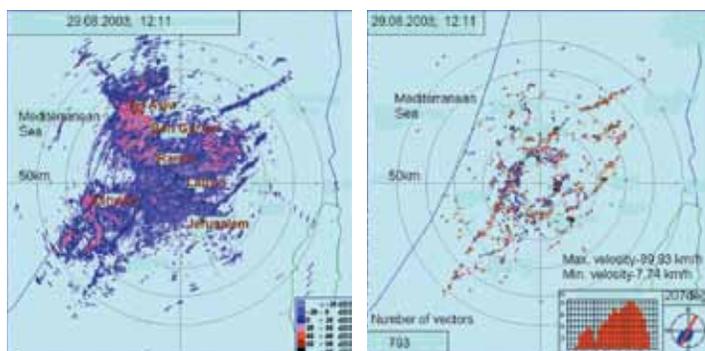


Fig. 7 (2, 2a)

Experimental data obtained with the help of the developed algorithm enables to collect statistics to evaluate some parameters of inter-seasonal bird migration over Central Israel.

Fig. 7 (3, 3a)

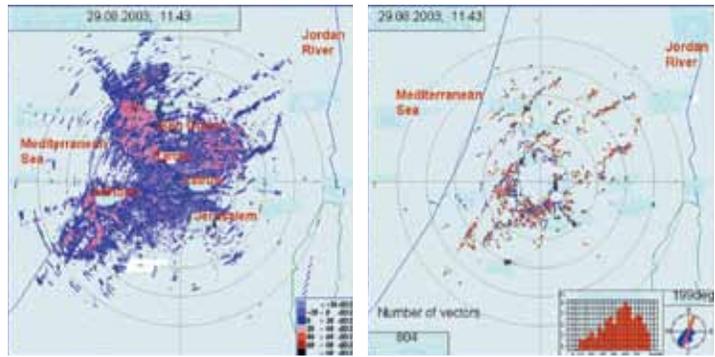


Fig. 7 (4, 4a)

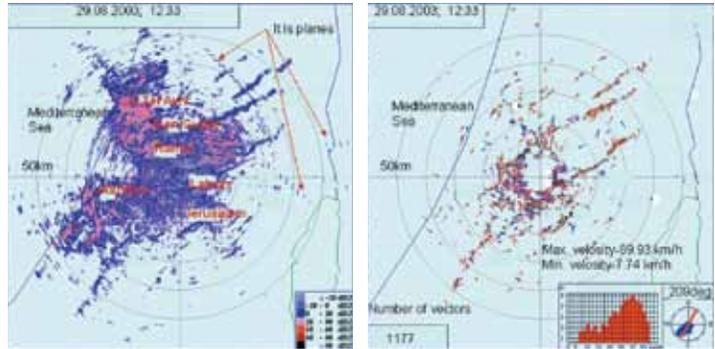


Fig. 7 (5, 5a)

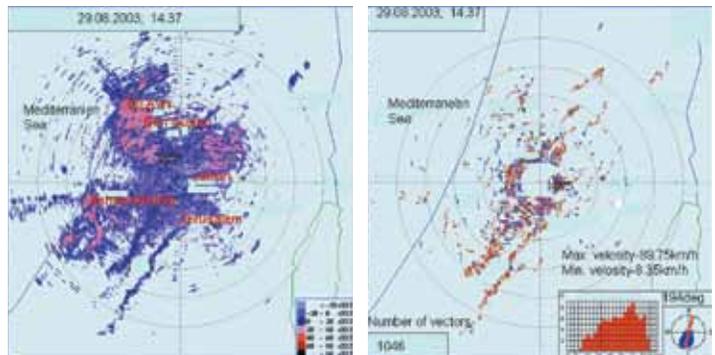


Fig. 7 (6, 6a)

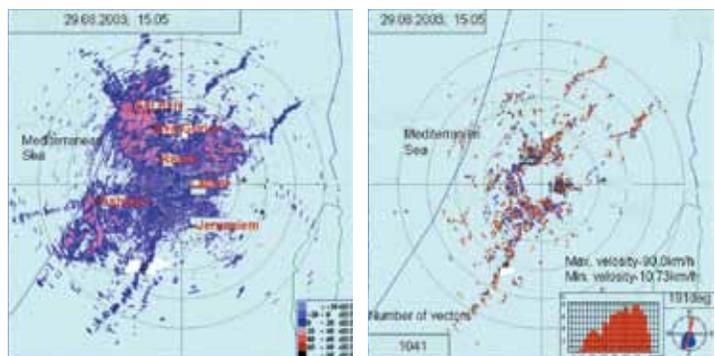
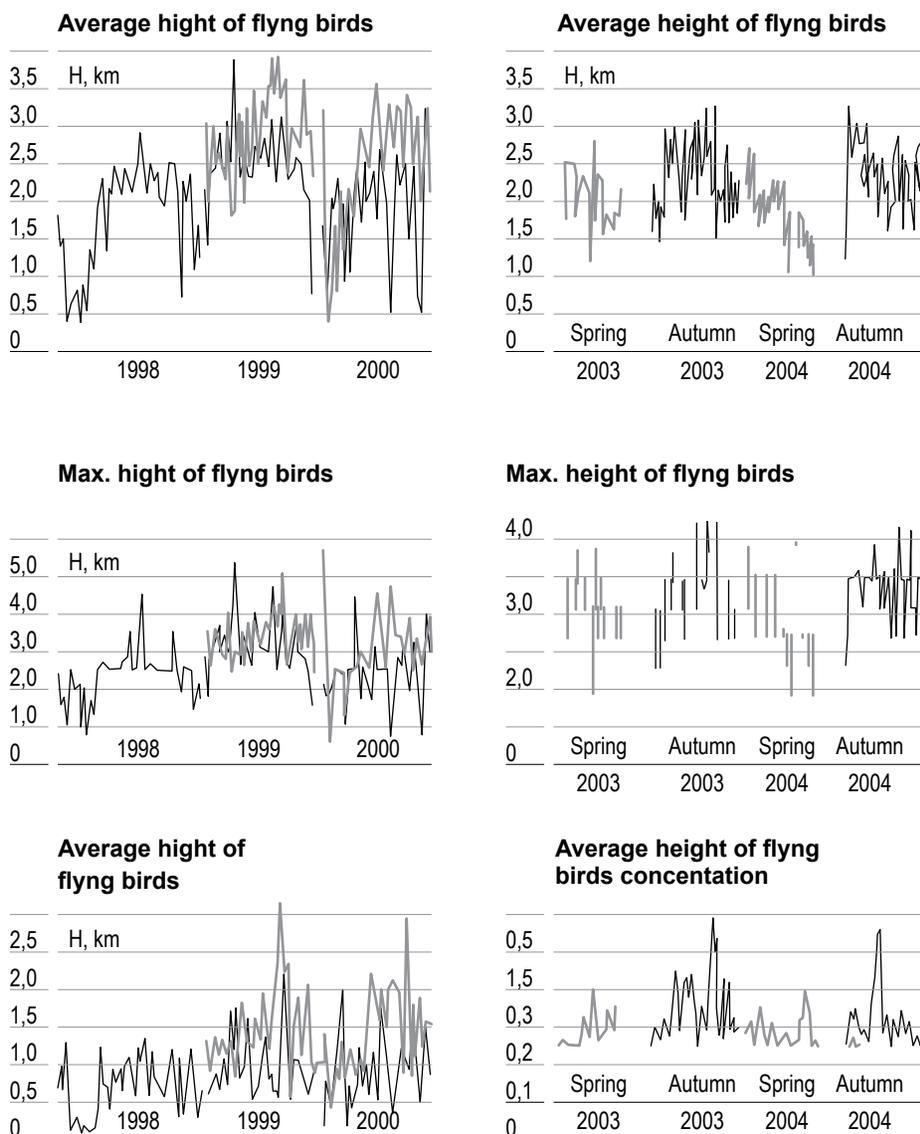


Fig. 7 (1, 1a – 6, 6a). Evolution in stork migration 29.08.2003, time 10.46–14.37. (on the left – echo from all the reflectors, on the right – bird vector fields).

## ANALYSIS OF THE EXPERIMENTAL DATA

Techniques used for collecting and processing experimental data are described in [Dinevich et al., 2001]. The meanings of the experimental research units (Average flight altitudes, Maximum flight altitudes, Extreme maximum (for entire observation period), Average level of maximum birds' concentration (for entire period) are given in Appendix.



**Fig. 8** (a, b, c, d, g, h) and Table 4 show the altitude parameters of inter-seasonal bird flights at day time and night time both in spring and in autumn.

Table 4. ALTITUDE PARAMETERS OF BIRD MIGRATION OVER CENTRAL ISRAEL

Flight altitudes, m		Spring	Autumn
Average flight altitudes, m	daytime	1,000–2,700	1,200–3,500
	night	1,900–2,600	1,500–3,000
Maximum flight altitudes, m	daytime	1,500–3,500	1,700–4,300
	night	2,900–3,600	2,200–3,300
Extreme maximum (for entire observation period), m	daytime	3,500*	4,300*
	night	5,700*	5,200*
Average level of maximum birds' concentration (for entire period), m	daytime	250–400	250–400
	night	250–1,500	250–1,000

Mean altitude values calculated by the experimental data for nighttime were found to be within the range of 1.900 m – 2.600 m in autumn (September–November) and of 1.500 m – 3.000 m in spring. These values are much lower in August (600 m – 1.700 m).

In the daytime, mean altitude values were found to be within the range of 1.000 m – 2.700 m in autumn (September–November) and 1.200 m – 3.500 m in spring. The figures clearly show in autumn daytime flights are higher than in spring, while in spring it is vice versa.

#### BIRD FLIGHT VELOCITIES AND THEIR RELATIONSHIP WITH THE CORRESPONDING WIND PARAMETERS.

Table 5 presents bird flight velocities in spring and autumn, both in daytime and nighttime.

The mean velocity of night flights was found to be:

- about 14 m/sec in spring. 24 % of the total number of birds have flight velocities within the range of 10–12 m/s, over 35% within the range of 12–14 m/s and almost 27% within the range of 14–16 m/s; the remaining 14% have a wide range of velocities;

Table 5. BIRD FLIGHT VELOCITIES IN AUTUMN AND IN SPRING

Velocities, m/sec		Spring	Autumn
Mean velocity	daytime	14	15
	night	14	13
Maximum velocity	daytime	18	16
	night	16	16
Mean wind speed at the ground surface	11h	5.5	5.0
Mean wind speed at the height of 600 m	11h	3–6	4–7

- about 13 m/sec in spring. About 7 % of the total number of birds have flight velocities within the range of 10–12 m/s, 70% within the range of 12–16 m/s and almost 11% within the range of 16–18 m/s; the remaining 12% have a wide range of velocities.

The mean velocity of day flights was found to be:

- about 14 m/sec in spring. Over 24% of the total number of birds have flight velocities within the range of 10–12 m/s, over 35% within the range of 12–14 m/s and almost 27% within the range of 14–16 m/s; the remaining 14% have a wide range of velocities;
- about 15 m/sec in spring. Over 7% of the total number of birds have flight velocities within the range of 13–14 m/s, over 70 within the range of  $> 14 \text{ m/s} - < 16 \text{ m/c}$  and almost the remaining 12% have a wide range of velocities;

The mean wind speed at the altitude of 600 m (the values close to that where the maximum migrant bird concentration was found) is within the range 4–7 m/s in autumn and 3–6 m/s in spring. As can be seen from the table, both mean and maximum values of bird flights are significantly higher than the wind speed values both at the ground surface and at the altitude of 600 m.

## BIRD FLIGHT DIRECTIONS AND THEIR RELATIONSHIP WITH THE CORRESPONDING WIND PARAMETERS.

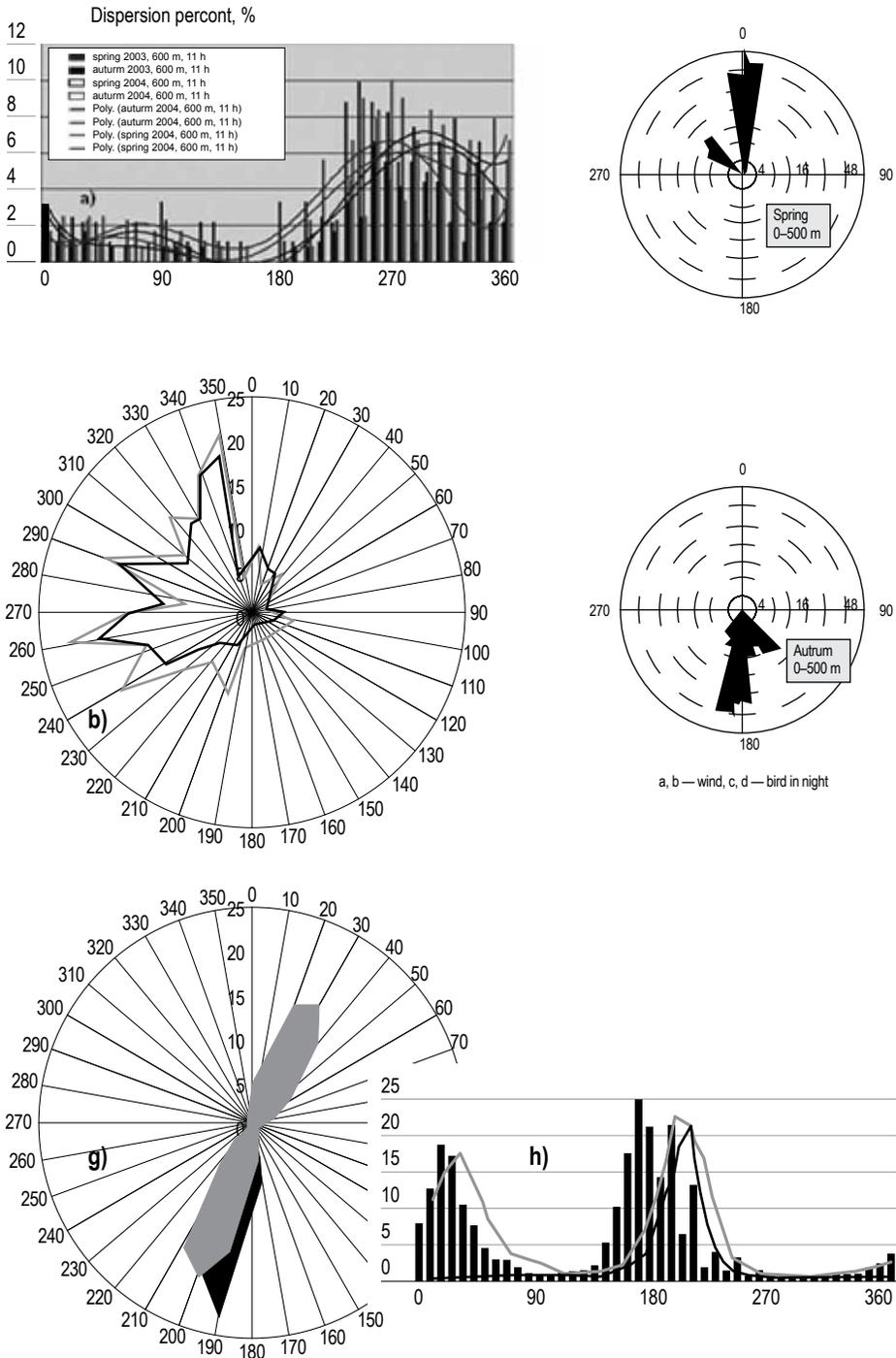
Fig. 9 (a,b) shows climatological wind rose in autumn and in spring plotted on the basis of Beit Dahan meteorological station (near Tel Aviv) data for the time of 11 a.m. (local time) at the altitude of 600 m over the sea level. This altitude was chosen as it was found to be at the level of maximum day migration. 11 a.m. is the time when maximum day migration is most often observed. Fig. 9 (a) presents a recurrence graphs for wind directions (in %) within azimuth sectors in autumn and in spring. As can be seen in the graphs the dominant wind direction both in autumn and in spring is from the sea, the dominant direction in autumn being W-NW and in spring W-SW (according to the meteorological standards, the wind rose indicated the direction from which wind blows). In contrast, the bird migration graphs show the direction into which birds Fig. 9 (d, g, h) shows the diagrams of bird flight directions in daytime and nighttime in autumn and in spring.

Fig. 9 (l, m) shows similar diagrams for daytime in 2006 and 2007. The radius of the wedges corresponds to the observation frequency. The higher probable direction of night migration for 90% birds is  $183^\circ$  in autumn and  $6^\circ$  in spring. We observed bird flocks migration at night time and early morning towards the Mediterranean Sea in spring and from out the Mediterranean Sea in autumn. The sector of these directions is different from the general sector of seasonal migrations being on average  $135^\circ$  in autumn and  $315^\circ$  in spring. This deviation from the dominant direction of migration in the lower altitudes be accounted for by the fact that the birds migrating over the Mediterranean Sea belong to the water-fowl family. Fig. 9 (a, h) shows the spectra of the mean values of seasonal bird migration directions in night and day time, respectively.

The highest probable direction of daytime migration for 90% birds is  $190\text{--}220^\circ$  in autumn and  $10\text{--}50^\circ$  in spring. The spring direction spectrum is much wider than that in autumn.

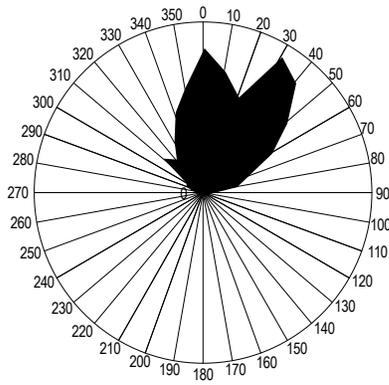
Comparing figures 9(a-m) one can see that both in autumn and in spring the areas of dominant migration directions coincide with the areas of the most infrequent wind directions. Winds over central Israel most often blow from one side relative to the daytime bird flight migration direction, having no significant impact on the distribution of flight altitudes.

Spring 2003, 600 m, 11 h

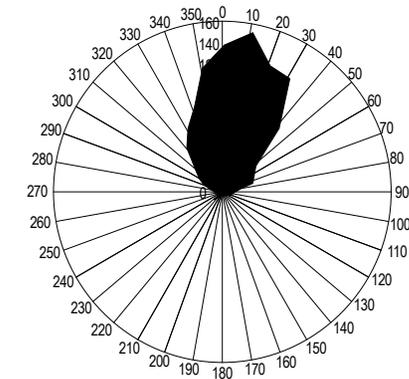


**Fig. 9** a) average flight altitudes, b) – maximum flight altitudes, c) – average level of maximum birds concentration (for the entire period) at nighttime. d, g, h) the same for daytime. Autumn data marked blue, spring data marked red.

**Distribute average direction at revier  
 Spring 2006**



**Distribute average direction at revier  
 Spring 2007**



**Distribute average direction at revier  
 Autumn 2006**

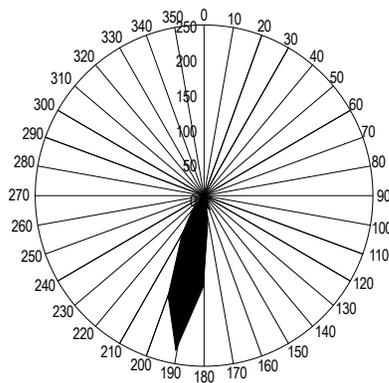


Fig. 9 (l, m)

Distribute average direction at review autumn 2006–2007.

## RELATIVE CHANGES IN MIGRATING BIRDS DENSITY AT DAY/NIGHTTIME IN AUTUMN AND SPRING

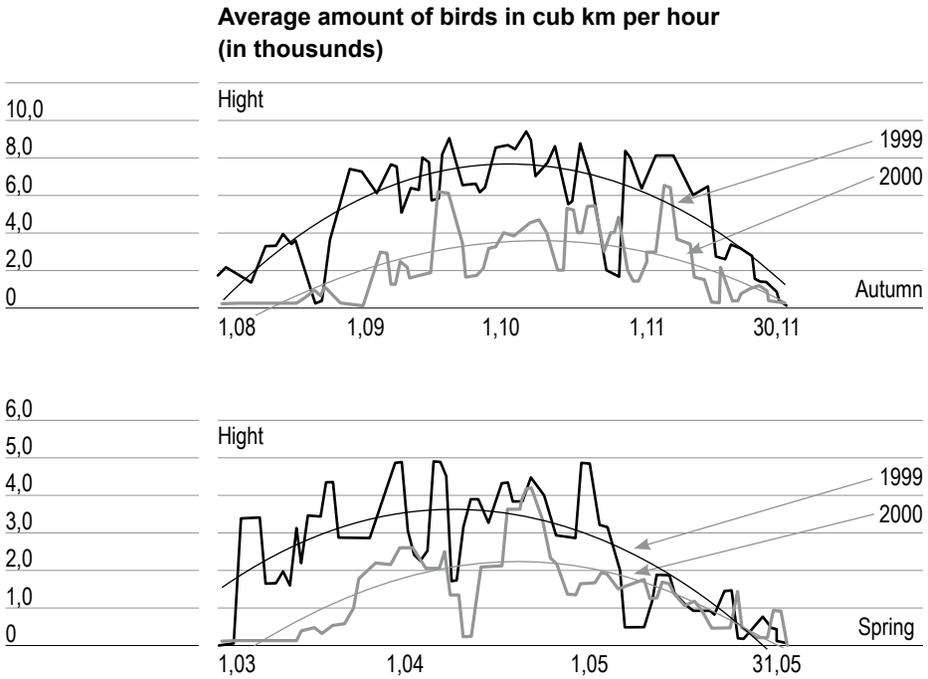
The accuracy of radar estimation of bird quantities depends on several parameters of the radar ornithological system, among them the surveillance span, receiver sensitivity and errors in the bird identification algorithm. In addition, within the radius of radar surveillance a part of low-flying birds screened by high hills or even fly at the level that is below the radar beam zero level. For example, a part of the bird migration flow over Israel routes along the Jordan Valley and the Dead Sea. The Dead Sea is located at 500 m below the sea level. Since the radar is located at 270 m above the sea level, bird flying altitude of 500m are significantly lower than the beam zero level, and these birds can not be seen by the radar. Taking this into consideration, in order to determine the error in radar estimation of the absolute number of birds currently in the air, further research and special techniques are required.

Nevertheless, using the same technique for collecting data corpus over several years enables to estimate relative bird density within a unit of air volume in autumn and spring, at day and night time.

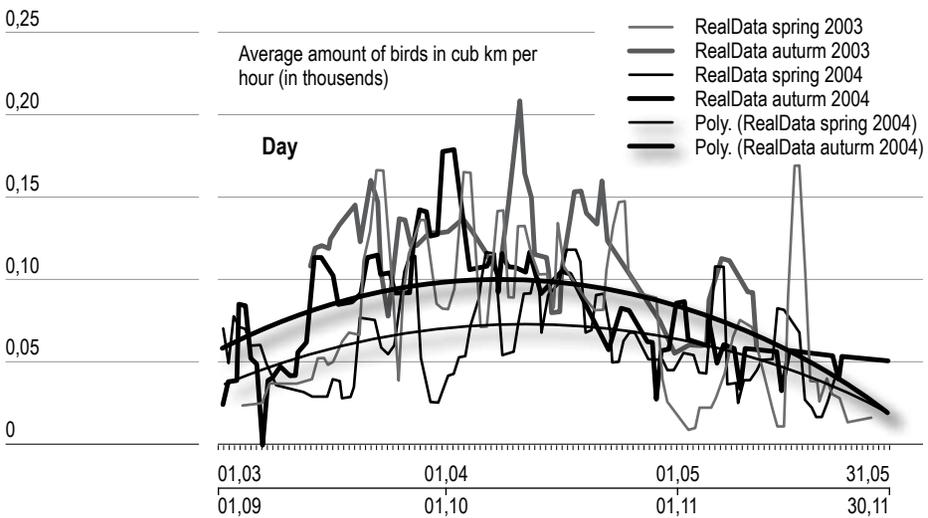
These estimations are shown in Fig 10 (a, b, c). According to the data, both at day and night time maximum bird quantities cross Central Israel in September-October and in late March-April. At night the number of flying birds is by factor of tens greater than at day time. For example, within a cubic kilometer of air the maximum number of migrating birds can reach 170 (up to 200 in some cases), while at night this figures approaches 5 thousand in spring and 10 thousand in autumn. The number of birds migrating in autumn significantly exceeds that in spring.

### General Conclusions

- Radar ornithological charts plotted on the basis of the algorithms developed in the study contain the following information collected within the radius of 60 km from the radar:
  1. the general number of birds currently in the air, among them the number of migrating birds;
  2. maximum and minimum bird flight altitudes and velocities;
  3. quantitative distribution of bird over altitudes;
  4. spectra of flight directions and velocities, including the vector of total direction;
  5. vector fields of birds' movement against the background of current meteorological situation and binding to the terrain;
  6. distribution of birds by their flight patterns (degrees of straightforwardness and uniformity).
- The method proposed for bird identification can be applied to using other types of high-grade radars, both coherent and non-



**Fig. 10. (a, b): Graph and wind rose of wind directions in autumn (blue color and spring (red color);  
 c, d: diagrams of bird migration directions at daytime in spring and autumn, respectively;  
 g, h: diagrams and graphs of bird migration at daytime in autumn (blue color) and spring (red color); the same for years 2006 and 2007.**



**Fig. 10 (c) Relative changes in bird quantities within a cubic kilometer of air at day/nighttime in spring and autumn.**

coherent ones whose antennas form sharply targeted symmetric beams.

- The research enabled to evaluate the main parameters of bird migration over Central Israel based on a vast corpus of experimental data. These parameters can be used for plotting optimum routes for aircraft.
- The radar ornithological system developed in the study has been efficiently use din Israel for air traffic control.

### Acknowledgements

The authors express their gratitude to the Department of Research of the Ministry of Defense of Israel and The Israeli Ministry of Immigrant Absorption for the financial support of the project; to Ilan Setor, Director of the Israeli Meteorological Agency, for the courtesy of providing the research with meteorological data; to Dmitry Shtivelman for the technical support in the radar maintenance.

### REFERENCES

1. Abshayev M., Burtsev I., Vaksenburg S., Shevela G., 1980. Guide for use of the MRL-4, MRL5 and MRL-6 radars in urban protection systems. L., "Hydrometeoizdat".
2. Abshayev M., Kaplan L., Kapitannikov A., 1984. Form reflection of meteorologic targets at the primary processing of the meteorologic radar signal. Transactions of VGI, Bd 55.
3. Alpert, P., D. S. Tannhauser, (2000). "Migrating soaring birds align along sea-breeze fronts; First evidence from Israel". Bulletin of the American Meteorological Society 81(7): 1599–1601.
4. Atlas D., 1964. Advances in Radar Meteorology. Adv. in Geophys. Vol. 10, p. 318–468.
5. Bahat O. and Oded Ovadia, 2005. Minimizing Bird-Aircraft Collisions Caused by Resident Raptors in Israel. IBSC 27<sup>th</sup> Meeting, Athens, Hellas, 23–27 May, p. 178.
6. Bruderer B. and Joss, 1969. Zur Registrierung und Interpretation von Echosingnaturen an enema 35 cm. Zielverfolgungstradar. Orn. Beob., Bd 66, 70–88.
7. Bruderer B. 1992. Radar studies on Bird migration in the south of Israel. BSCE/21, Jerusalem, pp. 269–280.
8. Buurma, L., 1999. The Royal Netherlands Air Force: Two Decades Of Bird Strike Prevention "En Route". International Seminar on Birds and Flight Safety in the Middle East, Israel, April, 25–26, 1999. Pp. 71–83.
9. Chernikov A., 1979. Radar clear sky echoes. Leningrad, Hydrometeoizdat, 3–40.
10. Chernikov A., Schupyatcky A., 1967. Polarization characteristics of radar clear sky echoes. Transactions of USSR academy of sciences, atmosphere and ocean physics, V. 3, N2, 136–143.
11. Dinevich L., Kapitalchuk I., Schupyatcky A., 1990. Measurement of the microphysical characteristics of clouds and precipitation with a dual-polarization radar. In: Artificial modification of atmospheric processes in Moldova, iss 2., Kishinev.

12. Dinevich L., Kapitalchuk I., Schupyatcky A., 1994. Use of the polarization selection of radar signals for remote sounding of clouds and precipitation. 34 th Israel Annual conference on Aerospace science, 273–277.
13. Dinevich L., Leshem I., Gal A., Garanin V., Kapitannikov A., 2000. Study of birds migration by means of the MRL-5 radar. J. Scientific Israel –Technological Advantages. Vol. 4.
14. Dinevich L., Kaplan L. 2000. On Radar observation of Birds migration. J. Scientific Israel –Technological Advantages. Vol. 4.
15. Dinevich L., Leshem Y., Sikora, O., 2001. RADAR OBSERVATIONS ANALYSIS OF SEASON BIRD MIGRATION IN ISRAEL AT NIGHT (Based on data of radar photo registration obtained in 1998–2000), J. Scientific Israel – Technological Advantages, Vol. 3, 2001, No. 1–2.
16. Dinevich L., Leshem Y., Pinsky M., Sterkin A., 2004. Detecting Birds and Estimating their Velocity Vectors by Means of MRL-5 Meteorological Radar. J. The Ring 26, (2): 35–53.
17. Dinevich L., Leshem Y., 2008. Algorithmic system for identifying bird radio-echo and plotting radar ornithological charts. J. The Ring 28, 2: 3-39.
18. Eastwood E., 1967. Radar ornithology. London, Methuen, 278.
19. Edwards J., Houghton E. W., 1959. Radar echoing area polar. Diagrams of birds. Nature, 184, N. 4692.
20. Houghton E., 1964. Detection, recognition and identification of birds on radar. In: World conf. Radio Met., Amer. Met. Soc., Boston, 14–21.
21. Doviak, R., Zrnicek, D., 1984. Doppler Radar and Weather Observation. Academic Press Inc., 512 pp.
22. Gauthreaux, S. A. and C. G. Belser (2003). "Radar ornithology and biological conservation." Auk 120(2): 266–277.
23. Ganja I., Zubkov M., Kotjazi M., 1991. Radar ornithology, Stiinza, 123–145.
24. Gudmundsson, G. A., T. Alerstam, et al. (2002). "Radar observations of Arctic bird migration at the Northwest Passage, Canada". Arctic 55(1): 21–43.
25. Gauthreaux, Sidney A. Jr., David S. Mizrahi, and Carroll G. Belser. 1998. Bird Migration and Bias of WSR–88D Wind Estimates. Weather and Forecasting 13:465–481.
26. Glover K., Hardy K., 1966. Dot angels: insects and birds. In: Proc. 12<sup>th</sup> Weather Radar Conf., Amer. Met. Soc., Boston, p. 264–268.
27. Houghton E., 1964. Detection, recognition and identification of birds on radar. In: World conf. Radio Met., Amer. Met. Soc., Boston, 14–21.
28. Hajovsky R., Deam A., La Grone A., 1966. Radar reflections from insects in the lower atmosphere. IEEE Trans. On Antennas and Propagation, vol. 14, pp. 224–227.
29. Khardy K., 1969. Зондирование безоблачной атмосферы с помощью мощных радиолокаторов с высоким разрешением. – «Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике». Т. 57, № 4 / Пер. с англ. М.: Мир, с. 109–112.
30. Komenda-Zehnder, S., F. Liechti, et al. (2002). "Is reverse migration a common feature of nocturnal bird migration. An analysis of radar data from Israel." Ardea 90(2): 325–334.
31. Kropfli R. A., 1970. Simultaneous radar and instrumented aircraft observations in a clear air turbulent layer. In: Prepr. 14<sup>th</sup> Radar Met. Conf., Amer. Met. Soc., Boston, p. 117–120.

32. Larkin, R. P., W. R. Evans, et al. (2002). "Nocturnal flight calls of Dickcissels and Doppler radar echoes over south Texas in spring". *Journal of Field Ornithology* 73(1): 2–8.
33. Leshem, Y., Y. Yom-Tov. 1998. Routes of migrating soaring birds. *Ibis* 140, 41–52.
34. Leshem, Y. and S. A. Gauthreaux, 1996. Proposal to develop a global network to predict bird movements on a real-time and daily scale by using radars. *Bird Strike Committee Europe BSCE-23/WP 50*. London, May 13–17.
35. Leshem, Y., Y. Yom-Tov 1996. The use of thermals by soaring migrants in Israel. *Ibis* 138, 667–674.
36. Lofgren G., Battan L., 1969. Polarization and vertical velocities of dot angel echoes. *J. Appl. Met.*, pp. 948–951.
37. Miller, M. A., J. Verlinde, et al. (1998). "Detection of nonprecipitating clouds with the WSR-88D: a theoretical and experimental survey of capabilities and limitations." *Weather and Forecasting* 13(4): 1046-1062.
38. Oded Ovadia, Maj., M. Sc., Israel and Nicholas B. Carter, Ph.D., USA. 2005. A Paradigm Shift in Bird Strike Prevention by the Israeli Air Force. *IBSC. 27<sup>th</sup> Meeting*. Athens, Hellas, 23–27 May 2005. pp. 57–58.
39. Venema, V., H. Russchenberg, et al. (2000). "Clear-air scattering observations: downdraft and angels." *Physics and Chemistry of the Earth. B: Hydrology* 25 (10–12): 1123–1128.
40. Richardson W. J. and T. West, 2005. Serious Bird strike Accidents to U. K. Military Aircraft, 1923 to 2004: Numbers and Circumstances. *IBSC 27<sup>th</sup> Meeting*, Athens, Hellas, 23–27 May, p. 5.
41. Russell, K. R. and S. A. Gauthreaux (1998). "Use of weather radar to characterize movements of roosting purple martins". *Wildlife Society Bulletin* 26(1): 5–16.
42. Сальман Е., Брылёв Г., 1961. Радиозо диэлектрических неоднородностей термического характера. *Тр. ГГО*, вып. 120, с. 37–44.
43. Skolnik, M., 1970. *Radar handbook*. McGraw-hill book company.
44. Schaefer G., 1966. The study of birds echoe using a tracking radar. *Proc. 14<sup>th</sup> Int. Ornith. Cjngress*. Oxford.
45. Schaefer G., 1968. *Bird recognition by radar: a study in quantitative radar ornithology. The problems of birds ad pests*. London; New York.
46. Шестаков Г., 1971. *Строение крыльев и механика полёта птиц*. М., 180 с.
47. Schuryatcky A., 1959. Радиолокационное рассеяние несферическими частицами, *Тр. ЦАО*, вып. 30, с. 39–52.
48. Stepanenko V., 1973. *Радиолокация в метеорологии*. Гидрометеоиздат. Ленинград.
49. Thorpe J., 2005. *Fatalities and Destroyed Civil Aircraft Due to Bird Strikes, 2002 to 2004 (with an Addendum of Animal Strikes)*. *IBSC 27<sup>th</sup> Meeting*, Athens, Hellas, 23–27 May, p. 17–24.
50. Zavirucha V., Saricev V., Stepanenko V, Shepkin U., 1977. Study of the dispersion characteristics of the meteorological and ornitological objects in echo-free cameras *Proc. Main Geophysic Observatory*, №395, с. 40–45.
51. Zrnicek, D.S. and A.V. Ryzhkov (1998). "Observations of insects and birds with a polarimetric radar". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36(2): 661–668.
52. Якоби В. Э. *Биологические основы предотвращения столкновений самолётов с птицами*. М., 1974, 165 с.

## ГЕОГРАФИЯ ТУРИСТСКИХ ПОТОКОВ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ: СТАТИСТИКА, ТРЕНДЫ, ПРОБЛЕМЫ

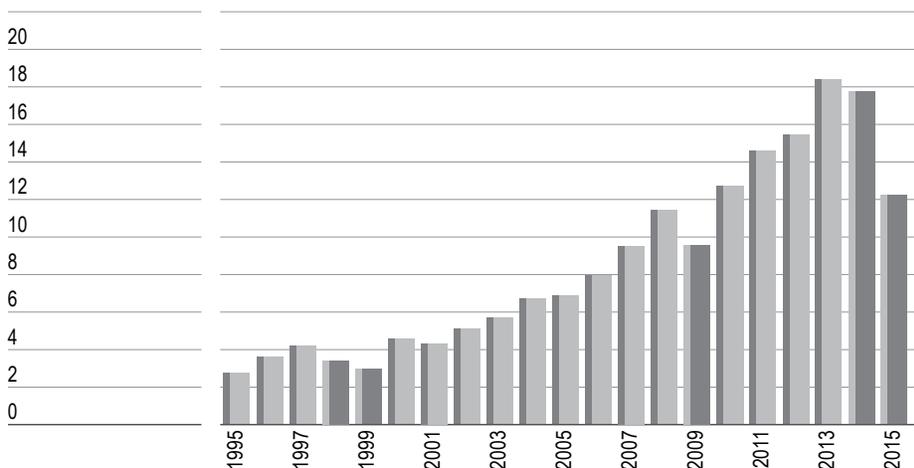
### Geography of tourist flows in the Russian Federation: statistics, trends, challenges

Статья посвящена географической структуре российского рынка туризма. Анализ охватывает 20-летний период с середины 1990-х годов до 2015 года. В статье обобщен большой массив статистической информации из разных официальных источников, что позволило проследить количественные, а также качественные изменения в географии туристских потоков в Российской Федерации. Освещаются современные тенденции в развитии международного и внутреннего туризма в России: сужение сегмента зарубежного отдыха россиян, переориентация потребительского спроса на внутренние поездки, рост въездного туристского потока в страну. Раскрываются факторы структурных изменений в географии туристских потоков: падение цен на нефть, резкие колебания курса рубля по отношению к мировым валютам, сложная экономическая ситуация в стране и сокращение платежеспособного спроса населения, запрет продажи туров на самых массовых выездных туристских направлениях – в Египет и Турцию, введение международных санкций и др. Сделан вывод о том, что современный экономический кризис привел к «тектоническому сдвигу» в российском туризме и изменению парадигмы отрасли. Перспективы ее процветания связываются с развитием внутреннего и въездного туризма. Вместе с тем для цивилизованного общества важен и выездной туризм. Все три вида туризма образуют целое, устойчивость которого зависит от их гармоничного развития.

The article discusses the geographical structure of Russian tourism market. The analysis covers 20-year period from the mid-1990s to 2015. The study summarizes large amount of statistical data from various official sources that allows following quantitative and qualitative changes in the geography of tourist flows in the Russian Federation. Current trends in international and domestic tourism development in Russia, such as the reduction in foreign holidays of tourists from Russia, reorientation of consumer demand for domestic trips and the growth of inbound tourist flow to the country, are highlighted. The reasons for structural changes in the geography of tourist flows are revealed. They include the drop in oil prices, sharp fluctuations of the ruble exchange rate against foreign currencies, difficult economic situation in the country and its solvent demand reduction, the ban on the tours to the most popular outbound tourist areas – Egypt and Turkey, establishing of international sanctions against Russia, etc. The paper concludes that current economic crisis has led to a "tectonic shift" in Russian tourism industry and to a change in its paradigm. Prospects for its future prosperity are connected with domestic and inbound tourism development. However, outbound tourism is also important for any civilized society. All the three types of tourism form the entity which requires harmonious development for stability.

**Ключевые слова:** международный туризм, въездной туризм, выездной туризм, внутренний туризм, туристский поток, география туризма, туристский спрос, Россия.

**Key words:** international tourism, inbound tourism, outbound tourism, domestic tourism, tourism flow, tourism geography, tourism demand, Russia.



**Рис. 1.** Динамика числа поездок российских граждан за границу с туристскими целями, млн поездок.

Источник: данные Федеральной службы государственной статистики.

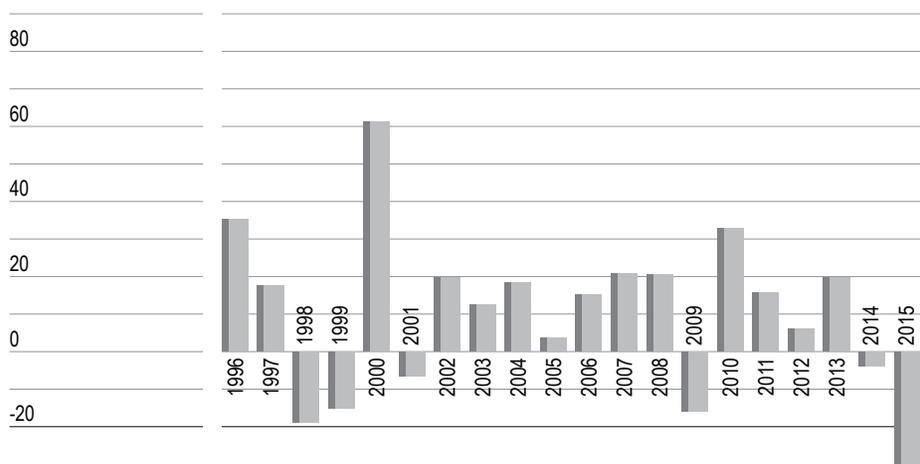
## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Российской Федерации все больше внимания на разных уровнях управления уделяется развитию внутреннего и въездного туризма. Туризм относится к несырьевой сфере и в силу ярко выраженного мультипликативного эффекта способен оказать позитивное влияние на социально-экономическое развитие субъектов Российской Федерации и страны в целом. Он стимулирует экономический рост, малое и среднее предпринимательство, занятость и самозанятость населения, сглаживание территориальных диспропорций, повышение уровня и качества жизни населения, увеличение объемов экспорта и налоговых поступлений в бюджеты всех уровней.

В последние годы туристский рынок страны переживает глубокие изменения. Они касаются, в частности, географии туристских потоков. Эти изменения обусловлены комплексом факторов, среди которых наиболее действенными являются падение цен на нефть, резкие колебания курса рубля по отношению к мировым валютам, сокращение платежеспособного спроса, введение международных санкций и др.

## ВЬЕЗДНОЙ ТУРИЗМ

Начиная с 1990-х годов российский туристский рынок демонстрировал глубокие диспропорции в пользу выездного туризма, несмотря на то что на этом рыночном сегменте поездки связаны с более высокими рисками. Сложившиеся диспропорции носили долгосрочный характер. По данным Росстата, с 2000 по 2007 г. объем выездного потока из России увеличился бо-



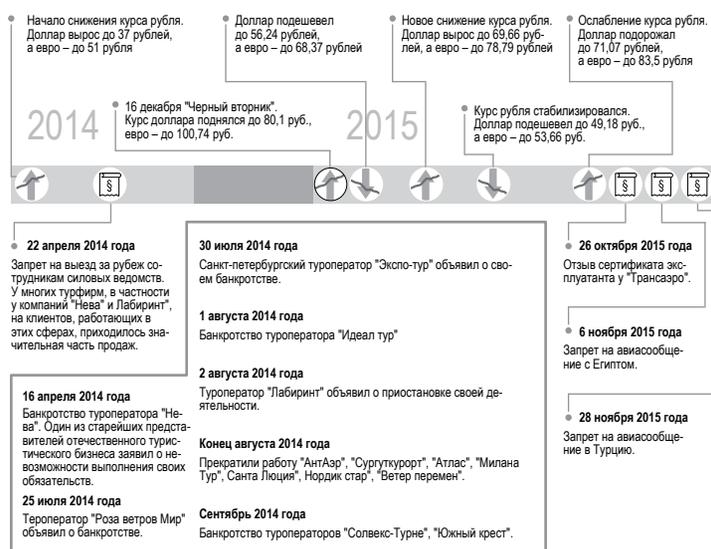
**Рис. 2.** Динамика цепных темпов прироста выездного туризма, % к уровню предыдущего года.

Источник: данные Федеральной службы государственной статистики, 2016.

лее чем в 2 раза (с 4,5 млн до 9,4 млн поездок), а с 2010 по 2013 г. – в 1,5 раза и составил 18,3 млн поездок. Рис. 1 показывает устойчивый рост выездного туризма в России за период с 1995 по 2013 г. Даже кризисы 1998 и 2008–2009 гг. не смогли переломить этот тренд. Сокращения выездных туристских потоков было кратковременными. Например, после дефолта 1998 г. количество туристских поездок за границу возросло на 60,7% в 2000 г. к уровню предшествующего года, а после кризиса 2008–2009 гг. рост составил 32,6% в 2010 г. Уже на следующий год после окончания кризисов объемы выездного туризма не просто восстанавливались, но превышали докризисный уровень за счет реализации отложенного спроса и продолжали быстро расти в последующие годы.

Современный кризис имеет иную природу, а отрицательная динамика спроса на зарубежные туры, отмеченная в 2014 г., продолжилась в 2015 г. По данным Росстата, в 2015 г. число поездок российских граждан за границу с туристскими целями уменьшилось на 31,3% по сравнению с 2014 г. и составило 12,1 млн. До 2015 г. самое большое падение туристского выезда было зафиксировано в кризисном 1998 г. – на 24,4%. Таким образом, сокращение 2015 г. – самое значительное за последние 20 лет (рис. 2).

Согласно результатам ежегодного исследования Всероссийского центра изучения общественного мнения (ВЦИОМ), спад в выездном туризме продолжился в сезон 2016 г. Доля тех, кто хотел бы провести отпуск за рубежом, снизилась до 21% (для сравнения: 33% в 2013 г.) [9]. Это обусловлено не только сохраняющейся сложной экономической ситуацией в стране, но и в последнюю очередь запретом продажи туров на самых массовых выездных

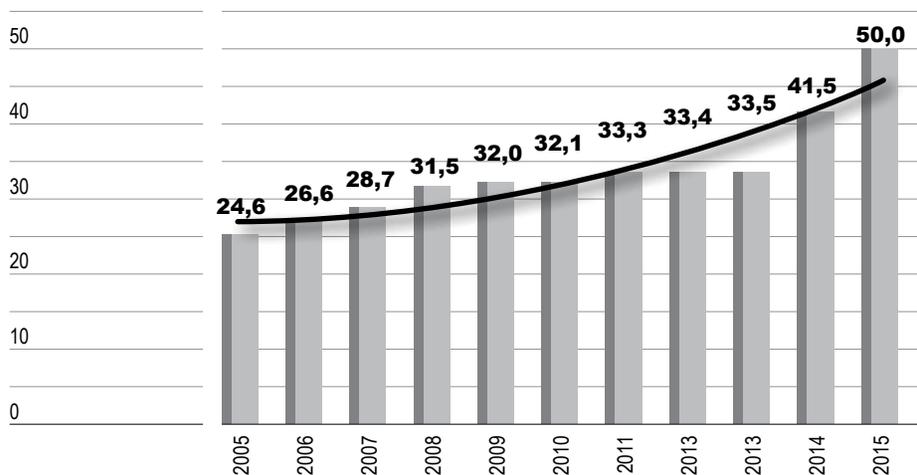


**Рис. 3. Сдерживающие факторы выездного туризма в России в 2014–2015 гг. [2]**

туристских направлениях – в Египет и Турцию. (Подробно о факторах сокращения выездного туризма в России см. рис. 3).

Не только Египет и Турция потеряли российских туристов, но большинство стран выезда россиян также показали отрицательный результат в 2015 г. по сравнению с 2014 г. По данным Росстата, первые позиции по динамике снижения турпотока из России заняли дальние и экзотические страны (территории): Индонезия (-96,6%), Тунис (-83%), Доминикана (-82,5%), Мексика (-66,5%), Марокко (-64,4%), Таиланд (-46%), Китай (-45,5%) и Гонконг (-46%), Индия (-43,7%), Мальдивы (-43,7%), Куба (-43%). Отрицательную динамику также продемонстрировали большинство европейских и североамериканское направления.

В общем, по данным опроса, проведенного весной 2016 г., большинство россиян (59%) никогда не выезжали на отдых за пределы стран бывшего СССР. 15% раньше выезжали, а теперь нет. 9% бывают за границей с целью отдыха раз в два-три года, 5% – примерно раз в год, по 2% – два-четыре раза в год и больше. Среди тех, кто один раз в год и чаще отдыхают за границей, преобладают руководители и управленцы (20%), служащие (10%) и в целом россияне в возрасте 25–40 лет (11%), с высшим образованием (68%), с высоким потребительским статусом (20%), москвичи (22%) и жители других городов с населением более 500 тыс. человек (9%) [5].



**Рис. 4.** Динамика внутреннего туризма в Российской Федерации в 2005–2015 гг., млн поездок. Сплошной показана линия тренда.

Источник: данные Российского союза туриндустрии, 2016.

### ВНУТРЕННИЙ ТУРИЗМ

Одновременно с сужением сегмента зарубежного отдыха происходит переориентация потребительского спроса на внутренние поездки. Последние годы рынок внутреннего туризма находился в стадии стагнации. Начиная с 2013 г., он показывает заметный рост. Ежегодный прирост составляет около 20% (рис. 4).

Этот сдвиг в потребительском поведении россиян обусловлен не только экономическими причинами, хотя, конечно, они играют главенствующую роль. Прорыв в развитии внутреннего туризма в России за последние три года во многом связан с внедрением пакетных туров. На отечественный рынок вышли крупнейшие туроператоры, которые прежде работали преимущественно на сегменте выездного туризма. Они сформировали полноценные пакетные туры с авиаперелетом, трансфером, проживанием и питанием на российские курорты. Это позволило снизить стоимость отдыха в России и переориентировать туристов с самостоятельного отдыха на организованный. В 2015 г. было продано около 600 тыс. турпакетов. Сегодня каждая четвертая продаваемая путевка в России – это пакетный тур [10]. В 2016 г. туроператоры расширили линейку турпродуктов. Они предложили бюджетные пакетные туры с трансфером по железной дороге (запуск чартерных поездов), что сделало отдых в стране еще более доступным для широкой аудитории. Практика про-

даж пакетных туров привела не только к снижению стоимости отдыха на российских курортах, но также стала залогом повышения качества оказания туристских услуг.

Спрос на отдых в России растет благодаря созданию современной туристской инфраструктуры. Эта задача решается в рамках Федеральной целевой программы по развитию внутреннего и въездного туризма. В документе предусмотрено строительство 154 объектов обеспечивающей инфраструктуры в 26 регионах страны. К настоящему времени построено 76 объектов, в том числе 55 – введены в эксплуатацию и 21 – находятся в стадии ввода в эксплуатацию, еще 78 – в процессе строительства [10]. «Структурообразующими функциональными элементами Программы» являются туристско-рекреационные и автотуристские кластеры, среди которых такие известные, как «Дед Мороз» (Вологодская обл.), «Белокуриха» (Алтайский край), «Плес» (Ивановская обл.) и др. Наиболее крупные туристские потоки формируют приморский и горный кластеры в Сочи.

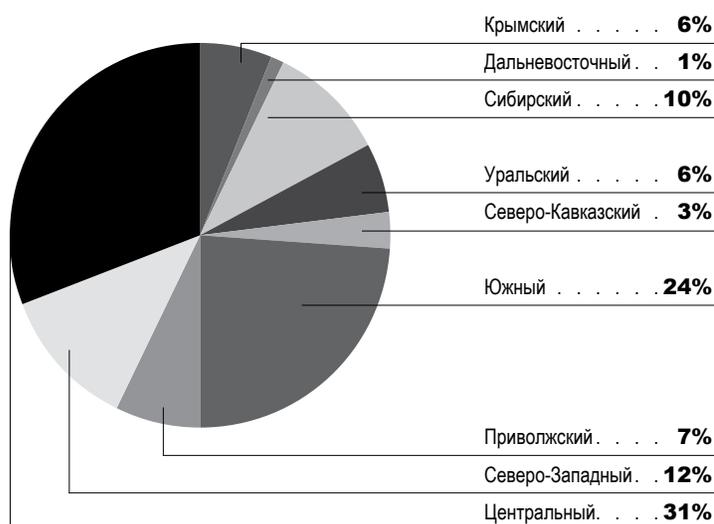
Наконец, не в последнюю очередь, рост спроса на внутренний туризм в России объясняется патриотическим подъемом в обществе и развертыванием информационно-пропагандистских кампаний, направленных на создание положительного имиджа Российской Федерации как привлекательного туристского направления (интернет-проект «Семь чудес России», запуск Национального туристического портала «Russia. Travel» и др.).

Туристский спрос сильно дифференцируется по видам и формам туристской деятельности, а также по субъектам Российской Федерации. Лидерами внутреннего туризма являются два направления купально-пляжного туризма – Краснодарский край и Крым (Краснодарский край, Сочи – также центр горнолыжного туризма) и две российские столицы – Москва и Санкт-Петербург. Однако и другие регионы России активно включились в борьбу за отечественных туристов (рис. 5).

### **ВЪЕЗДНОЙ ТУРИЗМ**

Анализ статистики туризма в Российской Федерации за последние 20 лет свидетельствует о росте въездного потока в страну. С 1995 по 2015 г. он увеличился в 1,6 раза. 2015 г. подтвердил положительную динамику. Согласно данным Росстата, въезд иностранных граждан с туристскими целями вырос на 13,7 % по сравнению с 2014 г. Это лучший результат за последние 10 лет. Однако в абсолютных цифрах иностранных туристов едет в Россию по-прежнему немного (2,9 млн поездок в 2015 г.<sup>1</sup>), особенно в сравнении с выездным потоком (рис. 6).

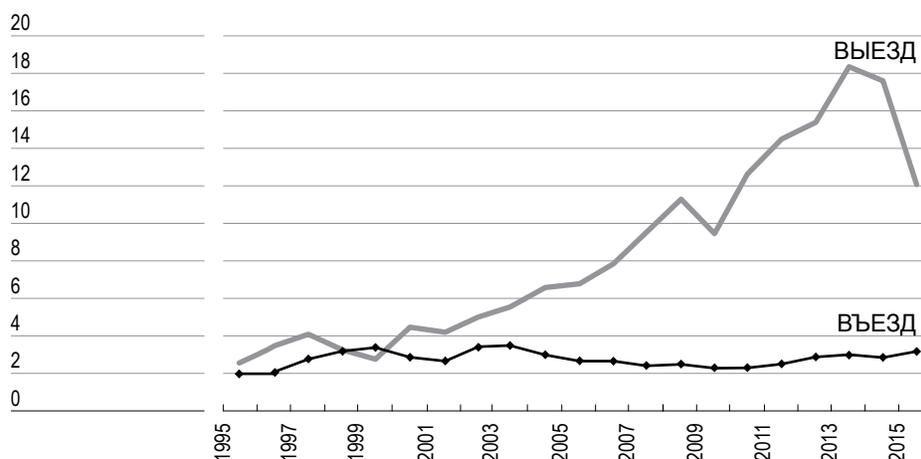
Ситуацию на рынке въездного туризма в Россию определяют две противоречивые группы факторов. С одной стороны, обострение внешнеполитической ситуации и введение санкций со стороны США и ЕС привели к некоторому сокращению въездного потока из стран Запада. С другой стороны,



**Рис. 5. Региональная структура внутреннего туристского потока в России в 2015 г. (по федеральным округам).**  
 Источник: данные региональных органов управления туризмом.

снижение курса рубля по отношению к основным мировым валютам – доллару и евро сделало путешествие по России выгодным. В рейтинге самых недорогих туристских направлений в мире 2017 г., по версии крупнейшего в мире издательства путеводителей «Lonely Planet», наша страна вошла в первую десятку [6]. Кроме того, на росте въездного туризма сказалась активная рекламная кампания, которую Россия проводила за рубежом в последнее время, а также открытие представительств Национального туристического офиса России «Visit Russia» в ряде стран мира.

1 В 2014 г. приказом Росстата была утверждена Официальная статистическая методология оценки числа въездных и выездных туристских поездок. С переходом на нее число въездных туристских поездок увеличилось до 26,9 млн (т. е. в 9,3 раза больше по сравнению со статистическими данными по старой методологии), а выездных – до 34,4 в 2015 г. Новая статистическая методология, основанная на Международных рекомендациях по статистике туризма 2008 г., позволяет полнее учитывать туристские потоки. Вместе с тем возникает проблема сопоставимости данных за предыдущие годы и построения долгосрочных динамических рядов статистических показателей, необходимых для определения трендов развития туризма в стране.



**Рис. 6.** Динамика въезда иностранных граждан в Российскую Федерацию и выезда российских граждан за границу с туристскими целями, млн поездок.

Источник: данные Федеральной службы государственной статистики, 2016.

Традиционно в структуре международных туристских прибытий в Россию доминировали Германия (330–380 тыс. поездок в год) и США (150–200 тыс.), а также страны Западной Европы – Великобритания, Франция, Италия. Однако в последние годы ситуация по большинству европейских стран остается сложной. Значительное снижение объемов туристских потоков в Россию демонстрируют Польша, Нидерланды, Великобритания, Франция и другие страны. Политика определяет выбор туристов.

Статистика въездного туризма за 2015 г. подтверждает еще одну тенденцию, наметившуюся в 2011 г.: активизация новых для России, в основном азиатских, рынков. Эта тенденция связана с общим ростом Азиатско-Тихоокеанского туристского макрорегиона в мире, прежде всего Китая, а также обострением напряженности в отношениях России с Западом и смещением российского политического вектора на Восток. За 20 лет, с 1995 по 2015 г. доля стран Азии во въездном сегменте туристского рынка России увеличилась примерно в 5 раз с 9,3 до 42 % (рис. 7).

Среди стран, откуда в Россию приезжает наибольшее количество туристов, лидирует с большим отрывом Китай (677,6 тыс. прибытий, или примерно каждое четвертое туристское прибытие в 2015 г.) (рис. 8). За последние 8–9 лет объем туристского потока из Китая увеличился более чем в 3 раза. Для дальнейшего привлечения китайских туристов разработаны специальные программы и маршруты, учитывающие их специфику (программа China Friendly, «красные» маршруты и т. д.).

Недавно проведенный опрос позволил дать обобщенный портрет китайского туриста. Это люди старшей возрастной группы 50–75 лет (72 % респондентов). Главный мотив посещения России – проехать дорогами Мао Дзэдуна (54 %); интерес к лениниане и СССР проявили лишь 10 % опрошенных. Они выбирают туры продолжительностью 8 дней / 7 ночей и следуют по маршруту Москва – Суздаль / Великий Новгород – Санкт-Петербург [11].

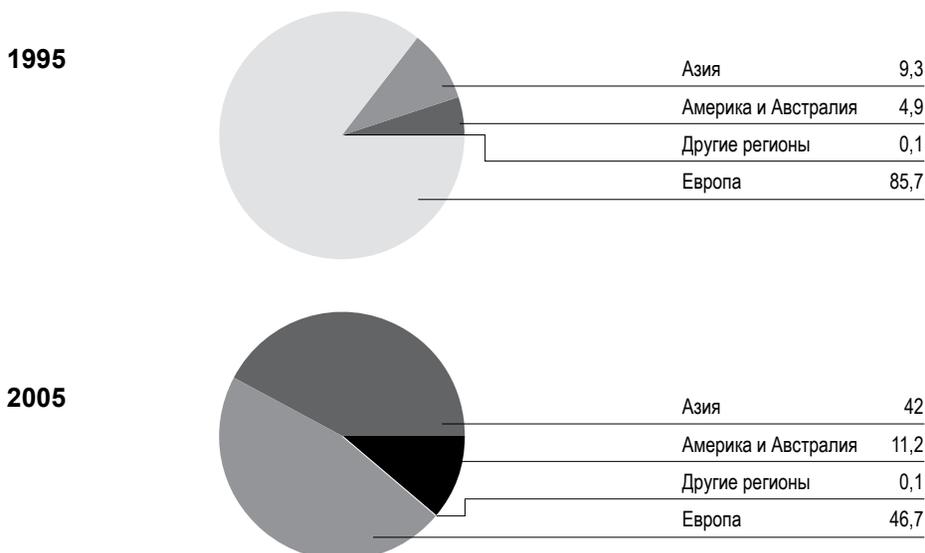
Заметно увеличилось число туристских поездок из других стран Азии: Турции (в 4 раза за последние 10 лет), Республики Корея (в 2 раза), Израиля (в 3 раза). Эта положительная динамика во многом обусловлена установлением безвизового режима.

По итогам 2015 г. пятерка лидеров по темпам прироста туристских прибытий в Россию представлена исключительно азиатскими странами (рис. 9). Самые впечатляющие результаты – у Ирана (+106 %) благодаря летней программе чартерных рейсов из Тегерана в Москву, Сочи и Санкт-Петербург. Таким образом, падение объемов въездного потока из Европы компенсируется подъемом на азиатских направлениях.

Наиболее часто иностранные туристы совершают поездки в Москву и Санкт-Петербург, а также некоторые другие туристские дестинации (города «Золотого кольца», Байкал, Камчатка и др.). Так, объем въездного туристского потока в Москву в 2015 г. оценивался в 4,5 млн [4]. В 2016 г. Санкт-Петербург, Москва и Сочи стали обладателями премии «TripAdvisor Travellers' Choice» в номинации «Лучшие туристические направления – Европа» [1]. Эта премия ежегодно присуждается на основании количества и качества отзывов, а также оценок, которые путешественники сообщества «TripAdvisor» дали отелям, ресторанам и достопримечательностям туристских дестинаций за 12 месяцев, и запросов на бронирование на «TripAdvisor». В 2016 г. Санкт-Петербург улучшил позиции, как в европейском (8 место), так и мировом рейтингах (14 место). Москва и Сочи впервые вошли в европейский список, подтверждая растущую популярность России среди туристов всего мира.

Сегодня на зарубежных туристских рынках предлагаются следующие классические продукты и маршруты по России:

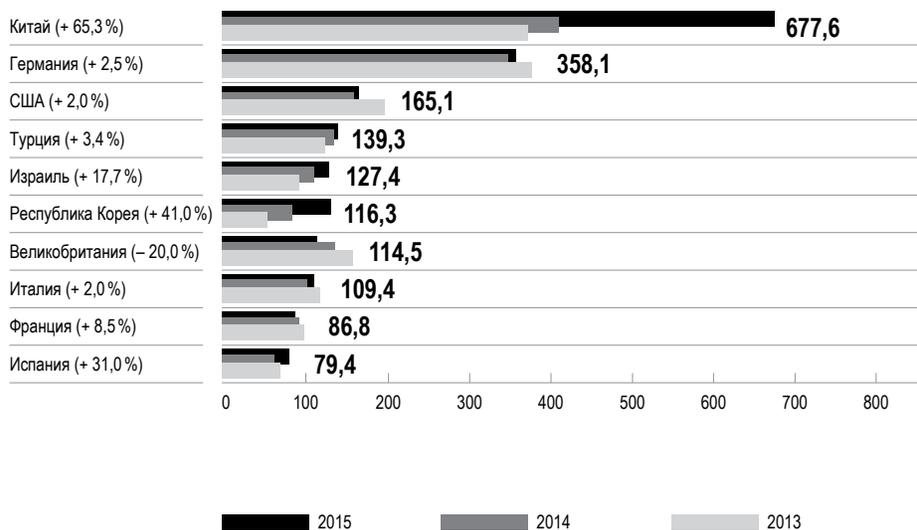
- Москва. Интерес к истории, традициям, объектам наследия СССР. Продолжительность тура – 3–4 дня. Сохраняется высокий спрос;



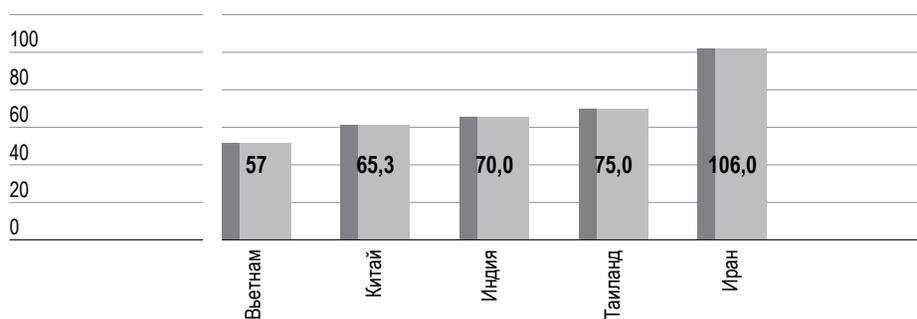
**Рис. 7. Географическая структура въездных туристских потоков в Россию в 1995 и 2015 гг., %.**

Источник: данные Федеральной службы государственной статистики, 2016.

- Золотое кольцо. Историко-культурные автобусные туры продолжительностью 3–6 дней. Обычно предлагаются в комбинации с посещением Москвы;
- Санкт-Петербург. Интерес к истории и традициям, культуре, в частности архитектуре. Продолжительность тура – 3–4 дня. Сохраняется высокий спрос. Востребован маршрут «Две столицы» (Москва – Санкт-Петербург);
- Транссибирский экспресс (Москва-Пекин). Продолжительность тура – 9–14 дней. Сравнительно дорогой турпродукт;
- речные круизы по маршруту Москва – Санкт-Петербург. Продолжительность – 6–8 дней. Интересный, но дорогой турпродукт;
- тур с посещением нескольких городов в регионах России. Продолжительность 3–5 дней. Недостаточно востребован.



**Рис. 8. Страны-лидеры по числу туристских поездок в РФ в 2015 г., тыс. ед. (В скобках указан прирост поездок 2015/2014).**  
Источник: данные Федеральной службы государственной статистики.



**Рис. 9. Страны-лидеры по темпам прироста туристских прибытий в Россию в 2015 г., % к уровню 2014 г.**  
Источник: данные Федеральной службы государственной статистики.

Таблица 1. ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ВЪЕЗДНОГО ТУРИЗМА В РОССИИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Проблемы	Решения
Перенасыщенность Москвы и Санкт-Петербурга	Выход в регионы Российской Федерации
Только один перезагруженный маршрут	Создание новых брендовых маршрутов
Недостаток объектов современной инфраструктуры в регионах	Постепенное создание инфраструктуры. Развитие государственно-частного партнерства и финансовых основ для привлечения инвестиций в сферу туризма
Непонимание конъюнктуры рынка	Сертификация China Friendly / Halal Friendly
Авиасообщение в основном с Москвой и Санкт-Петербургом	Прямые перелеты в крупные аэропорты Российской Федерации
Острая нехватка кадров	Подготовка кадров на местах
Разрозненность действий	Консолидация Центр-регионы, регионы-регионы; развитие международного и межрегионального сотрудничества в сфере туризма
Недостаточная государственная поддержка развития сферы туризма	Либерализация визового пространства России (введение электронных и многократных виз, установление 72-часового безвизового пребывания для пассажиров речных круизов и др.)
	Проведение широкомасштабной рекламно-имиджевой кампании по продвижению национального турпродукта, расширение сети офисов по туризму за рубежом
	Совершенствование правоприменительной практики (учет турпродукта, ужесточение юридической ответственности туроператоров, совершенствование системы классификации объектов туристической индустрии и стандартизации туруслуг, развитие стандартов страхования в сфере туризма, повышение мер безопасности и др.)

Источник [7].

В качестве нового продукта предлагается тур «Москва–Санкт-Петербург+++» с выездом из столиц в регионы: Москва–Сергиев-Посад – Санкт-Петербург – Павловск – Пушкин.

Дальнейшее развитие въездного туризма наталкивается на ряд проблем. По мнению экспертов, если не оптимизировать соотношение цены и качества турпродукта, не расширить его ассортимент и не создать предложение в объеме, необходимом для удовлетворения спроса, кризисный сценарий в среднесрочной перспективе оказывается неизбежным [3]. Кроме того, в профессиональных кругах уже давно обсуждается вопрос о необходимости либерализации визового режима, от которого зависит туристская привлекательность Российской Федерации. По экспертным оценкам, любое упрощение ви-

зовых формальностей увеличивает турпоток на конкретном направлении как минимум на 20–30 % [8]. Сдерживающие факторы развития въездного туризма и пути их преодоления показаны в таблице 1.

Таким образом, современный экономический кризис привел к «тектоническому сдвигу» в российском туризме. Он изменил парадигму отрасли и определил перспективы ее процветания в развитии внутреннего и въездного туризма. Вместе с тем для цивилизованного общества важен и выездной туризм. Все три вида туризма образуют целое, устойчивость которого всецело зависит от их гармоничного развития.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 25 лучших туристических направлений – Европа – URL: <https://www.tripadvisor.ru/TravelersChoice-Destinations-cTop-g4> (Проверено 19.01.2017).
2. Аверьянова А. Как туроператоры переживают кризис и на что делают ставку? URL: [http://www.beboss.ru/journal/franchise/articles/2829-tourism\\_in\\_russia\\_2016\\_statistics](http://www.beboss.ru/journal/franchise/articles/2829-tourism_in_russia_2016_statistics) (Проверено 16.01.2017).
3. В России вероятен кризис въездного туризма, но его можно предотвратить: Интервью С. Шпилько // RATANews: Ежедневная электронная газета Российского союза туриндустрии. № 4226 от 16.01.2017. URL: [http://www.ratanews.travel/news/news\\_16012017\\_4.stm](http://www.ratanews.travel/news/news_16012017_4.stm) (Проверено 19.01.2017).
4. Кислова Ю., Казунина А. Методика оценки туристских потоков на территорию города Москвы // Логистика. 2016. № 12. С. 18–29.
5. Лишь 28% россиян имеют загранпаспорта // RATANews: Ежедневная электронная газета Российского союза туриндустрии. № 4045 от 27.04.2016. URL: [http://www.ratanews.travel/news/news\\_27042016\\_9.stm](http://www.ratanews.travel/news/news_27042016_9.stm) (Проверено 17.01.2017).
6. Лучшие места для недорогих путешествий в 2017 году. URL: <http://www.lonelyplanet.ru/articles/luchshie-nedorogie-puteshestviya-v-2017-godu/> (Проверено 17.01.2017).
7. Мармер Л. Развитие въездного туризма в России: презентация доклада на VI Междунар. туристич. форуме «Visit Russia», 24 окт. 2016 г., Ярославль.
8. О развитии туризма в Российской Федерации: Доклад / Государственный Совет Российской Федерации. 2015. С. 24. URL: [http://www.c-inform.info/userdata/files/доклад\\_О\\_развитии\\_туризма\\_в\\_РФ.pdf](http://www.c-inform.info/userdata/files/доклад_О_развитии_туризма_в_РФ.pdf) (Проверено 19.01.2017).
9. Отдых за рубежом респонденты оценивают значительно выше, чем в России // RATANews: Ежедневная электронная газета Российского союза туриндустрии. 2016. № 4062. URL: [http://www.ratanews.travel/news/news\\_25052016\\_3.stm](http://www.ratanews.travel/news/news_25052016_3.stm) (Проверено 11.01.2017).
10. Тенденция роста внутреннего турпотока в России в 2016 году сохранится // Официальный сайт Федерального агентства по туризму. Новости от 18.05.2016. URL: <http://www.russiatourism.ru/news/10571/> (Проверено 16.01.2017).
11. Шаров В.Ю. Межрегиональный туристский проект «Красный маршрут»: презентация на VIII Гайдаровском форуме «Россия и мир: выбор приоритетов». Экспертная дискуссия «Туризм. Экономика. Образование». 14 января 2017 г., Москва.

## REFERENCES

1. 25 luchshih turistichestkih napravlenij (1. 25 Top Travelers' Choice Destinations). Evropa – URL: <https://www.tripadvisor.ru/TravelersChoice-Destinations-cTop-g4> (Provereno 19.01.2017).
2. Aver'janova A. Kak turoperatory perezhivajut krizis i na chto delajut stavku? (How do tour operators survive the crisis and what do they bet on?). URL: [http://www.beboss.ru/journal/franchise/articles/28\\_29-tourism\\_in\\_russia\\_2016\\_statistics](http://www.beboss.ru/journal/franchise/articles/28_29-tourism_in_russia_2016_statistics) (Provereno 16.01. 2017).
3. V Rossii verojaten krizis v'ezdno go turizma, no ego mozžno predotvratit': Interv'ju S. Shpil'ko (A crisis of inbound tourism is likely to start in Russia but it can be prevented: S. Shpilko Interview) // RATANews: Ezhednevna ja jelektronna ja gazeta Rossijskogo sojuza turindustrii. № 4226 ot 16.01.2017. URL: [http://www.ratanews.travel/news/news\\_16012017\\_4.stm](http://www.ratanews.travel/news/news_16012017_4.stm) (Provereno 19.01.2017).
4. Kislova Ju., Kazunina A. Metodika ocenki turistskih potokov na territoriju goroda Moskvy (Methodology for assessing tourist flows to the city of Moscow) // Logistika. 2016. № 12. S. 18–29.
5. Lish' 28% rossijan imejut zagranpasporta (Only 28% of Russians have foreign passports) // RATANews: Ezhednevna ja jelektronna ja gazeta Rossijskogo sojuza turindustrii. № 4045 ot 27.04.2016. URL: [http://www.ratanews.travel/news/news\\_27042016\\_9.stm](http://www.ratanews.travel/news/news_27042016_9.stm) (Provereno 17.01.2017).
6. Luchshie mesta dlja nedorogih puteshestvij v 2017 godu. (Best places for cheap travel in 2017). URL: <http://www.lonelyplanet.ru/articles/luchshie-nedorogie-puteshestviya-v-2017-godu/> (Provereno 17.01.2017).
7. Marmer L. Razvitie v'ezdno go turizma v Rossii (Development of inbound tourism in Russia): prezentacija doklada na VI Mezhdunar. turistich. forume «Visit Russia», 24 okt. 2016 g., Jaroslavl'
8. O razvitii turizma v Rossijskoj Federacii (About the development of tourism in the Russian Federation): Doklad / Gosudarstvennyj Sovet Rossijskoj Federacii. 2015. S. 24. URL: [http://www.c-inform.info/userdata/files/doklad\\_O\\_razvitii\\_turizma\\_v\\_RF.pdf](http://www.c-inform.info/userdata/files/doklad_O_razvitii_turizma_v_RF.pdf) (Provereno 19.01.2017).
9. Otdyh za rubezhom respondenty ocenivajut znachitel'no vyshe, chem v Rossii (Respondents rate holidays abroad much higher than holidays in Russia) // RATANews: Ezhednevna ja jelektronna ja gazeta Rossijsko-go sojuza turindustrii. 2016. № 4062 – URL: [http://www.ratanews.travel/news/news\\_25052016\\_3.stm](http://www.ratanews.travel/news/news_25052016_3.stm) (Provereno 11. 01.2017).
10. Tendencija rosta vnutrennego turpotoka v Rossii v 2016 godu sohranitsja (The growth of domestic tourism flow in Russia will continue in 2016) // Oficial'nyj sajt Federal'nogo agentstva po turizmu. Novosti ot 18.05.2016. URL: <http://www.russiatourism.ru/news/10571/> (Provereno 16.01.2017).
11. Sharov V.Ju. Mezhregional'nyj turistskij proekt «Krasnyj marshrut» ("Red Route" interregional tourist project): prezentacija na VIII Gajdarovskom forume «Rossija i mir: vybor prioriteto v». Jekspertna ja diskussija «Turizm. Jekonomika. Obrazovanie». 14 janvarja 2017 g., Moskva.

УДК556.  
3:519.87(470.63)

**Блужина А. С. [Bluzhina A. S.]**  
**Бегдай И. В. [Begday I. V.]**

## **ОСОБЕННОСТИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ВОДОСБОРЕ РЕКИ КАЛАУС ТЕРРИТОРИИ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ**

**Features of geochemical processes  
in the catchment area of the river Kalaus  
in the Stavropol territory**

В статье на основании рассчитанных геохимических коэффициентов проанализировано распределение тяжелых металлов в системе «растение – почва – природная вода – донные отложения» агроландшафтов бассейна реки Калаус на территории Ставропольского края. На основании геохимических коэффициентов составлена биогеохимическая формула по Добровольскому В.Г. для ландшафтно-геохимической катены участка протекания р. Калаус. При изучении миграционных особенностей химических элементов в долинных участках реки применен факторный анализ. Для подтверждения связи между содержанием металлов в донных отложениях относительно почвы пшеничного поля нами составлены матрицы корреляционной зависимости для изученных ландшафтно-геохимических катен. В результате матричного анализа выявлена характерная картина поведения элементов во взаимосвязи миграционных путей. Идентичные отрицательные значения корреляционных коэффициентов в системе «почва-донные отложения» имеют Cu, Zn, Mn. Отмечается сильная взаимосвязь по меди, средняя по цинку, а по кадмию средняя статистически важная, умеренная по свинцу и кобальту.

The article, based on the calculated coefficients of geochemical analyzes the distribution of heavy metals in system «plant – soil – natural water – bottom sediments» agro-landscapes Kalaus river in the Stavropol Territory. On the basis of geochemical biogeochemical factors made up the formula for Dobrovolsky V.G. for landscape-geochemical catena section flowing river Kalaus. In the study of migration features of chemical elements in the lowland areas of the river used factor analysis. To confirm the connection between the metal content in sediments relative to the soil wheat fields we compiled correlation matrices for the studied landscape geochemical catenas. As a result of the analysis of the matrix revealed a characteristic pattern of behavior of elements in the migratory routes of the relationship. Identical negative correlation coefficients in the system «soil-sediments» have Cu, Zn, Mn. There is a strong relationship for Cu, the average of Zn and Cd on average statistically significant, moderate on Pb and Co.

**Ключевые слова:** почва, река, донные отложения, коэффициент водной миграции, коэффициент биологического поглощения, биогеохимическая формула, коэффициент донной аккумуляции, катена, корреляционная зависимость, факторный анализ, геохимические миграционные потоки.

**Key words:** soil, river, sediments, water migration rate, the rate of biological absorption, biogeochemical formula bottom accumulation factor, catena, correlation, factor analysis, geochemical migration flows.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Гидрографической особенностью Ставропольского края является то, что его предгорная часть имеет густую сеть рек, на равнине их количество и водоносность резко сокращаются и северо-восточная часть края

фактически лишена речного стока. Помимо особенной речной системы, Ставропольский край особенен еще и тем, что относится к регионам с аграрной направленностью и на протяжении многих лет сельское хозяйство является главной отраслью экономики края. В растениеводстве основной зерновой культурой является озимая пшеница. Если обратиться к пространственному расположению сельскохозяйственных полей, то в некоторых случаях можно наблюдать следующую картину: расположение поля в плакорной части и протекание реки в нижней части склона в границах водосборной площади. Содержание химических элементов в природных водах и интенсивность их миграции зависят от различных условий на водосборных площадях. К такому наряду с физико-географическими условиями необходимо отнести антропогенную и техногенную факторы.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Вопросы изучения региональных особенностей миграционных процессов вызвали особый интерес как у исследователей XX века, так и у исследователей современности. Так, среди современных исследователей региональных особенностей известны следующие имена: С.Ф. Спицина, Т.Н. Ткаченко, В.Г. Бахарев [11] изучают особенности водной миграции микроэлементов. В ходе своих исследований они установили, что медь, марганец, цинк, кобальт, молибден и бор являются постоянными компонентами природных вод Алтайского края, а миграционная способность в значительной степени зависит от их содержания в почвообразующих породах, а также от климатических условий. Закономерности геохимической миграции отдельных элементов являются объектом изучения Н.С. Четвериковой, Л.В. Марциневской [13]. Ими проведены исследования особенностей распределения свинца в пахотном слое почв, а также с увеличением глубины в условиях агроландшафтов лесостепной зоны ЦЧО. В рамках исследований ими произведена агроэкологическая оценка содержания свинца в почвах, а также в сельскохозяйственных культурах, рассчитан коэффициент биологического поглощения растениями озимой пшеницы, проанализированы закономерности количественного содержания свинца, на основании которых учеными выявлена закономерность: уменьшение содержания свинца с увеличением глубины, по отношению к пахотному слою почвы.

Особенностями сезонной миграции микроэлементов в триаде таких компонентов ландшафта, как «почва-растение-животное» в степных ландшафтах Челябинской области занимаются М.А. Дерхо, М.В. Елисеенкова [4]. Н.М. Троц, С.В. Обущенко, В.Б. Троц, изучая особенности поступления тяжелых металлов в озимые зерновые культуры на территории Самарского Заволжья [12], приходят к выводу о различиях накопления и характера локализации кадмия, свинца, цинка, меди, кобальта и марганца в фитомассе озимых культур, в различных почвенно-климатических условиях. Геохимические

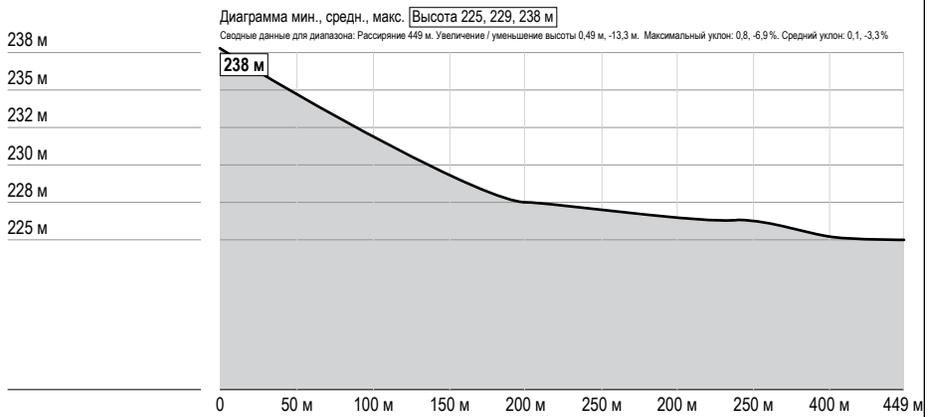


Рис. 1.

Катена № 1 и профиль высот местности при впадении р. Большой Янкуль в р. Калаус № 1.

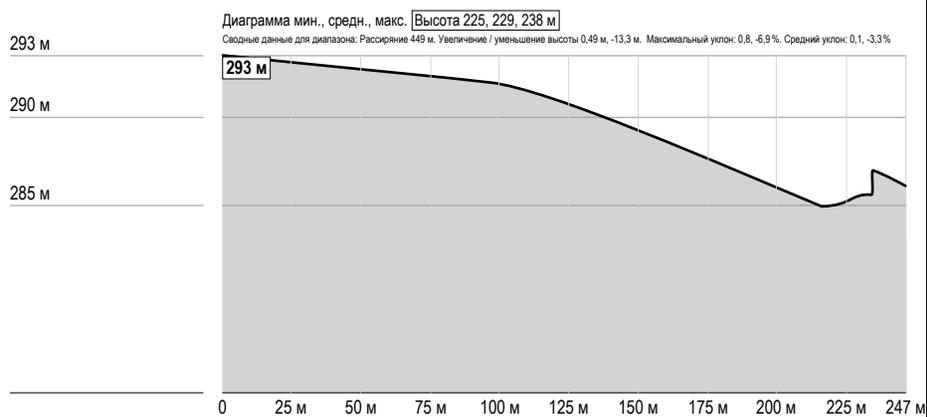


Рис. 1.

**Катена № 2 и профиль высот местности бассейна  
р. Калаус.**

особенности распределения марганца и хрома в агроландшафтах Ростовской области, проанализированы О.Н. Заболотной. Вопросами геохимических особенностей миграции тяжелых металлов в агроландшафтах занимаются и зарубежные ученые. Китайские исследователи Чанчунь Хуан, Хао Ян, Юнмай Ли Джун Цзоу и др. [17] отмечают сильнейшее воздействие сельского хозяйства на почвенный покров. Дж. М. Цзоу, В. Дай и др. [17] проведены исследования по анализу пространственных изменений и источников тяжелых металлов в почвах сельхозугодий пригородов Пекина. О взаимосвязи содержания микроэлементов в системе «почва-растение» говорится в исследованиях С. Чжан, Т. Зонд, Л. Лю и др. [17]. Французские исследователи К. Фрич, М. Кёердазир, П. Жироду и др. [16] занимаются вопросами пространственно-временных особенностей переноса металлов в биоту ландшафта. Изучение тяжелых металлов в грунтах [18] на территории Польши связано с именами А. Гробелак и А. Напоры.

Основываясь на описанных выше исследованиях, можно сделать вывод о необходимости исследования и выявления особенностей миграционных процессов в бассейновой части р. Калаус, отличительной чертой которой является перепад высот между участками исследований (рис. 1–2).

Как видно из рисунка 1, расстояние между точками отбора проб в профиле составляет 449 м, разница высот между верхней и нижней точкой составляет 11 м, средний уклон территории 3,3 %, точки отбора проб воды и донных отложений выбраны в месте впадения р. Большой Янкуль в р. Калаус.

Рисунок 2 демонстрирует катену № 2 и профиль высот местности, расстояние между точками отбора проб составляет 449 м, разница высот между верхней и нижней точкой составляет 7 м, средний уклон территории 4%, точки отбора проб воды и донных отложений выбраны на р. Калаус.

## МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения закономерностей геохимической миграции элементов закладываются реперные участки исследования, представляющие собой ландшафтно-геохимические катены с автономной элементарной ландшафтно-геохимической системой (ЭЛГС) – пшеничное поле и подчиненной ландшафтно-геохимической системой – речные воды и донные отложения. Пробы почвы, растений пшеницы, воды и донных отложений отбираются в соответствии с рекомендациями, отраженными в Федеральном законе № 102-ФЗ от 26.06.2008 «Об обеспечении единства измерений». Анализ отобранных проб проводится в аттестованной научно-учебной лаборатории «Экоаналитическая лаборатория» СКФУ. Содержание тяжелых металлов определяется методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии на атомно-абсорбционном спектрометре с атомизацией в пламени iCE 3300 (Thermo Scientific, США) после озоления проб почвы, донных отложений и сухо-воздушной смеси растений пшеницы азотной кислотой. В работе мы оперируем средними значе-

ниями тяжелых металлов, установленными при лабораторных анализах. Достоверность полученных сведений подтверждается значением рассчитанного среднеквадратичного отклонения (СКО).

Для подтверждения связи между содержанием металлов в донных отложениях относительно почвы пшеничного поля нами составлены матриксы корреляционной зависимости для изученных ландшафтно-геохимических катен. Матриксы корреляционной зависимости представляют собой ее графическое изображение на основе факторного анализа и необходимы для создания модели взаимного влияния факторов в виде значений концентраций веществ в почве и донных отложениях в условиях ландшафтно-геохимических катен на участках равнинных территорий р. Калаус. На корреляционный многофакторный анализ в своих исследованиях опирались П.М. Мазуркин, О.Ю. Евдокимова, Ю.В. Сивоконь, И.В. Бегдай, Е.В. Бондарь, Н.Е. Перекопской [3].

Взаимосвязь элементов в катенах подтверждается именно матриксами корреляционной зависимости, помимо этого, одним из важнейших показателей является особенность распространения каждого элемента в катене от начальной элементраной ландшафтной геохимической системы к конечной элементарной ландшафтной геохимической системе. Такой показатель носит название коэффициент латеральной дифференциации или коэффициент местной миграции. Для всех катен в условиях протекания реки рассчитан и представлен графически местный коэффициент миграции.

Для определения степени вовлечения элементов в геохимические миграционные процессы рассчитан коэффициент водной миграции ( $K_w$ ) и биологического поглощения. На основании геохимических коэффициентов составлена биогеохимическая формула по В.В. Добровольскому. Биогеохимическая формула имеет вид неправильной дроби. На месте целого числа указывается типоморфный элемент, в скобках после него – растворенный в воде газ. В числителе приводятся индикаторные рассеянные элементы, у которых коэффициент биологического поглощения больше коэффициента водной миграции, в знаменателе – элементы с обратными соотношениями  $K_b$  и  $K_w$  [5]. Таким образом, выделяются две основные для данного ландшафта группы индикаторных элементов, способствующие геохимическому сопряжению: первая – наиболее интенсивно вовлекаемые в биологический круговорот, вторая – в водную миграцию.

### ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В автономной ЭЛГС катены № 1 и №2 бассейна р. Калаус, согласно карте почвообразующих пород, составленной М.Т. Куприченковым, Т.М. Антоновой [8] и др., на основании материалов Л.Г. Балаева и П.В. Царева [2], также, как и в условиях протекания р. Большой Егорлык, на аллювиальных песчано-галечниковых образованиях залегают глины и тяжелые суглинки с характерной красно-бурой или темно-коричневой окраской. Таким

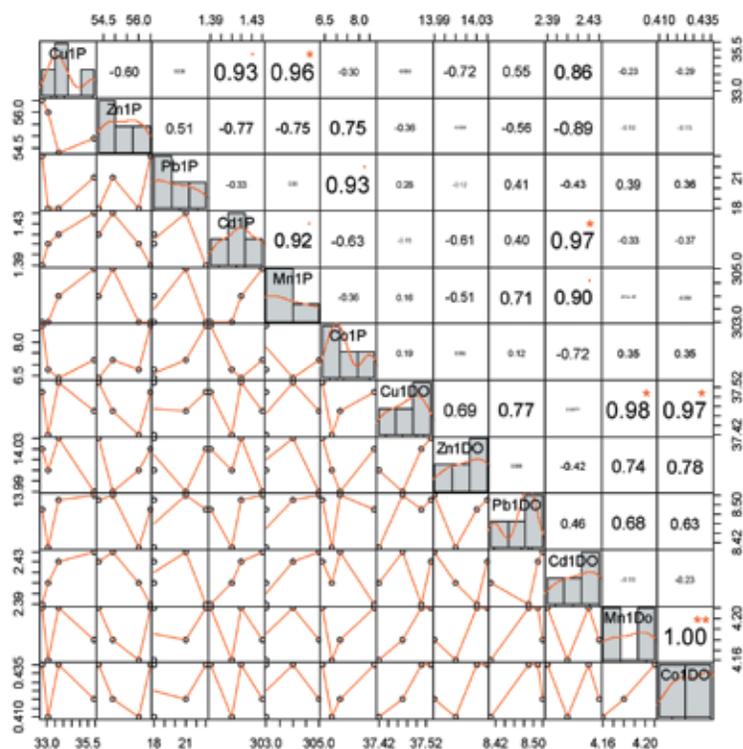
образом, почвообразующими породами являются карбонатные пылеватые суглинки (лессовидные). Химический состав лессовидных суглинков в бассейне р. Калаус имеет тот же состав, что и в условиях протекания р. Большой Егорлык.

В условиях платообразного рельефа автономной ЭЛГС катены № 1 (Сергиевское-Светлоград) сформировались черноземы обыкновенные и черноземы южные (Атлас Ставропольского края, 1968) [8] или, как их еще называют, южные и обыкновенные (мицелярно-карбонатные) малогумусные черноземы [1]. В условиях катены № 2 (Светлоград-Ипатово) сформировались темнокаштановые и каштановые солонцеватые почвы (Атлас Ставропольского края, 1968) [8]. Общее падение местности здесь идет в северном и северо-восточном направлениях, и равнинный рельеф нарушается довольно глубокой долиной Калауса. В подобных условиях в нижних частях склонов почвообразующие породы засолены, что и явилось одной из причин развития засоленных почв. В условиях функционирования автономных ЭЛГС бассейна р. Калаус сформировался естественный непромывной тип водного режима. Благодаря климатическим особенностям распространенные здесь каштановые почвы выщелачиваются лишь в очень слабой степени и из них вымываются только легкорастворимые соли, при этом, каштановые почвы обычно карбонатны [1].

Однако наряду с карбонатными встречаются некарбонатные. Исследование качественного состава перегной каштановых почв, проведенное А.Я. Антыковым и А.Я. Стоморевым, показывает, что в нем преобладают кислоты в соединении с кальцием. Для этих почв характерно преобладание в составе гумуса гуминовых кислот над фульвокислотами. Солонцеватые разности отличаются от несолонцеватых большей подвижностью гуминовых.

Особый интерес вызывает взаимосвязь изученных компонентов в биогеохимической структуре автономной и подчиненной ЭЛГС. Именно корреляционный анализ определяет биогеохимическую структуру как состояние ландшафта, возникающее в результате многовариантного и неоднозначного поведения взаимосвязей различных компонентов [14]. Для определения взаимосвязи между изученными компонентами в почве и донных отложениях представляется возможным рассчитать корреляционную зависимость концентрации элементов в подчиненной и автономной ЭЛГС.

Для подтверждения связи между содержанием металлов в донных отложениях относительно почвы пшеничного поля нами составлены матрицы корреляционной зависимости для изученных ландшафтно-геохимических катен. Звездочкой в каждом матриксе отмечены значения коэффициентов корреляции, которые имеют статистическую уверенность более 95% и именно эти связи имеют наибольшую статистическую значимость, двумя звездочками отмечены значения коэффициентов корреляции, которые имеют статистическую уверенность более 99%, это связи также имеют наибольшую

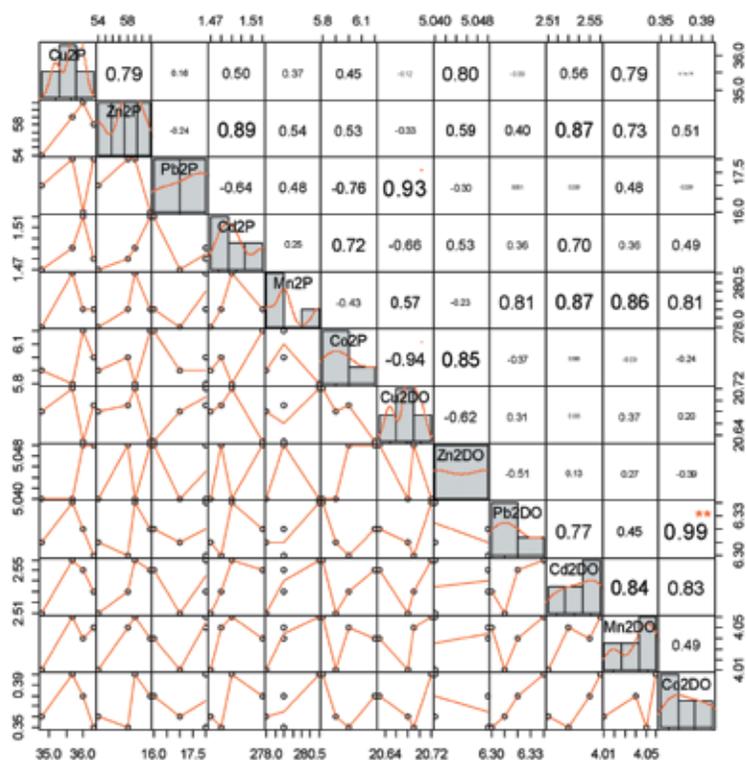


**Рис. 2.** Матрикс корреляционной зависимости содержания тяжелых металлов в донных отложениях от содержания в почве плакора в катене № 1 р. Калаус.

статистическую значимость, однако такие значения встречаются очень редко. Значения коэффициентов корреляции без звездочек демонстрируют наличие связи, но без статистической значимости или наименьшую статистическую значимость.

На рисунке 2 изображен матрикс, характеризующий коэффициент корреляции содержания металлов в донных отложениях относительно почвы на поле пшеницы, рассчитанный поэлементно в пределах ландшафтно-геохимической катены № 1 в бассейне р. Калаус.

На рис. 3 изображен матрикс, характеризующий коэффициент корреляции содержания металлов в донных отложениях относительно почвы на поле

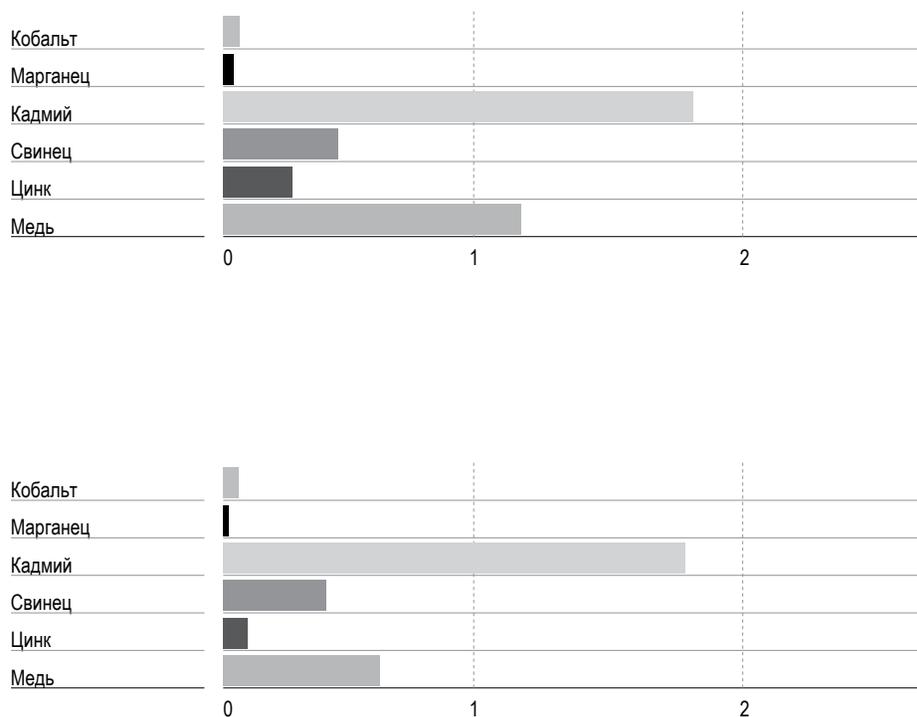


**Рис. 3.** Матрикс корреляционной зависимости содержания тяжелых металлов в донных отложениях от их содержания в почве плакора в катене № 2 р. Калаус.

пшеницы, рассчитанный поэлементно в пределах ландшафтно-геохимической катены № 2 в бассейне р. Калаус

В результате матричного анализа (рис. 2, 3) катен № 1 и № 2 выявлена характерная картина поведения элементов во взаимосвязи миграционных путей. Идентичные отрицательные значения корреляционных коэффициентов в системе «почва – донные отложения» имеют Cu, Zn, Mn. Отмечается сильная взаимосвязь по меди, средняя по цинку, а по кадмию средняя статистически важная, умеренная по свинцу и кобальту.

На рис. 4 изображена диаграмма, характеризующая латерально-миграционную дифференциацию катены № 1 в бассейне р. Калаус.



**Рис. 4.** Ландшафтно-миграционная дифференциация катены № 1 и № 2 в бассейне р. Калаус.

Катена № 1 в бассейне р. Калаус характеризуется как: аккумулятивная по кадмию, монотонная по меди и транзитная по цинку, свинцу, марганцу и кобальту. Катена № 2 в бассейне р. Калаус характеризуется концентрацией кадмия в донных отложениях, монотонного распределения элементов не наблюдается, катена транзитна по меди, цинку, свинцу, марганцу и кобальту.

Числовые значения геохимических коэффициентов для исследуемых участков, и выведенная на их основе биогеохимическая формула представлены в табл. 1.

Биогеохимическая формула участка исследования № 1 свидетельствует о том, что участие кадмия и марганца в биологическом круговороте, значительно превалирует над процессами водной миграции, в которых участвуют медь, цинк, свинец и кобальт. Биогеохимическая сопряженность элементов

Таблица 1. ЗНАЧЕНИЯ ЛАНДШАФТНО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ НА УЧАСТКЕ ПРОТЕКАНИЯ Р. КАЛАУС

	КАТЕНА № 1						КАТЕНА № 2					
	Cu	Zn	Pb	Cd	Mn	Co	Cu	Zn	Pb	Cd	Mn	Co
К в.м.	0,71	0,68	0,2	0,045	0,00003	2,00	0,77	0,71	0,034	0,045	0,00001	0,007
К б.п.	0,11	0,34	0,01	0,23	0,029	0,01	0,10	0,39	0,013	0,38	0,03	0,01
БГ формула	* $Ca^{2+} (CO_2) \frac{Cd, Mn}{Cu, Zn, Pb, Co}$						* $Ca^{2+} (CO_2) \frac{Cd, Mn}{Cu, Zn, Pb, Co}$					

Таблица 2. КОЭФФИЦИЕНТ ДОННОЙ АККУМУЛЯЦИИ НА УЧАСТКАХ ИССЛЕДОВАНИЯ № 1 И № 2 В БАССЕЙНЕ Р. КАЛАУС

Участок исследования	Кoeffициент донной аккумуляции					
	Кс (Cu)	Кс (Zn)	Кс (Pb)	Кс (Cd)	Кс (Mn)	Кс (Co)
№ 1	3,05	1,15	1,45	1	1,23	0,92
№ 2	2,01	3,08	1,94	1	1,18	0,95

на участке исследования № 2, согласно биогеохимической формуле, выглядит так: кадмий и марганец характеризуются преобладающей доступностью для биологического круговорота, в процессах водной миграции участвуют медь, цинк, свинец и кобальт.

О дальнейшем распределении тяжелых металлов в бассейне р. Калаус свидетельствует коэффициент донной аккумуляции химических элементов в донных отложениях реперных участков исследования (табл. 2).

Из таблицы видно, что на участках № 1 и № 2 бассейна р. Калаус за счет процессов выщелачивания, наблюдается подвижность свинца и его участие в процессе водной миграции. Подвижность меди и участие ее в процессах водной миграции в аллювиальных элементарных ландшафтах реперных участков бассейна р. Калаус обусловлена хелато- или комплексобразованием.

## ВЫВОДЫ

На основании результатов анализа распределения металлов в донных отложениях, а также биогеохимических формул реперных участков № 1 и № 2 бассейна р. Калаус становится ясно, что в условиях участка № 1, Cd активно захватывается растениями пшеницы, Mn также участвует в процессах биологического поглощения, однако его присутствие и накопление наблюдается и в донных отложениях этого участка. В донных отложениях аккумулируются Cu, Zn и Pb. Co наиболее активно участвует в процессах водной миграции в условиях участка №1. На участке № 2 Co участвует как в поглощении растениями пшеницы, так и в накоплении донным грунтом.

Полученные данные могут учитываться при проведении мониторинга миграционных процессов и создании единой информационной базы, которая позволит в дальнейшем совершенствовать систему управления качеством водных и земельных ресурсов, кроме того полученные сведения могут быть учтены при агромелиорации и составлении плана посевных мероприятий.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антыков А.Я., Стоморев А.Я. Почвы Ставрополя и их плодородие. Ставропольское книжное изд-во, 1970. 415 с.
2. Балаев Л.Г., Царев П.В. Лессовые породы Центрального и Восточного Предкавказья. М.: Наука, 1964. 248 с.
3. Бегдай И.В., Бондарь Е.В., Перекопская Н.Е. Исследование загрязнения родников города Ставрополя методом факторного анализа // Наука. Инновации. Технологии. Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета, 2016. Вып. 2. С. 77–89.
4. Дерхо М.А., Елисеенкова М.В. особенности сезонной миграции микроэлементов в триаде «почва-растение-животный организм» в степном ландшафте заповедника «Аркаим» // Аграрный вестник Урала. 2009. № 9 (63). С. 67–69.
5. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. Учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 400 с.
6. Исаченко А.Г. Экологическая география России. СПб.: Издательский дом СПбГУ, 2001. 328 с.
7. Кондратьева Л.М. Вторичное загрязнение водных экосистем // Вод. ресурсы, 2000. Т. 27. № 2. С. 221–231.
8. Купреинсков М.Т., Антонова Т.Н., Симбирев Н.Ф., Цыганков А.С. Земельные ресурсы Ставрополя и их плодородие. Ставрополь, 2002. 320 с.
9. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель, 2000. 610 с.

10. Румянцев А.Н. Химические аспекты вторичного загрязнения водных экосистем // Труды Псковского политехнического института. 2008. № 11. С. 114–117.
11. Спицына С.Ф., Ткаченко Т.Н., Бахарев В.Г. Коэффициенты водной миграции микроэлементов: меди, цинка, марганца, кобальта, бора и молибдена в Алтайском крае // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2007. № 11 (37). С. 35–38.
12. Троц Н.М., Троц В.Б., Обущенко С.В. Аккумуляция тяжелых металлов зерновыми бобовыми культурами в агроландшафтах Самарского Заволжья // Достижения науки и техники АПК. 2012. № 2. С. 50–51.
13. Четверикова Н.С., Марциневская Л.В. Кадмий в агроландшафтах лесостепной зоны ЦЧО // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 7. С. 69–70.
14. Шальнев В.А. Общая география и учение о геверсуме. Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2015.
15. Li XY, Liu LJ, Wang YG, Luo GP, Chen X, et al. (2012) Integrated Assessment of Heavy Metal Contamination in Sediments from a Coastal Industrial Basin, NE China. PLOS ONE 6: e39690. doi:10.1371/journal.pone.0039690. pmid:22768107.
16. Fritsch C, Cœurassier M, Giraudoux P, Raoul F, Douay F, Rieffel D, et al. (2011) Spatially Explicit Analysis of Metal Transfer to Biota: Influence of Soil Contamination and Landscape. PLoS ONE 6(5): e20682. doi:10.1371/journal.pone.0020682.
17. Huang C, Yang H, Li Y, Zou J, Zhang Y, Chen X, et al. (2015) Investigating Changes in Land Use Cover and Associated Environmental Parameters in Taihu Lake in Recent Decades Using Remote Sensing and Geochemistry. PLoS ONE 10(4): e0120319. doi:10.1371/journal.pone.0120319.
18. Grobelak A, Napora A (2015) The Chemophytostabilisation Process of Heavy Metal Polluted Soil. PLoS ONE 10(6): e0129538. doi:10.1371/journal.pone.0129538.

## REFERENCES

1. Antykov A.YA., Stomorev A.YA. Pochvy Stavropol'ya i ikh plodородие. Stavropol'skoe knizhnoe izd-vo, 1970, 415 s.
2. Balaev L.G., TSarev P.V. Lessovye porody TSentral'nogo i Vostochnogo Predkavkaz'ya. M.: Nauka, 1964-248 s.
3. Begdaj I.V., Bondar' E.V., Perekopskaya N.E. Issledovanie zagryazneniya rodnikov goroda Stavropol'ya metodom faktornogo analiza // Nauka. Innovatsii. Tekhnologii Nauchnyj zhurnal Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta, 2016. vyp. №2. S. 77-89.
4. Derkho M.A., Eliseenkova M.V. osobennosti sezonnoj migratsii mikroelementov v triade «pochva-rastenie-zhivotnyj organizm» v stepnom landshafte zapovelnika «Arkaim» // agrarnyj vestnik Urala. 2009. №9 (63). S.67–69.

5. Dobrovolskij V.V. Osnovy biogeokhimii. Uchebnik dlya stud. vyssh. ucheb. zavedenij M.: Izdatel'skij tsentr «Akademiya», 2003. 400 s.
6. Isachenko A.G. EHkologicheskaya geografiya Rossii. SPb.: Izdatel'skij dom SPbGU, 2001. 328 s.
7. Kondrat'eva L.M. Vtorichnoe zagryaznenie vodnykh ehkosistem // Vod. resursy, 2000. T. 27. № 2. S. 221–231.
8. Kupreinskoy M.T., Antonova T.N., Simbirev N.F., TSyankov A.S. Zemel'nye resursy Stavropol'ya i ikh plodorodie. Stavropol'. 2002. 320 s.
9. Perel'man A.I., Kasimov N.S. Geokhimiya landshafta. M.: Astreya, 2000. 610 s.
10. Rumyantsev A.N. KHimicheskie aspekty vtorichnogo zagryazneniya vodnykh ehkosistem // Trudy Pskovskogo politekhnicheskogo instituta. 2008. № 11. S. 114–117.
11. Spitsyna S.F., Tkachenko T.N., Bakharev V.G. Koehffitsienty vodnoj migratsii mikroelementov: medi, tsinka, margantsa, kobal'ta, bora i molibdena v Altajskom krae // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2007. № 11 (37). S. 35–38.
12. Trots N.M., Trots V.B., Obushhenko S.V. Akkumulyatsiya tyazhelykh metallov zernovymi bobovymi kul'turami v agrolandshaftakh Samarskogo Zavolzh'ya // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2012. №2. S. 50–51.
13. CHetverikova N.S., Martsinevskaya L.V. Kadmij v agrolandshaftakh lesostepnoj zony TSCHO // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2013. №7. S. 69–70.
14. SHal'nev V.A. Obshhaya geografiya i uchenie o geoversume. – Stavropol': Izd-vo SKFU, 2015.
15. Li XY, Liu LJ, Wang YG, Luo GP, Chen X, et al. (2012) Integrated Assessment of Heavy Metal Contamination in Sediments from a Coastal Industrial Basin, NE China. PLOS ONE 6: e39690. doi: 10.1371/journal.pone.0039690. pmid:22768107.
16. Fritsch C, Cœurdassier M, Giraudoux P, Raoul F, Douay F, Rieffel D, et al. (2011) Spatially Explicit Analysis of Metal Transfer to Biota: Influence of Soil Contamination and Landscape. PLoS ONE 6(5): e20682. doi:10.1371/journal.pone.0020682.
17. Huang C, Yang H, Li Y, Zou J, Zhang Y, Chen X, et al. (2015) Investigating Changes in Land Use Cover and Associated Environmental Parameters in Taihu Lake in Recent Decades Using Remote Sensing and Geochemistry. PLoS ONE 10(4): e0120319. doi:10.1371/journal.pone.0120319.
18. Grobelak A, Napora A (2015) The Chemophytostabilisation Process of Heavy Metal Polluted Soil. PLoS ONE 10(6): e0129538. doi:10.1371/journal.pone.0129538.

**УДК 622.241.6** Гасумов Р.А. [Gasumov R.A.],  
Копченков В.Г. [Kopchenkov V.G.]  
Лукьянов В. Т. [Luk'yanov V.T.],  
Фёдорова Н. Г. [Fodorova N.G.],  
Овчаров С. Н. [Ovcharov S.N.]

## **ОСОБЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ГЛУБОКИХ СКВАЖИН В ОСЛОЖНЕННЫХ ГОРНО- ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ПРЕДКАВКАЗЬЯ**

**Peculiarities of deep wells construction  
in complicated mining and geological conditions  
of the Ciscaucasia**

Истощение запасов газа, нефти и конденсата в мезозойских отложениях большинства эксплуатируемых месторождений Северного Кавказа требует активного вовлечения в разработку карбонатного комплекса юры Западного Предкавказья с глубиной залегания ниже 5400 м. Строительство глубоких разведочных скважин в данном регионе является важнейшей народнохозяйственной задачей. В статье рассмотрены и проанализированы причины осложнений при строительстве глубоких скважин, обусловленные сложными горно-геологическими условиями – аномально высокими пластовыми давлениями (коэффициент аномальности  $> 1,8$ ) и пластовой температурой (выше  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), наличием в пластовых флюидах кислых компонентов. Традиционный способ бурения глубоких скважин с регулированием репрессии в интервалах вскрытия флюидонасыщенных пластов отличается низкой технологической эффективностью и повышенной вероятностью возникновения осложнений – поглощений буровых растворов, газопроявлений. В связи с этим строительство глубоких разведочных скважин в Северо-Кавказском регионе требует новых технологических решений с применением инновационных подходов.

The depletion of gas, oil and condensate in Mesozoic sediments of most of the exploited fields in the Northern Caucasus requires active involvement in the development of the Jurassic carbonate complex of Western Ciscaucasia with depth below 5400 m. Construction of deep exploratory wells in the region is an important national economic task. The article considers and analyzes the causes of complications in the construction of deep wells due to difficult mining and geological conditions of abnormally high reservoir pressures (the coefficient of the anomalous  $> 1.8$ ) and formation temperature (above  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), the presence of acidic components in formation fluids. The traditional method of drilling deep wells with represson control in the intervals of drilling fluid-saturated layers is characterized by low technological efficiency and increased probability of complications - drilling fluids losses, gas flows. In this regard, the construction of deep exploration wells in the North Caucasus region requires new technological solutions using innovative approaches.

**Ключевые слова:** строительство глубоких скважин, буровой раствор, аномально высокое пластовое давление, газопроявление, поглощение, плотность бурового раствора, ингибитор коррозии.

**Key words:** construction of deep wells, drilling fluid, abnormally high formation pressure, gas flow, absorption, density of drilling fluid, corrosion inhibitor.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Большинство месторождений Северо-Кавказского региона разрабатываются с 60-х годов прошлого столетия, находятся на заключительной стадии разработки и характеризуются низкими пластовыми давлениями.

Естественное истощение запасов газа, нефти и конденсата в мезозойских отложениях, содержащих основные залежи углеводородов (УВ) на территории Предкавказья, требует активного вовлечения в разработку других продуктивных горизонтов. Поддержание добычи УВ в течение многих лет происходит за счет открытия и ввода в эксплуатацию мелких месторождений. Несмотря на небольшие запасы газа и жидких УВ в каждом из открытых месторождений, относительно небольшая удаленность от ранее обустроенных газопромысловых площадей позволила вводить их в разработку через 2–3 года после открытия, что сдерживало падение уровней добычи газа и жидких УВ.

С этой точки зрения вопросы проведения геологоразведочных работ на территории деятельности и приоритетных интересов ПАО «Газпром» в Предкавказье являются задачей государственной важности, определенной Программой Правительства для Северо-Кавказского региона.

В этом отношении перспективными представляются разведочные площади, на которых предполагается выявить крупные залежи УВ в карбонатном комплексе юры Западного Предкавказья с глубиной залегания ниже 5400 м. Строительство глубоких разведочных скважин в данном регионе, являющихся сложными инженерными сооружениями, требует новых технологических решений с применением инновационных подходов.

Особенности строительства глубоких разведочных скважин с учетом сложных горно-геологических условий обусловлены как значительными глубинами, так и аномально высокими пластовыми давлениями (коэффициент аномальности  $> 1,8$ ) и пластовой температурой (выше 200 °С).

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В статье приведены результаты анализа и изучения промышленных данных, полученных при строительстве глубоких разведочных скважин на месторождениях Западного Предкавказья, с использованием расчетно-аналитических методов определения горно-геологических условий с графической визуализацией и экстраполированием.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

При бурении первой разведочной скважины на глубине 5665 м был зафиксирован рост механической скорости. При забое 5681 м бурение было остановлено в связи с падением плотности выходящего из скважины бурового раствора, при этом газопоказания бурового раствора превысили фоновые значения.

Основной причиной невозможности дальнейшего продолжения буровых работ является несоответствие прочностных характеристик проектной конструкции скважины фактическим горно-геологическим условиям.

Рассмотрим и проанализируем причины, обуславливающие осложнения при углублении скважины.

Основные объемы определений коллекторских свойств пород в разведочной скважине выполнены по известнякам, которые представлены плотными водорослевыми разностями и имеют крайне низкие значения пористости (от 0,12 до 2,92 %, в среднем 0,84 %), в редких случаях встречаются образцы с пористостью, достигающей 2,92 %. Породы в основной массе непроницаемые (менее  $0,01 \cdot 10-15 \text{ м}^2$ ), однако, благодаря широко развитой трещиноватости и наличию многочисленных различно ориентированных стилолитовых прожилков и трещин, некоторые разности известняков имеют проницаемость, достигающую  $123,8 \cdot 10-15 \text{ м}^2$ . При этом величина проницаемости не зависит от характера слоистости; средняя проницаемость в вертикальном направлении нередко выше проницаемости параллельно напластованию.

Влияние доломитизации, из-за ее неравномерности и сравнительно слабой развитости, на коллекторские свойства слабо заметно. Из-за того, что доломитизированные разности нередко более глинистые, они характеризуются пониженной трещинной проницаемостью при несколько увеличенной пористости (табл. 1).

Таблица 1. ХАРАКТЕРИСТИКА КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД

Параметр	Известняки, 5625,6–5656,9 м	Доломитизирован- ные известняки, 5628,15–5642,3 м
Пористость насыщения, пределы колебаний, %	0,12–2,92	0,29–3,81
Пористость насыщения, стандартное отклонение, %	0,45	1,00
Проницаемость перпендикулярно напластованию, пределы колебаний, $\cdot 10-15 \text{ м}^2$	0,01–173,7 трещины	0,01–4,00 трещины
Проницаемость перпендикулярно напластованию, среднее, $\cdot 10-15 \text{ м}^2$	2,09 (113)	0,49 (35)
Проницаемость перпендикулярно напластованию, стандартное отклонение, $\cdot 10-15 \text{ м}^2$	16,86	1,03
Проницаемость параллельно напластованию, пределы колебаний, $\cdot 10-15 \text{ м}^2$	0,01–123,8 трещины	0,01–17,9 трещины
Проницаемость параллельно напластованию, среднее, $\cdot 10-15 \text{ м}^2$	1,92 (226)	1,05 (70)
Проницаемость параллельно напластованию, стандартное отклонение, $\cdot 10-15 \text{ м}^2$	12,47	2,42

В результате бурения скважины установлено присутствие в разрезе карбонатных образований отложений верхней юры мощностью более 225 м (скважина остановлена в этих отложениях). В карбонатной толще предполагается развитие массива (более 35 м толщиной) трещиноватых и кавернозных известняков и доломитов рифогенного генезиса. Предполагается, что эти известняки будут продолжаться до глубины 5720 м (до подошвы герпегемской свиты).

Нижняя часть мезозойской водонапорной системы Западно-Кубанского прогиба, представленная отложениями нижней, средней юры (песчаные породы) и верхней юры-келловейский ярус (песчаники и известняки), оксфордский, кимериджский и титонский ярусы (известняки, гипсы, ангидриты, глины), характеризуется аномально высокими давлениями (АВПД). Зона АВПД преобладает на глубинах ниже 4000 м.

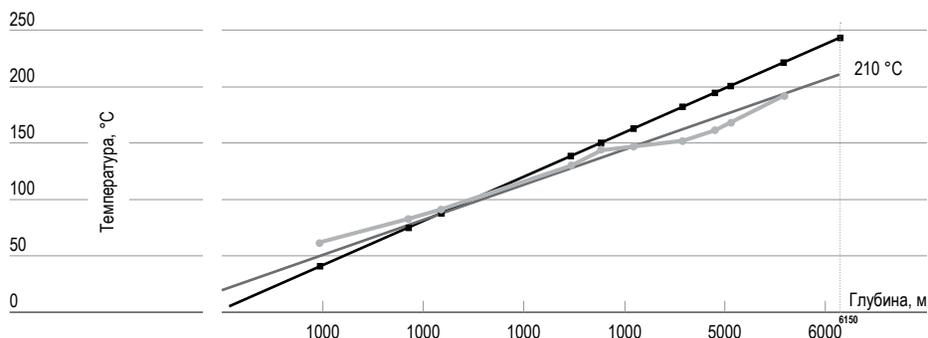
АВПД приурочены к зонам с высокими скоростями осадконакопления в неогеновое и четвертичное время и образуются преимущественно в глинистых разрезах, в которых происходит медленный отток отжимаемых в результате увеличения геостатической нагрузки поровых вод в ограниченные по объему породы коллекторы, а также в водонапорных системах с замкнутым контуром. В зависимости от указанных причин в каждом водоносном комплексе имеются пласты как с нормальными пластовыми давлениями, так и с АВПД. Анализ градиентов пластовых давлений по площадям и месторождениям Северного Кавказа показывает, что АВПД в мезозойских отложениях с коэффициентом аномальности (КА) более 2,0 установлены только на Куколовской площади, а также в кимериджских известняках в скважине № 10 (КА от 2,02 до 2,13) и келловейских глинистых песчаниках в скважинах № 7 и 9 Кошехабльского месторождения (КА от 1,95 до 2,04).

Бурение в сложных горно-геологических условиях было осуществлено в пределах северного борта Западно-Кубанского прогиба в скважине № 3 Мышастовская, в которой верхнеюрские отложения с глубины 4980 м до 5700 м были пройдены при плотности бурового раствора от 2,02 до 2,2 г/см<sup>3</sup>.

Таким образом, анализ имеющегося фактического материала по пластовым давлениям показывает, что верхнеюрские отложения в изучаемом районе характеризуются сложными горно-геологическими условиями и могут быть пройдены при плотностях буровых растворов от 2,0 г/см<sup>3</sup> до 2,2 г/см<sup>3</sup> [1].

На проектной глубине 6150 м коэффициент аномальности составит 2,2. Следует указать на возможный вариант, что на глубине 5646 м был встречен ореол внедрения газовой залежи, которая находится гипсометрически ниже (в интервале 5681–5720 м), и в которой давление может быть меньше прогнозируемых значений.

По полученным данным построены зависимости температуры (проектной и фактической) от глубины. Кривые представлены на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Кривая зависимости температуры от глубины по стволу разведочной скважины.

По прямолинейному участку этой зависимости определена температура на глубине 6150 м, составившая 210 °С.

По результатам промысловых данных определим температуру пласта по геотермическому градиенту ( $G_T$ ) [2]:

$$G_T = \frac{H}{T - T_0} = \frac{5586\text{м}}{(192 - 20)} = 32,5\text{м} / ^\circ\text{C}$$

Температура на глубине 6150 м будет равна

$$T_{6150} = \frac{6150}{32,5} + 20 = 209,2^\circ\text{C}$$

Температура, замеренная глубинным манометром *Kuster K-3* на глубине 5402 м, составила 197 °С.

$$G_T = \frac{5402}{(197 - 20)} = 30,53\text{м} / ^\circ\text{C}$$

Температура на глубине 6150 м будет равна

Таким образом, температура пласта на глубине 6150 м ожидается в диапазоне 209,2 ÷ 221,4 °С.

Бурение в интервале 3500–5050 м велось роторным способом полимерно-малоглинистым буровым раствором. Углубление скважины в интервале 3582–4498 м велось при плотности бурового раствора 1640–1700 кг/м<sup>3</sup> со среднесуточным поглощением бурового раствора от 3–6 до 10,5 м<sup>3</sup> и выходом разгазированных пачек.

Мероприятия по ликвидации зоны поглощения, ориентировочно расположенной в интервале 3547–3780 м, были выполнены безрезультатно, в т.ч.

и закачка цементного раствора на поглощение. В призабойной зоне пласта (ПЗП) создавался временный изоляционный экран с применением наполнителей, но при попытках возобновления бурения возникало катастрофическое поглощение. Положительного результата удалось добиться только после проведения 6 операций по закачке на поглощение термогеля с закреплением цементом.

При забое 4498 м в выходящем из скважины буровом растворе увеличилось содержание газа с 0,2 до 1,6 %. При дальнейшей промывке скважины отмечен рост газопоказаний в выходящем растворе с 4 до 12 %, плотность раствора после дегазатора не восстанавливалась. Вследствие водопроявления в ствол скважины суммарно поступило 52,6 м<sup>3</sup> пластовой воды (после герметизации устья и стабилизации давлений  $P_t = 3,2$  МПа,  $P_{zt} = 5,8$  МПа). Водопроявление ликвидировано методом утяжеления бурового раствора до 1740–1760 кг/м<sup>3</sup> с поддержанием необходимого противодавления.

При промывке с выравниванием параметров бурового раствора по циклу перед подъемом бурильного инструмента произошло поглощение бурового раствора с падением уровня.

Интервал 4509–5050 м пройден без применения систем очистки бурового раствора с добавками разнофракционного кольматанта. Углубление сопровождалось поглощениями различной интенсивности. При забое 4647 м и 4785 м произошли сломы в муфтовой части утяжелённой бурильной трубы диаметром 203 мм. Оставленные части КНБК были извлечены. При ликвидации второй аварии наблюдалось поглощение и выход газированных пачек раствора.

Спуск второй технической колонны на глубину 5033 м проводился в осложненных условиях с расхаживанием и промывкой. Цементирование технической колонны произведено до устья в две ступени. После окончания времени ОЗЦ вторая техническая колонна опрессована давлением 97,5 МПа на технической воде (верхняя часть обсадной колонны совместно с ПВО дополнительно опрессована азотом на то же давление). После разбуривания цементного стакана и заполнения интервала 0–1100 м технической водой во время промывки буровым раствором плотностью 1780 кг/см<sup>3</sup> наблюдалось его вспенивание с увеличением газопоказаний от 0,2 до 3,6 % [1].

В результате исследований установлено, что в интервале 3500–5050 м вскрыты две несовместимые зоны: коллектора верхней части разреза эоцена в интервале 3547–3780 м поглощали буровой раствор, в это же время терригенные коллектора нижней части палеоцена (ейская свита) в интервале 4370–4440 м – проявляли. После крепления скважины второй технической колонной, бурение продолжено с глубины 5050 м. Параметры бурового раствора при бурении интервала 5050–5617 м представлены в таблице 2.

Таблица 2. ПАРАМЕТРЫ БУРОВОГО РАСТВОРА ПРИ БУРЕНИИ ИНТЕРВАЛА 5050–5617 м

Параметры бурового раствора						
Плотность бурового раствора, кг/м <sup>3</sup> ,		Условная вязкость, с	СНС <sub>1/10</sub> , дПа	ДНС, дПа	Водоотдача, см <sup>3</sup> /30 мин	h
закачиваемого	выходящего					
1820–1960	1600–2050	32–95	62/81–167/210	105–292	2,5–4,3	38–42

Примечание: СНС<sub>1/10</sub> – статическое напряжение сдвига через 1 и 10 мин;  
 ДНС – динамическое напряжение сдвига;  
 η – пластическая вязкость.

При бурении в интервале 5050–5056,8 м наблюдался рост газопоказаний бурового раствора до 1,7 %, в интервале 5056,8–5058,2 м плотность выходящего раствора снижалась до 1650 кг/м<sup>3</sup>. В интервале 5077–5080 м наблюдалось увеличение механической скорости: 5077 м – 1,47 м/ч, 5078 м – 1,98 м/ч, 5079 м – 2 м/ч, 5080 м – 1,5 м/ч, плотность выходящего бурового раствора 1780 – 1790 кг/м<sup>3</sup>. Углубление было продолжено без остановки для вымыва забойной пачки. При забое 5080,9 м наблюдалось увеличение газопоказаний бурового раствора до 20 % со снижением плотности до 1560 кг/м<sup>3</sup>.

Промывка проводилась утяжеленным буровым раствором с плотностью 1820 кг/м<sup>3</sup> (раствор пенился). При глубине 5085,7 м произошло падение давления нагнетания буровых насосов с 16 до 14,4 МПа со снижением плотности раствора на выходе до 1800 кг/м<sup>3</sup>. После кратковременных промывок приступили к дальнейшему углублению скважины в интервале 5085,7–5086,1 м. Отмечено падение давления нагнетания на 2 МПа и увеличение объема раствора в мерниках на 2,5 м<sup>3</sup>. Бурение прекращено. Устье скважины загерметизировали. В течение 15 мин рост давления не наблюдался. Устье разгерметизировано – перелива нет. Увеличили плотность раствора до 1840 кг/м<sup>3</sup> и приступили к промывке с поддержанием противодействия в затрубном пространстве 1 МПа. Поэтапно скважина переведена на буровой раствор плотностью 1960, 2000, 2100 кг/м<sup>3</sup>. На глубине 5055 м при проработке ствола скважины произошел рост давления с 16,5 до 24,5 МПа и рост момента на вращение. При подъеме бурильный инструмент пошел в затяжку и потерял подвижность. После восстановления циркуляции и расхаживания инструмент был поднят в безопасную зону до глубины 5023 м. При промывке на устье вышла разгазированная пачка бурового раствора, вымывалась обвальная порода.

Таким образом, устранить разгазирование бурового раствора повышением его плотности до  $2100 \text{ кг/м}^3$  не удалось. Учитывая опыт проводки соседних скважин № 1, 2 Чебургольские, в которых интенсивность подобных газопроявлений на аналогичных глубинах уменьшалась повышением плотности до значения  $1850 \text{ кг/м}^3$ , в целях предотвращения поглощений бурового раствора и снижения прихватоопасности в открытом стволе скважины плотность бурового раствора снизили с  $2100 \text{ кг/м}^3$  до  $1960 \text{ кг/м}^3$ . При промывке на глубине 5023 м был отмечен выход газовой пачки и углубление в интервале 5086–5617 м. Во время промывок плотность раствора на выходе из скважины снижалась до  $1570 \text{ кг/м}^3$ , газопоказания составили 33–37 %. После дегазации плотность восстанавливалась до  $1960 \text{ кг/м}^3$ .

В результате проведенных операций установлено:

- увеличение плотности до  $2100 \text{ кг/м}^3$  не устранило газопроявления, при этом интенсивность затяжек и посадок инструмента возросла, было получено частичное поглощение;
- углубление производилось на буровом растворе с реологическими параметрами, не в полной мере соответствующими термобарическим и горно-геологическим условиям вскрываемого разреза, в связи с чем, вероятно, и связано вспенивание раствора;
- причинами газопроявлений может быть временное превышение пластового давления над забойным, обусловленное эффектом «поршневания» при СПО, расхаживании инструмента.

Углубление скважины из-под спущенной на глубину 5617 м потайной колонны в интервале 5669–5680 м буровым раствором плотностью  $1860 \text{ кг/м}^3$  отмечен рост механической скорости с 2 до 15 м/ч и газопоказаний до 6,5 %.

При вымыве забойной пачки газопоказания составили 26,5 %. По данным станции ГТИ пластовый флюид на 99 % состоит из метана (забой – 5680 м). При промывке в течение 2-х циклов с противодавлением 2,9–3,9 МПа газопоказания составили 20 %.

Скважина была опробована на приемистость ступенчатым созданием давления на устье в затрубном пространстве с 8 до 10 МПа на растворе плотностью  $2050 \text{ кг/м}^3$ : приемистости нет. Забойное давление составило 124,1 МПа, что соответствует эквивалентной плотности раствора  $2226 \text{ кг/м}^3$ .

Исходя из динамики изливов и потерь бурового раствора при проведении техотстоев определено, что время начала изливов не увеличивается пропорционально повышению плотности раствора и варьируется от 50 до 90 мин. Это означает, что природа перелива не связана с поступлением газа из вскрытого пласта [3].

После промывки и обработки глинистого раствора в башмаке потайной колонны (параметры:  $\rho - 2360 \text{ кг/м}^3$ ,  $T - 67 \text{ с}$ ,  $\text{pH} - 9,0$ ,  $\text{СНС1/10} - 67/110 \text{ дПа}$ ,  $\text{ДНС} - 164 \text{ дПа}$ ,  $\eta - 40 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ , водоотдача  $- 2,7 \text{ см}^3/30 \text{ мин}$ , твердая фаза  $- 47 \%$ ). Расчетные гидравлические потери давления в кольцевом пространстве составляли 9 МПа, что соответствует эквивалентной плотности раствора  $2500 \text{ кг/м}^3$ . Поскольку эта глубина практически совпадает с отметкой резко повышения механической скорости проходки, можно предположить, что в интервале 5669–5681 м образовалась баритовая пробка в результате седиментации барита и фильтрации жидкой фазы бурового раствора в проницаемые горизонты.

В интервале 5652–5517 м установлен изолирующий цементный мост, прочность которого опробована давлением 5 МПа.

Данные измерения давления и температуры по стволу скважины приведены в таблице 3, а результаты расчета эквивалентной плотности бурового раствора  $\gamma_{\text{см}}$  – в таблице 4.

Таблица 3. ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПО СТВОЛУ СКВАЖИНЫ

№ интервала	Глубина, м	Температура, °С	Давление, кгс/см <sup>2</sup> (МПа)
1	0	—	1,03 (0,10)
2	3507	—	759,46 (74,50)
3	4510	—	964,19 (94,59)
4	5402	197,0	1157,58 (113,56)

Таблица 4. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ПЛОТНОСТЬ БУРОВОГО РАСТВОРА

Н <sub>i</sub> , м	Н <sub>i+1</sub> , м	$\Delta H$ , м	$P_{i+1} - P_i$ , кгс/см <sup>2</sup> (МПа)	$\gamma_{\text{см}}$ , кг/м <sup>3</sup>
0	3507	3507	758,46 (74,4)	2163
3507	4510	1003	204,73 (20,1)	2041
4510	5402	892	193,39 (19,0)	2168

Величина средней плотности бурового раствора по стволу скважины составила  $2143 \text{ кг/м}^3$ . Распределение эквивалентного давления, создаваемого буровым раствором по стволу скважины, не равномерно. По результатам анализа и изучения полученных данных можно сделать следующие выводы:

- строительство скважины производилось в сложных термобарических условиях, проектные решения не учитывали фактических геолого–геологических условий;

- интервал характеризуется резким увеличением механической скорости проходки и интенсивным газопроявлением, которое удалось ликвидировать увеличением плотности бурового раствора с 1860 до 2350 кг/м<sup>3</sup>;
- завышенные значения реологических параметров раствора свидетельствуют о том, что применяемая рецептура бурового раствора не соответствует фактическим термобарическим условиям;
- цементирование 2-й технической колонны диаметром 244,5 × 250,8 мм, спущенной до глубины 5033 м и зацементированной в интервале 0 – 5033 м до устья, привело к уменьшению значения допустимого внутреннего избыточного давления в интервале 3500 – 0 м.

При бурении из-под башмака потайной колонны диаметром 193,7 мм в скважине разгазирование бурового раствора началось с глубины 5669 м. Повышение плотности бурового раствора не позволяло устранить газопроявления. Подобные явления неоднократно отмечались в практике вскрытия газоносных пластов при бурении скважин, имеющих потайные колонны. Теоретическое обоснование механизма возникновения такого газопроявления, подробно изложено в [4]: при пластовом давлении, превышающем гидростатическое давление бурового раствора в стволе скважины, в случае некачественного цементирования по заколонному пространству потайной колонны происходит перенос газа вверх.

Схема распределения давлений и возможных газопроявлений за хвостовиком показана на рисунке 2.

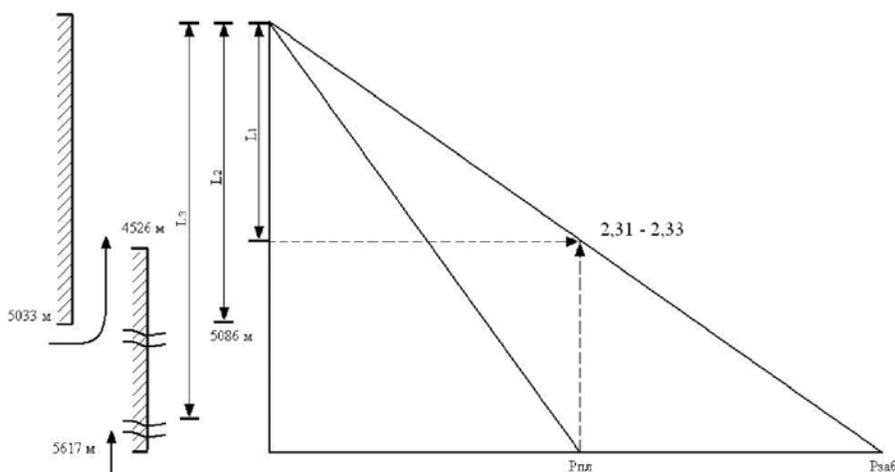


Рисунок 2.

Схема распределения давлений и возможных газопроявлений за хвостовиком диаметром 194 мм.

Используя указанную выше методику, оценим возможность предотвращения выхода газа через цементный камень за потайной колонной расчетным методом [5].

Для этого необходимо выполнение условия:

$$K_z \leq \rho_{бр}, \quad (1)$$

где  $K_z$  – эквивалент градиента давления на глубине  $z$ , определяется по формуле (2);  
 $\rho_{бр}$  – относительная плотность бурового раствора.

$$K_z = K_a \frac{H_{пл}}{Z} e^{-s_z}, \quad (2)$$

где  $H_{пл}$  – отметка кровли проявляющего пласта;  
 $Z$  – глубина рассматриваемого сечения;  
 $K_a$  – коэффициент аномальности пластового давления проявляющего пласта.

Коэффициент аномальности  $K_a$  для вскрытого на глубине 5086 м газового пласта принимаем равным 2,1, поскольку при плотности бурового раствора 2100 кг/м<sup>3</sup> полностью исключить газопроявление не удалось.

Расчетное значение  $K_z$  на глубине установки головы потайной колонны с негерметичным цементным камнем составляет 2,33. Это объясняет, почему для полного прекращения газовыделений потребовалось повышение плотности бурового раствора до 2350 кг/м<sup>3</sup>. Следовательно, значение плотности бурового раствора 2350 кг/м<sup>3</sup>, при котором скважина была задавлена, не может быть использовано как исходный материал для расчета пластового давления на глубине 5681 м.

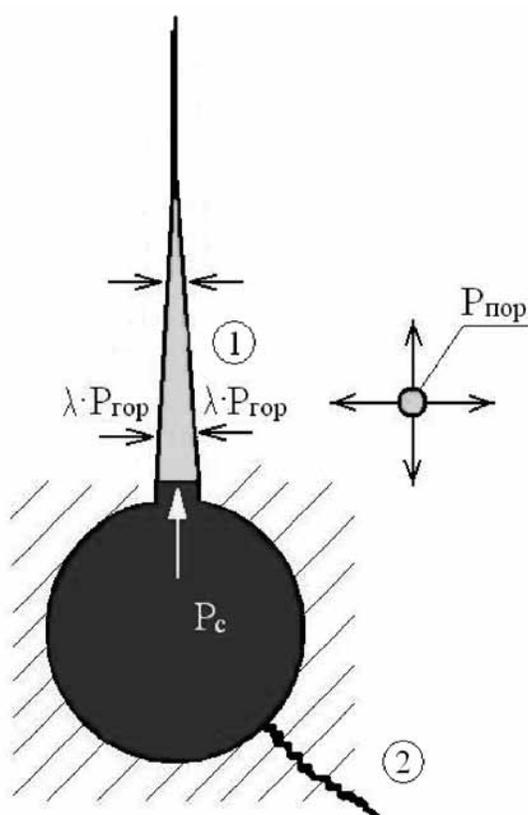
Дополнительным доказательством поступления газа из кольцевого пространства за потайной колонной являются следующие факты:

1. По данным замера глубинным манометром Kuster K-3 распределение давления, создаваемого буровым раствором по стволу скважины, не равномерно и увязывается с конструкцией скважины. Как видно из графика, строго над «головой» потайной колонны имеет место резкое уменьшение эквивалентной плотности бурового раствора. Это возможно только при поступлении газа. Поскольку буровой раствор во время замеров давления был неподвижен, такое

- совпадение можно объяснить только негерметичностью цементного камня за хвостовиком.
2. Состояние контакта цементного камня с колонной и породой по данным АКЦ изменяется вдоль интервала крепления. В верхней части (интервал 4526–5088 м) над газонасыщенным пластом контакт цементного камня и колонны следующий: 41 % – отсутствует, 59% – плохой. Ниже (в интервале 5088–5400 м) контакт плохой – 30%; частичный – 44%; сплошной – 26%. То есть в нижней части качество цементирования существенно лучше, чем в верхней, где контакт цементного камня с металлом и породой плохой или отсутствует. Именно в верхней части заколонного пространства расположен газовый пласт на глубине 5060–5086 м, который разгазировал цементный раствор. Это, вероятно, явилось причиной образования газопроводящего канала [6].
  3. Попытки ликвидировать газопроявление посредством ступенчатого увеличения плотности бурового раствора до  $2300 \text{ кг/м}^3$ , изменения схемы промывок и ввода кольматирующих наполнителей не позволили увеличить продолжительность безопасного отстоя скважины. Газовыделения удалось ликвидировать при плотности бурового раствора  $2350 \text{ кг/м}^3$ , при этом на глубине 5652 м образовалась баритовая пробка. В интервале 5663–5438 м установили консервационный цементный мост. Однако при промывках над цементным мостом по данным ГТИ и результатам замеров (в том числе газоанализатором АНКАТ-7664М в забойных пачках суммарные газопоказания достигали 22,1% при фоновых 1–2%. То есть газопроявления не прекратились. Они прекратились лишь после установки цементного моста в интервале 4575–4470 м. Это является еще одним доказательством поступления газа из заколонного пространства хвостовика.

В конкретной скважине продуктивные отложения представлены трещиноватыми известняками. То есть горная порода имеет сеть трещин, а давление пластового флюида в замкнутых порах создает внутренние напряжения и не оказывает влияние на состояние матрицы. Условием начала поглощения является превышение давления жидкости в стволе скважины над давлением раскрытия трещин.

Для расчета предельного давления в скважине воспользуемся схемой (рис. 3), которая отражает состояние скважины с системой развитых трещин.



1 – Расчетная схема 1;  
 2 – Расчетная схема – 2.

**Рисунок 3.** Схема усилий, действующих на существующую трещину в горной породе.

Если пластовое давление и давление в скважине меньше бокового горного, то трещина сомкнута. Поглощение может возникнуть в случае превышения бокового горного давления над гидростатическим. Условие возникновения поглощения [3]

$$P_{\text{гpn}} > \frac{\mu}{1-\mu} \cdot P_{\text{гор}} + P_{\text{пл}}, \quad (3)$$

$$P_{\text{пл}} \leq P_{\text{пор}}.$$

Коэффициент Пуассона  $\mu$  для известняков находится в широком пределе (0,26–0,33). Используем наименьшее из всех значение  $\mu$  для известняков, равное 0,26 (трещиноватый известняк). По формуле (3) определим давление и градиент гидроразрыва пород на глубине 5681 и 6150 м:

$$P_{\text{грп}} = \frac{\mu}{1-\mu} \cdot P_{\text{гор}} + P_{\text{пл}} = \frac{0,26}{1-0,26} \cdot 2420 \cdot 9,81 \cdot 5681 + 2,07 \cdot 5681/100 = 164,98 \text{ МПа},$$

$$P_{\text{грп}} = \frac{\mu}{1-\mu} \cdot P_{\text{гор}} + P_{\text{пл}} = \frac{0,26}{1-0,26} \cdot 2420 \cdot 9,81 \cdot 6150 + 2,16 \cdot 6150/100 = 184,14 \text{ МПа}.$$

Тогда градиент ГРП  $G_{\text{грп}5681} = 2,90 \text{ МПа}/100 \text{ м}$ , градиент ГРП  $G_{\text{грп}6150} = 2,98 \text{ МПа}/100 \text{ м}$ .

Рассчитанные значения давления гидроразрыва пород применимы только к трещиноватым коллекторам. Определенный расчетным методом градиент давления ГРП в плотных монолитных породах имеет значения:  $G_{5681} = 2,50 \text{ МПа}/100 \text{ м}$ ;  $G_{6150} = 2,52 \text{ МПа}/100 \text{ м}$ .

Таким образом, уточненный механизм расчета предельного давления в скважине позволяет сделать вывод о возможности углубления до глубины 6150 м на буровом растворе плотностью до 2350 кг/м<sup>3</sup>.

Фактическая конструкция скважины не рассчитана на ожидаемый градиент пластового давления и наличие кислых сред. Пластовое давление на глубине 5681 м составляет 117,50 МПа, расчетное максимально допустимое пластовое давление для колонны диаметром 245 × 251 мм составляет 88,5 МПа.

Для оперативного поддержания необходимой репрессии на пласты с АВПД, контроля и регулирования расчетного давления на устье дополнительно включить в схему оборудования устья устьевого герметизатор.

Применяемое буровое оборудование удовлетворяет фактическим горно-геологическим условиям бурения до проектной глубины по грузоподъемности и мощности.

Проведенным анализом использованных буровых растворов установлено, что химические реагенты, применяемые для приготовления и обработки бурового раствора, не в полной мере соответствуют термобарическим и горно-геологическим условиям вскрываемого разреза, чем обусловлено вспенивание раствора. Углубление в интервале 5033–5681 м производилось на полимерглинистом буровом растворе с реологическими параметрами, в значительной степени отличающимися от проектных. Например, применение при температурах около 200 °С бурового раствора с полимерными реагентами и кольматантом, подвергающимися термодеструкции при температурах более 150–180 °С привело к утрате их функций регуляторов вязкости (одна из причин выпадения баритовой пробки) и фильтрационных свойств бурового раствора.

Установленное анализом наличие кислых компонентов в буровом растворе обусловлено выделением газов (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и других серосодержащих со-

единений) за счет взаимодействия ингредиентов бурового раствора с породой и контактирующим с ним пластовым флюидом. Это экспериментально подтверждено в ОАО «НИПИГазпереработка» снижением pH отработанного бурового раствора за счет расхода щелочи на реакцию с кислыми газами, обнаруженными в газе пачки в значительных количествах.

Необоснованное превышение содержания нейтрализатора ЖС-7 в буровом растворе затруднило регулирование его реологических свойств, а также привело к выделению газов за счет протекания окислительно-восстановительных процессов с участием нетермостойких химических реагентов.

Дополнительным незначительным источником проявления  $H_2S$  в буровом растворе может быть его редуцирование сульфатвосстанавливающими бактериями (СВБ) на поверхности, как это экспериментально подтверждено в отчете ОАО «НИПИГазпереработка».

С учетом вышесказанного для дальнейшего углубления скважины до 6150 м целесообразно применение бурового раствора, обработанного термостойкими химическими реагентами, который должен содержать нейтрализатор  $H_2S$  и ингибитор коррозии оборудования.

Реагенты-нейтрализаторы  $H_2S$  и  $CO_2$  должны обеспечивать нейтрализацию кислых газов в буровом растворе в широком диапазоне значений pH и температуре до 240 °С. При такой температуре применение нейтрализаторов на органической основе неэффективно из-за их недостаточной термостойкости. Наиболее целесообразно в таких жестких температурных условиях использование неорганических нейтрализаторов на основе окислов железа – ЖС-7 и СНУД.

Защиту бурового оборудования от коррозии при воздействии бурового раствора, содержащего  $H_2S$  и  $CO_2$ , можно обеспечить применением ингибиторов. В зависимости от вида бурового раствора могут быть использованы водо- или маслорастворимые вододиспергируемые ингибиторы коррозии.

## ВЫВОДЫ

Анализ состояния вопроса по креплению высокотемпературных сероводородсодержащих скважин в условиях АВПД позволяет сделать следующие выводы:

1. Нарушение герметичности крепи глубоких скважин, сопровождающееся возникновением межпластовых перетоков, межколонных давлений, появлением пластовых флюидов на поверхности, обусловлено:
  - поражением цементного камня агрессивными компонентами пластовых флюидов;
  - нарушением герметичности контактных зон цементного камня;

- нарушением сплошности цементного камня в затрубном пространстве скважины;
- ухудшением изоляционных свойств камня за счет термодеструктивных процессов.

2. Особенности состава и свойств применяемых тампонажных материалов и связанные с ними специфические физико-химические особенности процессов гидратации и твердения обуславливают принципиальную невозможность решения проблемы качественного крепления высокотемпературных скважин в коррозионно-активных средах применением традиционных тампонажных материалов.

Глубокая поисковая скважина № 1 на газоконденсатной площади Крупская находится в осложненном состоянии, связанном со вскрытием верхнеюрских отложений, характеризующихся повышенным пластовым давлением, наличием  $H_2S$  до 0,3 % и  $CO_2$  до 6,5 %. На глубине 6150 м ожидается температура 209–240 °С. Коэффициент аномальности пластового давления на глубине 5681 м – 2,11, на глубине 6150 м – 2,2. Продолжение строительства скважины до проектной глубины возможно в случае принятия специальных дополнительных мер.

С учетом фактического состояния скважины и уточненных горно-геологических условий бурение до проектной глубины предлагается вести в следующей последовательности:

- разбурить цементные мосты до глубины 4883 м;
- выполнить диагностику крепи скважины в интервале 4883–4500 м;
- провести необходимые дополнительные мероприятия по результатам диагностики;
- спустить 193,7×197 мм колонну в интервале 4526 – 0, состыковать ее с хвостовиком и зацементировать колонну в интервале 4526 – 3900 м;
- пробурить ствол скважины до проектной глубины 6150 м;
- спустить хвостовик диаметром 139,7 мм (безмуфтовой) в интервале 6150 м – 4000 м.

При невозможности обеспечить герметичность скважины ниже 4526 м предлагается пробурить второй ствол с глубины 4450 м до 5650 м, спустить в него колонну 178×194×197 мм, а затем пробурить скважину до проектной глубины и спустить хвостовик эксплуатационной колонны диаметром 127 мм. При этом рекомендуется буровой раствор DURATHERM фирмы «M-I-SWACO» при температуре до 220 °С и раствор PYRO-DRILL фир-

мы «BAKER HUGHES» – до 240 °С. Резервный вариант – буровой раствор MEGADRIL фирмы «M-I SWACO».

Ввод в эксплуатацию газовых залежей Крупской площади целесообразен по любому из рассмотренных вариантов. Наиболее высокий чистый дисконтированный доход, норма внутренней доходности, индекс доходности будут достигнуты при разработке месторождения по первому варианту как при окончании строительства вертикальной скважины, так и при зарезке второго ствола в скважине № 1 Крупская. Инвестиционный проект достаточно устойчив к колебаниям объема капитальных вложений и менее устойчив к колебаниям цены на реализацию продукции [7].

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Дубенко В.Е. Расчетный метод обоснования интервалов установки колонн-хвостовиков в газовых скважинах / В.Е. Дубенко, В.И. Чернухин, В.А. Васильев // Пути повышения скоростей бурения и сокращения сроков строительства скважин: материалы научно технического совета. (Тюмень, ноябрь 2004) / М: ИРЦ Газпром 2005. С. 102–112.
2. Горонович С.Н. Методы обеспечения совместимости интервалов бурения. М.: Газпром экспо, 2009. 356 с.
3. Булатов А.И., Проселков Ю.М. Решение практических задач при бурении и освоении скважин: справ. пособие. Краснодар: Совет. Кубань, 2006. 744 с.
4. Спивак А.И., Попов А.Н. Разрушение горных пород при бурении скважин: учебник для вузов. М.: Недра, 1994. 261 с.
5. Соловьев Е.М. Задачник по заканчиванию скважин: учеб. пособие для вузов. М.: Недра, 1989. 251 с.
6. Гасумов Р.А. Геологические факторы, влияющие на качество крепления скважин (на примере конкретной скважины Прибрежной группы месторождений) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2014. № 12. С. 48–53.
7. Гасумов Р.А. Риски при бурении поисково-разведочных скважин в осложненных горно-геологических условиях // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2014. № 9. С. 26–30.

## REFERENCES

1. Dubenko V.Y. Design method of substantiation of intervals to install the liners in gas wells / V.Y. Dubenko, V.I. Chernukhin, V.A. Vasilyev // Ways to improve drilling rates and reduce the time of construction of wells: materials of scientific and technical advice. (Tyumen, November 2004) / M.: IRC Gazprom 2005. P. 102–112.
2. Goronovich S.N. Methods of assuring compatibility of drilling intervals. M.: Gazprom expo, 2009. P. 356.
3. Bulatov A.I. Proselkov Y.M. The solution of practical problems in the drilling and development of wells: reference book. Krasnodar: Council. Kuban, 2006. P. 744.
4. Spivak A.I., Popov A.N. The destruction of rocks during drilling of wells: a textbook for high schools. M.: Nedra, 1994. P. 261.
5. Solovyov E.M. Problem book on completion of wells: manual for schools. M.: Nedra, 1989. P. 251.
6. Gasumov R.A. Geological factors affecting the quality of well stabilization (by example of the well of Coastal Group fields) // Geology, geophysics and development of oil and gas fields. 2014. No.12. P. 48–53.
7. Gasumov R.A. Risks for drilling exploration wells under complicated geological conditions // Problems of Economics and Management of oil and gas complex. 2014. No9. P. 26-30.

УДК 622.24

Гридин В. А. [Gridin V.A.]  
Дубенко В. Е. [Dubenko V.E.],  
Димитриади Ю. К. [Dimitriadi Ju.K.],  
Серов А. В. [Serov A.V.]

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ НА ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТЬ ПЕСЧАНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ**

**Experimental researches of technological fluids'  
influence on gas permeability of sand-stone  
reservoirs**

Актуальным вопросом является сохранение естественных фильтрационно-емкостных свойств продуктивного пласта в процессе бурения скважины, а также при проведении ремонтных работ. Известно, что определяющее влияние на качество вскрытия пласта и состояние призабойной зоны пласта оказывает воздействие промывочной жидкости. Поэтому особый интерес представляют экспериментальные исследования влияния технологических жидкостей на газопроницаемость песчаных коллекторов. С этой целью проводились эксперименты на специальной установке. В качестве проницаемых образцов использовались искусственные цементно-песчаные керны с различной проницаемостью изготавливаемые по специальной технологии. В качестве буровых растворов использовались различные ингибированные глинистые растворы (утяжеленный, загущенный, естественные водные суспензии из скважин), безглинистые полимерные, а также техническая вода. Рассмотрен процесс кольматации песчаных коллекторов технологическими жидкостями. Получена зависимость коэффициента восстановления проницаемости, принятого показателем кольматирующей способности исследуемых жидкостей, от начальной проницаемости безглинистых коллекторов.

A key issue is to preserve natural reservoir properties of productive formation in the process of well drilling and when well work-over is realized. It is well-known fact, that significant influence on quality of ledge drilling-in and condition of bottomhole zone has effect of flushing fluid. That is why, experimental researches of technological fluids' influence on gas permeability of sandstone reservoirs are of great interest. Experiments on special equipment had been realized for this purpose. Artificial cement-sand core samples with different permeability made by specified technology were applied as permeable samples. Different inhibited clay muds (weighted, thickened, natural water suspensions from well), clayless polymer one and technical water were used as drilling muds. Mudding process by technological fluid of sandstone reservoirs was considered. The dependence of permeability recovery coefficient, accepted as indicator of mudding ability of investigated fluids from initial permeability of clayless reservoirs was received.

**Ключевые слова:** скважина, продуктивный пласт, промывочная жидкость, кольматация, проницаемость, установка, искусственные керны.

**Key words:** well, productive formation, flushing fluid, mudding, permeability, equipment, artificial core samples.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Скважина, околоскважинная зона и межскважинная часть пласта – это взаимосвязанные и взаимодействующие элементы единой техноприродной системы. В процессе сооружения скважины наиболее существенные изменения фильтрационно-емкостных свойств пласта или разрушение продуктивных коллекторов происходят в околоскважинной части. Пробле-

ма борьбы с разрушением продуктивных коллекторов и выносом пластового песка становится все более актуальной для большинства нефтяных и газовых месторождений, находящихся на поздней стадии эксплуатации [1]. Известно, что даже в окончательный период функционирования скважины изменение ее фильтрационных свойств в призабойной или околоскважинной зоне оказывает влияние на ее продуктивность, на темпы разработки месторождения и конечный коэффициент нефтегазоизвлечения. Фильтрационно-емкостные свойства пласта ухудшаются вследствие кольматации пласта различными веществами во время первичного вскрытия, цементирования колонны, вторичного вскрытия перфорацией и при различных ремонтах скважины.

В процессе бурения и ремонта скважин происходит интенсивная кольматация продуктивного горизонта буровым раствором. Под действием перепада давления (репрессии) в системе «скважина-пласт» в породу проникает фильтрат и твердая фаза раствора, что снижает проницаемость продуктивного пласта. Лабораторными и промышленными исследованиями ряда отечественных и зарубежных авторов [2] установлено, что кольматация зависит от факторов: величины репрессии; типа и физических параметров коллектора (пористость, проницаемость, трещиноватость, глинистость); степени дисперсности твердой фазы, содержащейся в растворе; физико-химических параметров раствора.

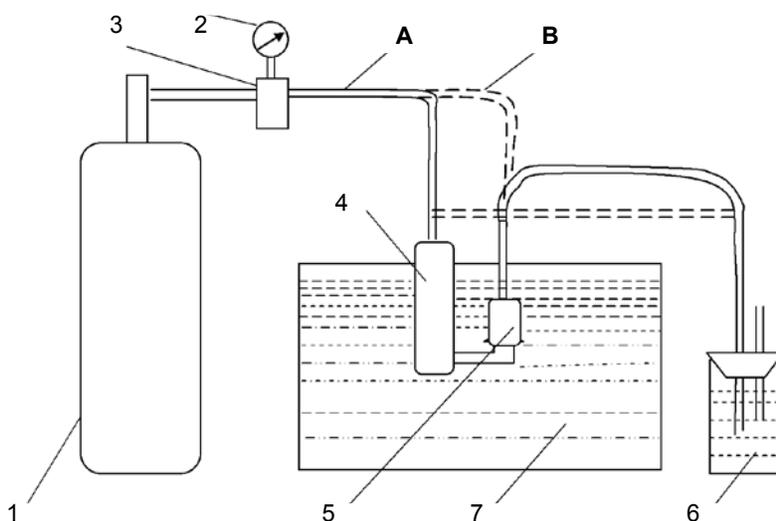
В работе [3] установлены закономерности изменения глубины проникновения фильтрата и твердой фазы раствора (как количественной характеристики кольматации породы) от интенсивности формирования глинистой корки, от величины частиц твердой фазы раствора и структуры перового пространства, от величины репрессии. Этими же исследованиями установлено снижение проницаемости коллектора в зоне проникновения раствора.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Существенному повышению качества буровых и ремонтных работ в скважине способствует максимальное сохранение проницаемости продуктивного пласта. Исходя из этого условия, целесообразно оценивать степень влияния бурового раствора на коллекторские свойства пласта в прискважинной зоне по остаточной проницаемости. Особый интерес представляют газоносные отложения, так как процесс взаимодействия жидкости и газа в пористой среде сложен из-за существенной разности их плотностей.

Как правило, выделяются два вида кольматации: механический и химический. Химическая кольматация проявляется в виде набухаемости глинистого материала пласта [4] и достаточно хорошо изучена. Разработаны нейтральные растворы, которые широко применяются в отрасли. Поэтому в настоящей статье этот процесс не рассматривается.

Для количественной оценки влияния механической кольматации на песчаники газовых коллекторов нами проведены экспериментальные исследования, целью которых являлось: изучение процесса механической кольма-



**Рис. 1.** **Схема экспериментальной установки.** 1 – баллон с воздухом; 2 – манометр; 3 – запорное устройство; 4 – камера для блокирующей жидкости; 5 – кернодержатель; 6 – барботажный мерный сосуд; 7 – термостат.

тации в образцах с широким диапазоном проницаемости, соответствующим коллекторам газовых месторождений и подземных хранилищ газа; выявление кольтматирующей способности различных буровых и специальных растворов и блокирующей пасты.

В качестве проницаемых образцов использовались искусственные цементно-песчаные безглинистые керны с различной проницаемостью изготавливаемые по специальной технологии [5]. Для исключения химической кольтматации, материал кернов не содержал набухающего вещества (глины). В качестве буровых растворов использовались различные ингибированные глинистые растворы (утяжелённый, загущённый, естественные водные суспензии из скважин), безглинистые полимерные, а также техническая вода. Для моделирования процесса кольтматации продуктивного пласта при бурении и ремонте скважин, а также раскольтматации его при освоении скважины нами была создана специальная экспериментальная установка, представленная на рисунке 1.

Установка включает камеру с исследуемой жидкостью и кернодержатель. Причём, кернодержатель выполнен конусным для предотвращения прорыва жидкости по поверхности контакта керна с кернодержателем. Величина давления, которая создавалась на исследуемую жидкость, равна репрессии, возникающей в скважине при бурении и цементировании (в соответствии с требованиями правил безопасности в нефтяной и газовой промышленности [6]).

Давление поддерживалось до момента стабилизации фильтрационных процессов. Этот момент фиксировался по факту установившейся скорости фильтрации, определяемой постоянной величиной отношения объёма филь-

трата ко времени его истечения. В данной установке объём фильтрата измерялся волнометрически, а начало и конец фильтрации выявлялись по барботажу воздуха в мерном стакане с водой.

Процесс освоения скважины моделировался переключением баллона сжатого воздуха на керн со стороны «пласта», как показано на рис. 1. Камера с жидкостью сообщалась с атмосферой через мерный стакан с водой, давление повышалось до тех пор, пока сжатый воздух не обнаруживался со стороны исследуемой жидкости. Этому моменту соответствует давление прорыва воздуха сквозь закольцованный керн. Затем определялась остаточная проницаемость керна по стандартной методике [7]. Показателем степени кольматирующей способности исследуемых жидкостей на керн принят коэффициент восстановления проницаемости  $\beta$  [8], определяемый по формуле:

$$\beta = (K_g / K_o) \cdot 100 \%$$

где  $K_g$  – коэффициент проницаемости керна после его взаимодействия с технологическими жидкостями;  
 $K_o$  – коэффициент начальной проницаемости керна.

Результаты экспериментов представлены в таблице 1 и на рисунке 2.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализируя зависимости коэффициента  $\beta$  от начальной проницаемости, можно условно выделить четыре зоны.

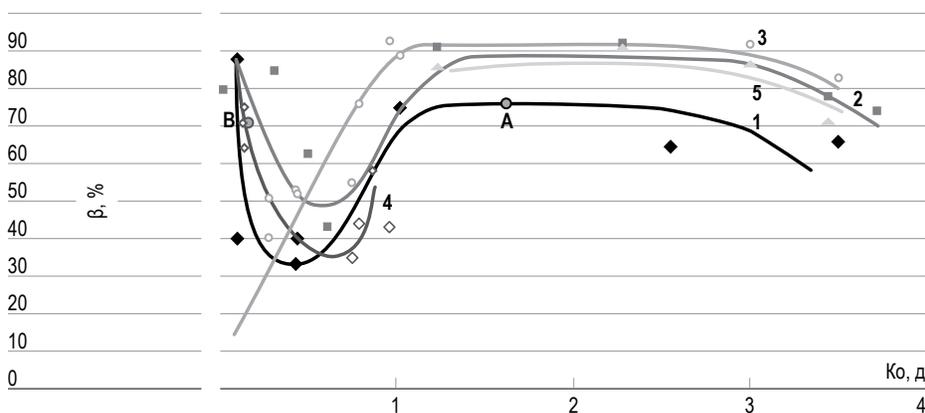
**Первая зона ( $K_o \leq 04$ ):** при относительно низкой начальной проницаемости керна и воздействии глинистым раствором коэффициент восстановления  $\beta$  весьма высок и снижается по мере увеличения  $K_o$ . Это объясняется тем, что в диапазоне малых величин проницаемости размеры пор керна малы по отношению к частицам твердой фазы глинистого раствора. Глинистая корка создает экран для проникновения жидкой фазы (воды) раствора в образец в соответствии с описанным в [9]. Чем больше размер пор, тем интенсивнее проникает фильтрат в породу, а для газовых пластов его можно считать механическим кольматантом.

Для подтверждения сказанного нами были проведены опыты по фильтрации чистой воды. Согласно кривой 3 (воды) на рис. 2 снижение проницаемости наибольшее, а коэффициент восстановления  $\beta$  тем меньше, чем ниже начальная проницаемость керна. Естественно, что это связано с отсутствием глинистой корки и высокой проникающей способностью чистой воды.

Очевидно, в этом случае кольматация осуществляется за счёт сил поверхностного натяжения и образованием связанной воды. Эта вода (равно как

Таблица 1. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ  
НА ПРОНИЦАЕМОСТЬ ИСКУССТВЕННОГО ПЕСЧАНИКА

Технологическая жидкость	№ образца	t °С водной бани	Репрессия, МПа	Давление прорыва, МПа	K <sub>о</sub> , мкм <sup>2</sup>	K <sub>б</sub> , мкм <sup>2</sup>	β	Примечание
Вода	11а	20	0	—	0,28	0,143	51	
	16а	20	0	—	0,43	0,23	53	
	15а	20	0	—	0,44	0,23	52	
	4а	20	0	—	0,75	0,416	55	
	6а	20	0	—	0,79	0,602	76	
	9а	20	0	—	0,96	0,89	93	
	2-а	20	0	—	1,02	0,906	89	
	14а	20	0	—	3,0	2,77	92	
	12а	20	0	—	3,5	2,9	83	
Глинистый р-р	1	70	3,5	0,2	0,1	0,088	88	
	2	70	3,5	0,208	1,02	0,767	75	
Блокир. жид. + мел + целлотон	3	70	3,5	0,056	0,135	0,096	71	мел, целлотон мел, целлотон
	4	70	3,5	0,096	0,75	0,26	35	
	5	70	3,5	0,2	0,865	0,5	58	
Блок. жид. + целлотон	6	70	3,5	0,08	0,79	0,345	44	
целлотон	7	70	3,5	0,2	0,138	0,104	75	
Эмульсия+	8	70	3,5	0,032	0,146	0,093	64	
целлотон	9	70	3,5	0,072	0,96	0,417	43	
Гель (СУБР)	10	70	3,5	—	0,16	0,113	71	
АРНК	11	70	6	0,128	0,28	0,025	9	
Буровой р-р	12	70	3,5	0,046	3,5	2,3	66	ρ = 1,59 г/см <sup>3</sup> В = 4,4см <sup>3</sup> /30 мин Т = 45 с
	13	70	3,5	0,08	0,1	0,04	40	
	14	70	3,5	0,035	3,0	2,6	87	
	15	70	3,5	0,05	0,44	0,176	40	
	16	70	3,5	0,056	0,43	0,141	33	
	17	30	2,1	0,3	3,72	1,9	74,2	
	18б	30	2,1	0,07	1,23	1,12	91	
	19	20	3,78	0,02	2,55	1,65	64,5	
	ГРК	20	20	3,78	0,03	1,62	1,27	
18в	30	3,78	0,04	1,23	1,056	85,8		
Буровой р-р	21б	20	2,1	0,025	2,28	2,103	92,3	
ГРК	21в	20	3,78	0,04	2,28	2,07	90,8	
Буровой раствор	22	30	3,78	0,015	2,47	1,66	67	
	23б	20	2,1	0,04	3,44	2,68	78	
ГРК	23в	20	3,78	0,05	3,44	2,45	71,3	
Вода	24	20	0	—	0,10	0,014	14	
	25	20	0	—	0,18	0,04	22	
	26	20	0	—	0,28	0,112	40	
Буровой раствор	27	20	2,1	0,09	0,01	0,008	80	ρ = 1,59 г/см <sup>3</sup> В = 4,4см <sup>3</sup> /30 мин Т = 45 с
	28	20	2,1	0,07	0,309	0,264	85	
	29	20	2,1	0,08	0,613	0,264	43	
	30	20	2,1	0,075	0,505	0,315	0,32	



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента восстановления газопроницаемости от начальной газопроницаемости искусственного керна. 1 – глинистый раствор, 2 – глинистый раствор при  $\Delta P = 2$  МПа, 3 – вода, 4 – инертно-блокирующий раствор, 5 – ГРК, В – безглинистый раствор, А – ГРК на чистый образец (не указанные репрессии составляют – 3,5–4 МПа).

и фильтрат) плохо вытесняются из пор малого размера, тем более маловязким газовым агентом. В лучшем случае газ прорывается локально, образуя фильтрационные каналы туннельного типа. Безглинистый раствор (точка В на рис. 2) не проникает в породу за счет своих реологических свойств, поэтому при малой проницаемости этот раствор можно принимать слабо кольтатирующим.

**Вторая зона ( $0,4 \leq K_0 \leq 1$  мкм<sup>2</sup>):** по мере увеличения начальной проницаемости керна коэффициент  $\beta$  для всех жидкостей возрастает. Это объясняется тем, что с увеличением  $K_0$  существенно снижается сила поверхностного натяжения фильтрата и воды. Снижение количества остаточной жидкости облегчает процесс вытеснения её газом. Кривая 4 на рис. 2 иллюстрирует высокую кольтатирующую способность инертно-блокирующего раствора, который по своей сути является химически нейтральным к материалу коллектора, но он содержит твёрдую фазу, например мел, который аналогично глине придаёт раствору тиксотропные свойства. Незначительное проникновение такого раствора в пласт вызывает видимо механическую кольтатацию оказывая определённые сопротивления движению газа в обратном направлении, который прорывает его локально, а не по всей поверхности фильтрации. В первой зоне при  $K_0 \leq 0,4$  мкм<sup>2</sup>.

**Третья зона ( $1 \leq K_0 \leq 03$ ):** при высокой начальной проницаемости керна отмечается стабилизация коэффициента  $\beta$ . Незначительное (10–15)% общее снижение  $\beta$  связано лишь с проявлением смачиваемости породы. Отмечается лишь влияние высоких перепадов давлений – репрессии.

**Четвертая зона ( $K_0 \leq 03$ ):** при весьма большой начальной проницаемости, отмечается тенденция к снижению коэффициента  $\beta$ , что объясняется проникновением бурового раствора в керн, включая его твёрдую фазу. Отмеченное находится в соответствии с выводами [8]. Важно отметить, что при освоении закольматированных кернов давление прорыва всегда было незначительным по сравнению с приложенными репрессиями и составляло 0,2 МПа. Это свидетельствует о поверхностной кольматации при малой и средней проницаемости керна и лёгком вытеснении воды (фильтрата) газом в высокопроницаемой породе. Точка А, принадлежащая такому же составу, как и на кривой 5 и при той же репрессии, располагается ниже, на уровне кривой 1, что говорит об интенсивной кольматации керна, не имеющего глинистой корки.

### ВЫВОДЫ

Результаты проведённых экспериментов позволили сделать следующие выводы: кольматирующая способность различных технологических жидкостей разнообразна и зависит от начальной проницаемости коллектора. Для исследуемых типов жидкостей интенсивная кольматация газосодержащих пород наблюдается в диапазоне от 0,1 до 1 мкм<sup>2</sup> естественной (начальной) проницаемости; вода для газовых пластов является механическим кольматантом; в результате фильтрации бурового раствора в проницаемый пласт образуемая на стенке скважины глинистая корка оказывает сдерживающий эффект на дальнейшее проникновение фильтрата бурового раствора в пласт; инертно-блокирующие растворы эффективны лишь при естественной проницаемости песчаника меньше 0,4 мкм<sup>2</sup>.

Полученные результаты дают возможность обосновать технологические решения, принимаемые в рамках основной стратегии регулирования фильтрационных свойств пласта в околоскваженной зоне – сведение к минимуму ухудшения проницаемости пласта путем подбора современных технологий вскрытия пласта, освоения и эксплуатации скважин, а также их капитального ремонта. Объединение этих технологий способно обеспечить минимум потерь продуктивности скважин.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гасумов Р.А., Кукулинская Е.Ю. Технологические решения, направленные на ограничение выноса пластового песка из добывающих газовых скважин // Наука. Инновации. Технологии: научный журнал СКФУ. Ставрополь, 2016. № 3. С. 165–177.
2. Тагиров К.М., Гноевых А.Н., Лобкин А.Н. Вскрытие продуктивных нефтегазовых пластов с аномальными давлениями. М.: Недра, 1996. 182 с.
3. Сатаев А.С. Технология гидравлического разрыва пласта с временной кольматацией фильтрационной поверхности разнодисперсными суспензиями: дис. ... канд. техн. наук. М.: 1973, 120 с.

4. Васильченко С.В., Потапов А.Г., Гноевых А.Н. Современные методы исследования проблемы неустойчивости глинистых пород при строительстве скважин. М.: ИРЦ Газпром, 1998. 84 с.
5. Тагиров. К.М., Девятков Е.В., Ниценко А.И. Способ изготовления моделей пород-коллекторов. Ставрополь: СевКавНИПИгаз, 1990. 17 с.
6. Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности. Приказ Ростехнадзора от 12.03.2013 №101 (ред. от 12.01.2015) «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности» (Зарегистрировано в Минюсте России 19.04.2013 № 28222).
7. Данюшевский В.С., Толстых И.Ф., Мильштейн В.М. Справочное руководство по тампонажным материалам. М.: Недра, 1973. 312 с.
8. Соловьёв Е.М. Заканчивание скважин. М.: Недра, 1979. 303 с.
9. Абдулин Ф.С. Повышение производительности скважин. М.: Недра, 1975. 264 с.

#### REFERENCES:

1. Gasumov R. A., Kukulinskaya E. Yu. Tehnologicheskie reshenija, napravlennye na ogranichenie vynosa plastovogo peska iz dobyvajushhih gazovyh skvazhin // Nauka. Innovacii. Tehnologii: nauchnyj zhurnal SKFU (Technological solutions to limit sand production from producing gas wells // Science. Innovations. Technology: journal NCFU). Stavropol, 2016. No. 3. P. 165-177.
2. Tagirov K.M. Gnoevikh A.N., Lobkin A.N. Vskrytie produktivnyh neftegazovyh plastov s anomal'nymi davleniyami (Drilling-in of productive oil-and-gas reservoirs with abnormal pressure). M.:Nedra, 1996. 182 p.
3. Sataev A.S. Tehnologija gidravlicheskogo razryva plasta s vremennoj kol'mataciej fil'tracionnoj poverhnosti raznodispersnymi suspenziyami: Dis. ... kand. tehn. nauk (Technology of formation hydraulic fracturing with temporary mudding of filtration surface by different dispersed suspensions: Dissertation... candidate of engineering sciences). M.: 1973, 120 p.
4. Vasil'chenko S.V., Potapov A.G., Gnoevikh A.N. Sovremennyye metody issledovaniya problemy neustojchivosti glinistykh porod pri stroitel'stve skvazhin (Modern methods of question's research of argillaceous rocks instability when design of wells is realized). M.:IRC Gazprom, 1998. 84 p.
5. Tagirov K.M., Devyatov E.V., Nicenko A.I. Sposob izgotovleniya modelej porod-kollektorov (Method of producing for models of reservoir rocks). Stavropol: SevKavNIPigas, 1990.170 p.
6. Pravila bezopasnosti v nef'tjanoj i gazovoj promyshlennosti. Prikaz Rostehnazora ot 12.03.2013 N 101 (red. ot 12.01.2015) "Ob utverzhdenii Federal'nyh norm i pravil v oblasti promyshlennoj bezopasnosti" (Zaregistrirvano v Minjuste Rossii (Safety instructions in oil-and-gas industry. Russian Technical Supervision Authority Order from 12.03.2013 № 101 (edited from 12.01.2015) «On approval of Federal norms and rules in the sphere of industry safety» (Registered in Ministry of Justice 10.04.2013 № 28222).
7. Danushevsky V.S., Tolstikh I.F., Mil'shtain V.M. Spravochnoe rukovodstvo po tamponazhnym materialam (Reference manual of cementing slurries). M.: Nedra, 1973. 312 p.
8. Solovyov E.M. Zakanchivanie skvazhin (Well completion). M.:Nedra, 1979. 303 p.
9. Abdulin F.S. Povyshenie proizvoditel'nosti skvazhin (Well rate increasing). M.: Nedra, 1975. 264 p.

УДК 551.513.22

**Диденко А. Ю. [Didenko A. Yu.],  
Набродова Е. Г. [Nabrodova E. G.],  
Закинян Р. Г. [Zakinyan R. G.]**

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРУПНОМАСШТАБНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ**

### **Mathematical modeling of large scale atmospheric circulation**

Геострофическое состояние играет чрезвычайно важную роль в динамике атмосферы. В статье приводится анализ геострофического состояния атмосферы, из которого следует возможность нескольких ситуаций. Первая ситуация, когда изобарическая поверхность на полюсе имеет форму сплюснутого геоида, давление уменьшается по сравнению с состоянием статики – имеет место глобальный изобарический минимум, при этом скорость и вихрь скорости в точке полюса равны нулю. Следующая ситуация, при которой изобарическая поверхность имеет форму вытянутого геоида, давление на полюсе увеличивается по сравнению с состоянием статики – имеет место глобальный максимум в этом случае скорость и вихрь скорости в точке полюса так же равен нулю. Так же рассматривается ситуация, когда полюс является особой точкой, скорость геострофического ветра на полюсе не равна нулю, а вихрь скорости стремится к бесконечности.

The geostrophic state plays extremely important role in the dynamics of the atmosphere. In the present article the analysis of the geostrophic state of the atmosphere is performed revealing the possibility of several situations. The first situation is the isobaric surface of the shape of flattened geoid at the pole. In this case pressure decreases in comparison with a static state at the pole, i.e., the global isobaric minimum takes place; at the same time the velocity and the velocity vorticity are equal zero at the pole. Next situation at which the isobaric surface takes the shape of extended geoid. In this case pressure increases in comparison with a static state at the pole, i.e., the global isobaric maximum takes place; the velocity and the velocity vorticity are also equal zero at the pole. The situation when the pole is a special point is also considered; the geostrophic wind velocity is nonzero and velocity vorticity tends to infinity in this case.

**Ключевые слова:** динамика атмосферы, геострофическое состояние атмосферы, атмосферная циркуляция, полярный вихрь, геострофический ветер.

**Key words:** dynamics of the atmosphere, geostrophic state of the atmosphere, atmospheric circulation, polar vortex, geostrophic wind.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Исследуется вопрос о форме возмущенной изобарической поверхности в геострофическом состоянии атмосферы. Показано, что в зависимости от знака перегрева воздуха на экваторе в геострофическом состоянии атмосферы изобарическая поверхность имеет форму сплюснутого или вытянутого геоида. Причем, если скорость геострофического ветра на полюсе отлична от нуля, то на полюсе в сплюснутом геоиде образуется локальный барический минимум, а в вытянутом геоиде – локальный барический максимум. Этим объясняется существование полярных вихрей и антициклонов. Другими словами, барический минимум и максимум на полюсе являются

особенностями геострофического состояния атмосферы. Установлено, что вихрь скорости стремится к бесконечности у *полюсов*. Этим объясняется то, что полярные вихри являются устойчивыми образованиями.

Показано, что для возникновения зонального западного переноса воздух должен быть холоднее окружающей атмосферы. Для теплой воздушной массы будет наблюдаться только восточный ветер. Установлено, что в зависимости от изменения горизонтального градиента температуры с высотой при адвекции тепла и холода может наблюдаться как левый, так и правый поворот геострофического ветра, в отличие от общепринятого мнения, согласно которому с правым поворотом ветра в свободной атмосфере связана адвекция тепла, с левым поворотом – адвекция холода.

Цель статьи – выяснить, хотя бы качественно, форму возмущенной изобарической поверхности в геострофическом состоянии атмосферы.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как известно, геострофическое состояние играет чрезвычайно важную роль в динамике атмосферы. Анализ оценок величин, входящих в уравнение динамики атмосферы (анализ масштабов), позволяет записать следующие выражения для проекций скорости геострофического ветра [1, 3]:

$$u_g = -\frac{1}{2\omega_0\rho_e \sin\varphi} \frac{\partial p_s}{\partial y}, \quad (1)$$

$$v_g = \frac{1}{2\omega_0\rho_e \sin\varphi} \frac{\partial p_s}{\partial x}. \quad (2)$$

Здесь  $u_g$  – проекция геострофического ветра вдоль параллели (вдоль оси  $x$ );  
 $v_g$  – проекция геострофического ветра вдоль меридиана (вдоль оси  $y$ );  
 $\omega_0$  – угловая скорость вращения Земли;  
 $\rho_e$  – плотность воздуха в состоянии статики атмосферы;  
 $\varphi$  – широта места;  
 $p_s$  – возмущение давления относительно состояния статики атмосферы.

Таким образом, зная возмущенную изобарическую поверхность, можно определить значение скорости геострофического ветра. Но, как замечено в [3], вопрос о форме возмущенной изобарической поверхности остается открытым.

При получении формулы (1) и (2) были приняты следующие допущения: вертикальная скорость намного меньше горизонтальных проекций ско-

рости  $w \ll u, v$ , уравнение движения в проекции на вертикальное направление сводится к уравнению статики атмосферы.

Есть еще одно обстоятельство, которое заставляет нас обратить более пристальное внимание к геострофическому состоянию атмосферы. Речь идет об известном явлении, которое носит название полярный вихрь. Как известно, полярный вихрь – это постоянный крупномасштабный циклон, расположенный около обоих из географических полюсов Земли. Естественно возникает вопрос: полярный вихрь есть следствие возмущения геострофического состояния атмосферы, вызванное неоднородным прогревом Земли от экватора к полюсу, или он является формой существования самого геострофического состояния атмосферы. Проведенный в данной работе анализ показывает, что барический минимум на полюсе является одним из признаков геострофического состояния атмосферы.

Хотя полярные вихри – это обычно наблюдаемая особенность состояния атмосферы, и время их жизни может быть более одного месяца, о механизмах, которые управляют их формированием и развитием, известно мало.

Согласно общепринятой точке зрения полярный вихрь есть следствие возмущения геострофического состояния, а не является особенностью самого геострофического состояния атмосферы.

Запишем уравнение динамики атмосферы в векторном виде [1–4]:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = \mathbf{g}_0 - \frac{1}{\rho_i} \nabla p + 2[\mathbf{v} \boldsymbol{\omega}_0] + \omega_0^2 \mathbf{R} + \mathbf{f}_{\text{тр}}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{g}_0$  – ускорение силы тяготения;  
 $\nabla p$  – градиент давления;  
 $2[\mathbf{v} \boldsymbol{\omega}_0]$  – ускорение Кориолиса;  
 $\omega_0^2 \mathbf{R}$  – центробежное ускорение,  
 $\mathbf{f}_{\text{тр}}$  – удельная сила трения (the frictional force per unit mass);  
 $\rho_i$  – плотность движущегося воздуха, в общем случае отличная от плотности  $\rho_e$  в состоянии статики.

Здесь система координат связана с поверхностью Земли, ось абсцисс направлена вдоль параллели, ось ординат направлена вдоль меридиана, а ось аппликат – перпендикулярно поверхности Земли.

В состоянии статики атмосферы, когда  $\mathbf{v} = 0$ , уравнение запишется в виде

$$0 = \mathbf{g}_0 - \frac{1}{\rho_e} \nabla \bar{p} + \omega_0^2 \mathbf{R}. \quad (4)$$

Удобнее ввести вектор ускорения силы тяжести (ускорение свободного падения), равный векторной сумме ускорения силы тяготения  $\mathbf{g}_0$  и центробежного ускорения:

$$\mathbf{g} = \mathbf{g}_0 + \omega_0^2 \mathbf{R}. \quad (5)$$

Таким образом, геоидальная поверхность Земли перпендикулярна ускорению силы тяжести  $\mathbf{g}$ . Тогда уравнение статики атмосферы запишется в виде

$$0 = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho_e} \nabla \bar{p}. \quad (6)$$

Отсюда следует, что в состоянии статики изобарические поверхности перпендикулярны вектору ускорения свободного падения, то есть параллельны геоидальной поверхности Земли. Эти изобарические поверхности принимаются в качестве невозмущенного состояния атмосферы. Заметим, что часто невозмущенную изобарическую поверхность в состоянии статики приближенно представляют в виде сферы. В действительности же они подобны геоиду [2].

При установившемся движении  $d\mathbf{v}/dt = 0$  изобарические поверхности, имеющие геоидальную форму, возмущаются, поэтому давление можно представить в виде [3]

$$p = \bar{p} + p_s. \quad (7)$$

Аналогично, плотность воздуха в приближении Буссинеска представим в виде [3]

$$\rho_i = \rho_e (1 - \alpha \Delta T), \quad (8)$$

где  $\Delta T$  – функция перегрева, которая при движении теплой воздушной массы положительна, а при движении холодной воздушной массы – отрицательна. Поэтому уравнение установившегося движения в отсутствии трения  $\mathbf{f}_{\text{тр}} = 0$  запишется в следующем виде:

$$0 \approx -\alpha \Delta T \mathbf{g} - \frac{1}{\rho_e} \nabla p_s + 2[\mathbf{v} \boldsymbol{\omega}_0]. \quad (9)$$

Проекция угловой скорости вращения Земли определяются выражениями [3]:

$$\omega_{0x} = 0, \quad \omega_{0y} = \omega_{0z} \cos \varphi, \quad \omega_{0z} = \omega_0 \sin \varphi. \quad (10)$$

Запишем проекции уравнения движения в стационарном состоянии (9) в системе координат, в которой горизонтальная плоскость является касательной к геоиду:

$$0 = -\frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p_s}{\partial x} + 2v\omega_0 \sin \varphi - 2w\omega_0 \cos \varphi, \quad (11)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p_s}{\partial y} - 2u\omega_0 \sin \varphi, \quad (12)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p_s}{\partial z} + \alpha \Delta T g + 2u\omega_0 \cos \varphi \quad (13)$$

Ускорение свободного падения в последнем уравнении равно

$$g = g_0 - R_E \omega_0^2 \cos^2 \varphi.$$

Третье слагаемое в уравнении (11) представляет собой произведение вертикальной составляющей скорости движения воздуха на горизонтальную проекцию угловой скорости вращения Земли.

Таким образом, мы видим, что для получения формул (1) и (2), можно сделать два допущения: или пренебречь вертикальной скоростью, или пренебречь горизонтальной проекцией угловой скорости вращения Земли. Хотя оба допущения приводят к формулам для проекций скорости геострофического ветра, они не равнозначны. В геострофической модели атмосферы из анализа оценок величин, входящих в уравнение (3), в приближении тонкой атмосферы (Thin-Layer Approximations) делается заключение, что для динамики атмосферы существенна только нормальная к поверхности Земли компонента угловой скорости ее вращения. Поэтому третьим слагаемым в уравнениях (11) и (13) пренебрегают [3].

О важной роли горизонтальной проекции угловой скорости вращения Земли в динамике атмосферы говорится в статье А.А. White and R.A. Bromley [6].

Поэтому можно сказать, что геострофическое состояние атмосферы это такое ее установившееся состояние, при котором пренебрегается силами вязкого трения и вертикальной скоростью. Тогда мы приходим к формулам (1) и (2), описывающим геострофическое состояние атмосферы. Но дополнительно к анализу геострофического состояния атмосферы добавится уравнение (13).

Собственно, цель статьи сводится к тому, чтобы выяснить, что нового по отношению к традиционному подходу к описанию геострофического состояния может дать уравнение (13).

Таким образом, отличие нашего определения геострофического состояния атмосферы от общепринятого заключается в использовании уравнения (13). Как правило [1, 2, 3], третьим уравнением, входящим в систему уравнений, описывающих геострофическое состояние, является уравнение статики

атмосферы. Это связано с тем, что слагаемые уравнения (13) на много порядков меньше членов, входящих в уравнение статики атмосферы. Однако, как видно из вывода формул (11) – (13), геострофическое состояние является возмущением относительно статики атмосферы. Поэтому, на наш взгляд, не корректно рассматривать возмущения относительно статики в первых двух уравнениях и игнорировать их в третьем уравнении.

Тогда из системы (11) – (13) получаем горизонтальные проекции скорости геострофического ветра:

$$u_g = -\frac{1}{2\omega_0 \rho_e \sin \varphi} \frac{\partial p_s}{\partial y}, \quad (14)$$

$$v_g = \frac{1}{2\omega_0 \rho_e \sin \varphi} \frac{\partial p_s}{\partial x}, \quad (15)$$

$$u_g = \frac{1}{2\omega_0 \rho_e \cos \varphi} \frac{\partial p_s}{\partial z} - \frac{\alpha g}{2\omega_0 \cos \varphi} \Delta T. \quad (16)$$

Векторное и скалярное умножение уравнения (9) на  $\mathbf{k}$ , дадут два выражения для вектора скорости геострофического ветра:

$$\mathbf{v}_g = \frac{1}{2\omega_0 \rho_e (\mathbf{k}, \mathbf{k}_0)} [\mathbf{k}, \nabla p_s], \quad (17)$$

где  $\mathbf{k}$  – единичный вектор, направленный вертикально вверх по направлению оси  $z$ , перпендикулярной геоидальной поверхности Земли;

$\mathbf{k}_0$  – единичный вектор, направленный по направлению угловой скорости вращения Земли.

Отсюда видно, что геострофический ветер перпендикулярен градиенту давления, а значит, направлен вдоль изобарической поверхности.

Формулы (14) и (15) можно было получить непосредственно из выражения (17).

Рассмотрим частный случай, когда  $\partial p_s / \partial x = 0$ , а  $-\partial p_s / \partial y > 0$ , вдоль оси  $y$  возмущение давления при установившемся движении будет падать в направлении от экватора к полюсу (в глобальном масштабе это наблюдается в атмосфере). В этом случае геострофический ветер будет направлен с запада на восток, т.е. будет наблюдаться западный поток.

Из (14) и (16) следует, что для возникновения зонального западного переноса теплого воздуха должно выполняться условие:

$$\frac{\partial p_s}{\partial z} > \alpha \Delta T \rho_e g, \quad (18)$$

а градиенты возмущения давления должны подчиняться соотношению:

$$\Delta T = \frac{1}{\rho_e \alpha g} \cdot \left( \frac{\partial p_s}{\partial z} + \text{ctg} \varphi \frac{\partial p_s}{\partial y} \right). \quad (19)$$

Отсюда следует, что для существования западного переноса теплого воздуха вертикальный градиент возмущения давления должен быть положительным и больше определенного значения:

$$\frac{\partial p_s}{\partial z} > -\text{ctg} \varphi \frac{\partial p_s}{\partial y}, \quad -\frac{\partial p_s}{\partial y} > 0. \quad (20)$$

Если это условие не выполняется, то для теплой воздушной массы будет наблюдаться только восточный ветер (с востока на запад), а в восточном направлении будет перемещаться холодный воздух. Это также будет иметь место если  $\partial p_s / \partial z \leq 0$ .

Другими словами, если допустить, что геострофическому состоянию атмосферы соответствует определенная форма изобарической поверхности, которая требует еще своего нахождения, то при данной форме изобарической поверхности теплый воздух будет двигаться на запад, а холодный воздух будет двигаться на восток.

Из формул (14) – (16) следует, что градиент возмущения давления

$$\nabla p_s = \left( \frac{\partial p_s}{\partial x}, \frac{\partial p_s}{\partial y}, \frac{\partial p_s}{\partial z} \right)$$

имеет в общем случае все три, не равные нулю, компоненты. Поэтому, если в состоянии статики ( $\nabla \bar{p} = \rho_e \mathbf{g}$ ) () градиент давления направлен вдоль  $\mathbf{g}$ , то в геострофическом состоянии, в общем случае произвольной точки поверхности Земли, градиент полного давления

$$\nabla p = \nabla \bar{p} + \nabla p_s, \quad (21)$$

будет отклонен от направления  $\mathbf{g}$ , а изобарическая поверхность будет уже не перпендикулярна  $\mathbf{g}$ , а составлять с ним некоторый угол. В зависимости от знаков компонент градиента возмущения давления градиент полного давления может быть отклонен от направления  $\mathbf{g}$ , как в сторону от направления оси вращения Земли, так и в сторону к оси вращения. Первый случай приведет к тому, что изобарическая поверхность будет еще более сплюснута у полюсов, чем в состоянии статики. Другими словами, если в состоянии статики изобарические поверхности имеют геоидальную форму (параллельны поверхности Земли), то в геострофическом состоянии изобарические поверхности более сплюснуты у полюсов по отношению к изобарическим поверхностям в состоянии статики. Назовем такую поверхность для краткости изложения

*сплюснутым геоидом*. В этом случае давление у полюсов будет меньше, чем в состоянии статики. Наоборот, второй случай приведет к тому, что изобарическая поверхность у полюсов будет более вытянута вдоль оси вращения Земли по отношению к изобарическим поверхностям в состоянии статики. Назовем такую поверхность для краткости *вытянутым геоидом*. В этом случае давление у полюсов будет больше, чем в состоянии статики.

Сказанное выше относится к произвольным точкам поверхности Земли, за исключением точек экватора и полюсов, так как эти точки являются особыми в данной задаче и требуют отдельного рассмотрения.

Начнем с точек экватора. Для этого запишем векторное уравнение (9), верное для любой точки поверхности Земли, в проекциях на оси координат в системе отсчета, начало которой находится на экваторе, ось  $x$  направлена по касательной к экватору, ось  $y$  – по касательной к меридиану (по направлению к северному полюсу), ось  $z$  – перпендикулярно поверхности Земли. В этом случае, если пренебречь вертикальной составляющей скорости, получим:

$$\frac{\partial p_s}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial p_s}{\partial y} = 0, \quad (22)$$

$$u_g = \frac{1}{2\omega_{0y}} \left( \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p_s}{\partial z} - g\alpha\Delta T \right). \quad (23)$$

Здесь для экватора  $\omega_{0y} = \omega_0$ , все остальные составляющие угловой скорости на экваторе равны нулю. Замечаем, что уравнение (23) совпадает с уравнением (16). Это дополнительно говорит о важности этого уравнения для анализа геострофического состояния атмосферы. Таким образом, из уравнений (22) и (23) следует, что направление градиента полного давления  $\nabla p$  совпадает с направлением  $\nabla \bar{p}$ . Другими словами, на экваторе изобарическая поверхность перпендикулярна  $\mathbf{g}$ , а значит, параллельна геоидальной поверхности в состоянии статики.

Из уравнений (22) и (23) следует, что на экваторе имеет место только одна составляющая геострофического ветра, направленная вдоль экватора. Из уравнения (23) видно, что эта составляющая скорости геострофического ветра будет положительна, т.е. направлена по направлению вращения Земли, если выполняется условие

$$\frac{\partial p_s}{\partial z} > \rho_e g \alpha \Delta T.$$

Если же допустить, что  $\partial p_s / \partial z = 0$ , то из уравнения (23) следует, что теплый воздух ( $\Delta T > 0$ ) будет двигаться в отрицательном направлении (восточном, против направления вращения Земли), а холодный воздух будет двигаться в положительном направлении.

В любой бесконечно близкой к экватору вдоль меридиана точке, согласно уравнению (15), имеет место также и составляющая скорости вдоль меридиана. Для определенности положим, что  $v_g > 0$ . Если попытаться провести «линию тока», касательная к которой совпадает с направлением геострофического ветра в данной точке, то мы должны заключить, что касательная к этой линии на экваторе направлена вдоль экватора.

Здесь надо сделать замечание. Хотя «линия тока» представляет собой некоторую кривую линию, мы не можем в рамках геострофического рассмотрения говорить о движении вдоль кривой линии. Это следует из определения геострофического состояния, как состояния, в котором ускорение равно нулю, а значит, движение может происходить только прямолинейно и с постоянной скоростью. Другими словами, мы можем говорить о геострофическом состоянии только локально, в данной конкретной точке, а не представлять себе движение вдоль поверхности Земли.

Таким образом, получается следующая картина. Исходя из непрерывности движения, можно заключить, что теплый воздух на экваторе, начиная движение в отрицательном направлении, продолжает «движение» по спирали (по часовой стрелке) до северного полюса. Аналогично, холодный воздух на экваторе будет «начинать движение» в положительном направлении и «двигаться» по спирали (против часовой стрелки) также до северного полюса. Кавычки поставлены по указанной выше причине, что в рамках геострофического рассмотрения мы не можем говорить о движении вдоль кривой линии. Мы можем говорить лишь о направлении геострофического ветра локально в каждой точке.

Возникает вопрос, какой вид имеет изобарическая поверхность на северном полюсе? Для ответа выберем декартову систему координат, так чтобы начало координат лежало на полюсе, а ось  $Oz_1$  была направлена вдоль оси вращения, а оси  $Cx_1$  и  $Cy_1$ , параллельны, соответственно, осям  $Cx_0$  и  $Cy_0$ , где  $C$  – центр Земли.

На северном полюсе расстояние от оси вращения до начала отсчета равно нулю  $\mathbf{R} = 0$ , поэтому уравнение движения атмосферы, если  $\Delta T \neq 0$ , запишется в виде

$$-\alpha \Delta T \mathbf{g}_0 - \frac{1}{\rho_e} \nabla p_s \Big|_0 + 2 [\mathbf{v}_g \boldsymbol{\omega}_0] = 0. \quad (24)$$

Запишем это уравнение в проекциях, учитывая, что  $2 [\mathbf{v} \boldsymbol{\omega}_0]_{z_1} = 0$ :

$$-\frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p_s}{\partial x_1} \Big|_0 + 2v_g \omega_0 = 0, \quad (25)$$

$$-\frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p_s}{\partial y_1} \Big|_0 - 2u_g \omega_0 = 0, \quad (26)$$

$$\alpha \Delta T g_0 - \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p_s}{\partial z_1} = 0. \quad (27)$$

Отсюда видно, что все три проекции градиента возмущения давления  $\nabla p_s$  в общем случае отличны от нуля и скорость геострофического ветра также отлична от нуля. Поэтому, если в состоянии статики на полюсе  $\nabla \bar{p} = \rho_e \mathbf{g}_0$ , т.е. градиент давления на северном полюсе направлен вдоль  $\mathbf{g}_0$ , то в геострофическом состоянии градиент полного давления  $\nabla p = \nabla \bar{p} + \nabla p_s$ , будет отклонен от направления  $\mathbf{g}_0$ , а изобарическая поверхность будет уже не перпендикулярна оси вращения, а составлять с ним некоторый угол.

Определим форму возмущенной изобарической поверхности на полюсе в случае отсутствия перегрева ( $\Delta T = 0$ ).

Как видно из формул (25) – (26), возможны два различных варианта. Первый вариант – скорость геострофического ветра на полюсе равна нулю. Тогда компоненты вектора градиента возмущения давления по осям  $x$  и  $y$  также равны нулю. В этом случае имеем описанный выше случай двух форм возмущенной изобарической поверхности: в виде сплюснутого или вытянутого геоида.

Если допустить, что низкому давлению на полюсе при сплюснутом геоиде соответствует циклональное движение, то можно заключить, что в этом случае холодный воздух начинает «движение» с экватора против часовой стрелки по спирали до северного полюса, где скорость геострофического ветра становится равной нулю.

Аналогично, можно заключить, что вытянутому геоиду соответствует случай, когда теплый воздух с экватора начинает «движение» по часовой стрелке по спирали до полюса, где также скорость его становится равной нулю.

Второй вариант – скорость геострофического ветра на полюсе отлична от нуля. В этом случае компоненты вектора градиента возмущения давления по осям  $x$  и  $y$  отличны от нуля. Это приводит к тому, что вектор градиента возмущения давления  $\nabla p_s$  составляет с вектором градиента давления в состоянии статики  $\nabla \bar{p}$  прямой угол. В результате, результирующий вектор градиента давления  $\nabla p$  отклоняется от вертикали, т.е. от вектора  $\nabla \bar{p}$ . Такое расположение результирующего вектора градиента давления приводит к тому, что изобарическая поверхность на полюсе возмущается и не перпендикулярна оси вращения.

Из формул (25) – (26) нельзя однозначно сказать, какой тип возмущения будет наблюдаться на полюсе. Ясно только одно, что полюс это особая точка в смысле гладкости функции, описывающей изобарическую поверхность.

Поэтому возможны следующие варианты. Первый вариант, когда изобарическая поверхность имеет форму сплюснутого геоида, а на полюсе имеет место или минимум, или максимум. Второй вариант, аналогично, изобари-

ческая поверхность имеет форму вытянутого геоида, а на полюсе имеет место минимум или максимум.

Но, если положить, что барическому минимуму соответствует циклональное движение, а барическому максимуму антициклональное движение, то из непрерывности движения мы должны исключить случаи, когда на полюсе сплюснутого геоида имеет место барический максимум, а на полюсе вытянутого геоида – барический минимум.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, мы получаем следующую картину. Когда на экваторе перегрев положительный, то изобарическая поверхность имеет форму вытянутого геоида, а теплый воздух «движется» по часовой стрелке по спирали до полюса, где имеет место локальный максимум и скорость ветра на полюсе имеет конечное значение. Когда же на экваторе перегрев отрицательный, то изобарическая поверхность имеет форму сплюснутого геоида, а холодный воздух «движется» против часовой стрелки по спирали до полюса, где имеет место локальный минимум и скорость ветра на полюсе имеет конечное значение.

Рассмотрим, как влияет перегрев на форму изобарической поверхности.

Начнем со случая, когда скорость геострофического ветра на полюсе равна нулю. Как видно из формулы (27), при положительном перегреве ( $\Delta T > 0$ ) вертикальная компонента градиента возмущения давления положительна  $\partial p_s / \partial z > 0$  и направлена противоположно  $\nabla \bar{p}$ , поэтому результирующий градиент давления уменьшается. Это приводит к тому, что расстояние между изобарическими поверхностями при положительном перегреве увеличивается. Если же перегрев отрицательный ( $\Delta T < 0$ ), то  $\partial p_s / \partial z < 0$ , результирующий градиент давления увеличивается. Это приводит к тому, что расстояние между изобарическими поверхностями на полюсах уменьшается.

Теперь перейдем к случаю, когда геострофический ветер на полюсах отличен от нуля.

Если перегрев отрицательный ( $\Delta T < 0$ ), то из формул (25) – (27) следует, что градиент возмущения давления  $\nabla p_s$  составляет с направлением градиента в состоянии статики  $\nabla \bar{p}$  (или  $\mathbf{g}_0$ ) острый угол, так как вертикальная составляющая  $\partial p_s / \partial z$  направлена вниз. Поэтому результирующий вектор  $\nabla p$  будет направлен по диагонали параллелограмма, составленного из этих двух векторов. При этом результирующий вектор  $\nabla p$ , также как и в случае, когда  $\Delta T > 0$ , отклонен от направления  $\nabla \bar{p}$  (вертикали), но уже на меньший угол. Это приведет к тому, что изобарическая поверхность на полюсе будет иметь барический минимум (барический максимум мы исключаем, как было указано выше, из соображений непрерывности), но он уже будет более пологий. Другими словами, отрицательный перегрев ослабляет глубину барического минимума.

Если же перегрев положительный ( $\Delta T > 0$ ), то угол между вектором градиента возмущения давления и вектором  $\nabla \bar{p}$  будет больше 90 градусов. Поэтому в этом случае отклонение результирующего вектора  $\nabla p$  от направления  $\mathbf{g}_0$  еще больше отклонится, по сравнению с предыдущими случаями. Другими словами, положительный перегрев делает выше барический максимум.

Для дальнейшего анализа изобарической поверхности применим уравнение неразрывности к геострофическому ветру, получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_g}{\partial x} + \frac{\partial v_g}{\partial y} &= \frac{1}{2\omega_0} \left\{ \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\rho \sin \varphi} \frac{\partial p_s}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho \sin \varphi} \frac{\partial p_s}{\partial y} \right) \right\} = \\ &= -\frac{1}{2\omega_0 \rho \sin \varphi} \left\{ \frac{\partial p_s}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \operatorname{ctg} \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) - \frac{\partial p_s}{\partial y} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \operatorname{ctg} \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \right\} = 0. \quad (28) \end{aligned}$$

Так как  $\partial \varphi / \partial x = 0$ , то получим

$$\frac{\partial p_s}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \operatorname{ctg} \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_s}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0. \quad (29)$$

Отсюда следует, что для геострофического режима атмосферы, необходимо выполнение следующих условий:

$$\left( \frac{\partial p_s / \partial x}{\partial p_s / \partial y} \right)_g = \left( \frac{dy}{dx} \right)_g = \frac{\frac{\partial \ln \rho_e}{\partial x}}{\frac{\partial \ln(\rho_e \sin \varphi)}{\partial y}}. \quad (30)$$

Следовательно, тангенс угла наклона между касательной к изобаре и параллелью определяется горизонтальными градиентами плотности воздуха по параллели и меридиану. В состоянии статики атмосферы  $\partial \ln \rho_e / \partial x = 0$ . Поэтому, если предположить, что и в геострофическом состоянии имеет место выражение:  $(dy/dx) = 0$ . Отсюда следует, что возмущенная изобарическая поверхность в геострофическом состоянии имеет симметричный относительно оси вращения вид.

Если допустить сделанное выше предположение о симметричности относительно оси вращения изобарической поверхности в геострофическом состоянии ( $\partial p_s / \partial x = 0$ ), то отсюда следует, что  $v_g = 0$ . Другими словами, в этом случае геострофическому состоянию должно соответствовать только лишь движение вдоль параллели: западное движение холодного воздуха и восточное движение теплого воздуха в северном полушарии, а в южном полушарии – наоборот. В противном случае не симметричной формы изо-

барической поверхности мы будем наблюдать «движение» по спирали от экватора до полюса.

Найдем вертикальную проекцию вихря геострофического ветра:

$$\begin{aligned}\Omega_{gz} &= \frac{\partial v_g}{\partial x} - \frac{\partial u_g}{\partial y} = \frac{1}{2\omega_0\rho_e} \left( \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\sin\varphi} \frac{\partial p_s}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\sin\varphi} \frac{\partial p_s}{\partial y} \right) = \\ &= \frac{1}{2\omega_0\rho_e \sin\varphi} \nabla_{\perp}^2 p_s - \frac{1}{2\rho_e\omega_0 R_E \operatorname{tg}\varphi \sin\varphi} \frac{\partial p_s}{\partial y}.\end{aligned}$$

С учетом формулы (16) для случая  $\Delta T = 0$  и  $u_g \neq 0$  получим

$$\begin{aligned}\frac{\partial p_s / \partial y}{\partial p_s / \partial z} &= -\operatorname{tg}\varphi, \quad \frac{\partial p_s}{\partial y} = -\frac{\partial p_s}{\partial z} \operatorname{tg}\varphi, \\ \frac{\partial^2 p_s}{\partial y^2} &= -\frac{\partial^2 p_s}{\partial y \partial z} \operatorname{tg}\varphi - \frac{\partial p_s}{\partial z} \frac{1}{\cos^2\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \\ &= -\frac{\partial^2 p_s}{\partial y \partial z} \operatorname{tg}\varphi - \frac{1}{R_E \cos^2\varphi} \frac{\partial p_s}{\partial z} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \rightarrow \infty.\end{aligned}$$

Так как величина  $\partial^2 p_s / \partial y^2$  входит в выражение для вертикальной проекции вихря, то отсюда следует, что вертикальная проекция вихря на полюсе стремится к бесконечности.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, из проведенного выше анализа геострофического состояния атмосферы следует, что на полюсе в геострофическом состоянии возможны следующие ситуации. Первая ситуация: изобарическая поверхность на полюсе имеет форму сплюснутого геоида, давление уменьшается по сравнению с состоянием статики – имеет место глобальный изобарический минимум. Вторая ситуация: изобарическая поверхность имеет форму вытянутого геоида, давление на полюсе увеличивается по сравнению с состоянием статики – имеет место глобальный максимум. В обоих этих случаях скорость и вихрь скорости в точке полюса равны нулю. Возможна следующая ситуация, когда полюс является особой точкой, скорость геострофического ветра на полюсе не равна нулю, а вихрь скорости стремится к бесконечности. В этом случае, как мы заключили выше из непрерывности движения, в точке полюса в сплюснутом геоиде будет наблюдаться локальный барический минимум, а в вытянутом геоиде – локальный барический максимум.

Из приведенного анализа следует, что полярные вихри и антициклоны являются особенностями геострофического состояния атмосферы.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ  
СПИСОК**

1. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. М.: Мир, 1986, Т. 1, 399 с.; Т. 2, 416 с.
2. Holton J.R. An Introduction to Dynamic Meteorology. Forth edition. Elsevier, 2004, p. 540.
3. Семенова Ю. А., Закинян А.Р., Смерек Ю.Л., Данилова Н. Е., Закинян Р.Г. Исследование вихревого состояния атмосферы // Наука. Инновации. Технологии, 2016, №3, С. 83-89
4. Матвеев Л.Т. Теория общей циркуляции атмосферы и климата Земли. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991, 295 с.
5. Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика. М.: Мир, 1984, т.1, т.2, 811 с.
6. Steven M. Cavallo and Gregory J. Hakim, 2013, Physical Mechanisms of Tropopause Polar Vortex Intensity Change.
7. Zdunkowski W., Bott A. Dynamics of the Atmosphere: a Course in Theoretical Meteorology. Cambridge University Press, 2003, p. 719.
8. White A. A. and Bromley R. A. Dynamically consistent, quasi-hydrostatic equations for global models with a complete representation of the Coriolis force (Q. J. R. Meteorol. Soc. (1995), 121, pp. 399-418).

**REFERENCES**

1. Gill A. Dinamika atmosfery i okeana (Dynamics of the atmosphere and ocean). M.: Mir, 1986, T. 1, 399 s.; T. 2, 416 s.
2. Holton J.R. An Introduction to Dynamic Meteorology. Forth edition. Elsevier, 2004, p. 540.
3. Semenova YU. A., Zakinyan A.R., Smerek U.L., Danilova N.E., Zakinyan R.G. Issledovanie vihrevogo sostoyaniya atmosfery (Research of a vortex condition of the atmosphere) // Nauka. Innovacii. Tekhnologii, 2016, №3, S. 83-89.
4. Matveev L.T. Teoriya obshchej cirkulyacii atmosfery i klimata Zemli (Theory of the general circulation of the atmosphere and climate of Earth). L.: Gidrometeoizdat, 1991, 295 s.
5. Pedloski Dzh. Geofizicheskaya gidrodinamika (Geophysical hydrodynamics). M.: Mir, 1984, t. 1, t. 2, 811 s.
6. Steven M. Cavallo and Gregory J. Hakim, 2013, Physical Mechanisms of Tropopause Polar Vortex Intensity Change.
7. Zdunkowski W., Bott A. Dynamics of the Atmosphere: a Course in Theoretical Meteorology. Cambridge University Press, 2003, p. 719.
8. White A.A. and Bromley R.A. Dynamically consistent, quasi-hydrostatic equations for global models with a complete representation of the Coriolis force (Q. J. R. Meteorol. Soc. (1995), 121, pp. 399–418).

УДК 379.85

**Токарев А. А. [Tokarev A. A.],  
Шальнев В. А. [Shalnev V. A.]****ГЕОХИМИЧЕСКИЙ ПОДХОД В ИЗУЧЕНИИ  
РИТМИКИ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ  
ЛАНДШАФТА****Geochemical approach in the study of rhythm  
morphological landscape units**

В статье рассматривается влияние временного фактора на геохимические показатели содержания тяжелых металлов и влажности почвенного и растительного компонентов элементарных ландшафтов (фаций). Выявляются особенности сезонной ритмики для лесных фаций Верхнегорлыкского культурно-природного ландшафта типичных лесостепей, рассматриваются основные виды травянистой растительности. Прослеживаются зависимости изменения среднемесячной температуры воздуха и влажности почвы. Исследуется динамика содержания гумуса в почве. Сравниваются графики динамики показателей содержания некоторых химических элементов по разным точкам, а также на одной точке в пределах вертикальной структуры распространения элемента меди. Полученные данные с использованием геохимического подхода дают возможность понимать сложные проблемы функционирования природных геосистем ранга фации как целостных образований, их устойчивость, ритмические и динамические закономерности, а также возможные тенденции эволюционного развития.

The article examines the impact of temporary factors on geochemical indicators of heavy metal content and moisture of soil and vegetation components of elementary landscapes (facies). Identified features of seasonal rhythm for forest facies Verhnegorlykskogo cultural-natural landscape of typical forest-steppes, examines main types of herbaceous vegetation. Are traced dependence changes of mean monthly air temperature and soil moisture. Investigated dynamics of humus in the soil. Compared graphics of dynamic indicators content of some chemical elements at different points. Compared graphics of dynamic indicators content the copper element spread in vertical structure by one point. The data obtained with using a geochemical approach make it possible to understand the complex problems of the functioning of natural geosystems rank facies as whole formations, their stability, and dynamic rhythmic laws and possible trends of evolutionary development.

**Ключевые слова:** динамика ландшафтов, сезонная ритмика, геохимический подход, ландшафт, геохимия, тяжелые металлы.

**Key words:** dynamics of landscape, seasonal rhythms, geochemical approach, landscape, geochemistry, heavy metals.

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время динамика геосистем стала центральной и актуальной проблемой географической науки. Создание теории взаимодействия процессов, определяющих нормальное существование геосистем как целостных образований и пределов их жизнеспособности в изменяющихся условиях, стало той фундаментальной задачей, которая приобрела важное прикладное значение. Знание этих вопросов позволяет решать проблемы прогнозирования функционирования геосистем, их динамических закономерностей и эволюционных тенденций.

Мерой любого состояния геосистемы выступает его длительность [1]. Внутригодовые состояния ещё носят название ритмики. Изучение этих вопросов является важным для понимания структуры ландшафта. «Любой ландшафт, – писал С.В. Калесник, отличается от другого не только характером сочетания рельефа, почв, растительности и других компонентов, но и их характером ритмики» ([2], стр. 447).

Ритмика, ритмические процессы являются элементами функционирования любой природной геосистемы. Они могут проходить в относительно равные промежутки времени и приводить к изменению состояния отдельных компонентов геосистемы в течение года. Такие ритмические процессы называются «циклическими» и отражают устойчивое или инвариантное состояние, которое не переходит из одного серийного состояния в другое. Понятие «инвариант» введено в географию В.Б. Сочавой. «Инвариантными являются свойства геосистемы (любого ранга), остающиеся практически неизменными в процессе трансформации, т.е. изменения, под влиянием внешних воздействий. Каждый из инвариантов в конце концов подвергается преобразованиям, но не в порядке динамики, а в процессе эволюционного развития...» Инвариантом ландшафта выступает его вертикальная, горизонтальная и временная структура [3].

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Традиционными методами изучения ритмики ландшафтов являются наблюдения за сменой процессов в течении года: теплооборота, влагооборота (в атмосфере и в почве) и вегетации растительности (через фенофазы). Изучение годовой ритмики проводилось с применением методов геохимических исследований в течение 2012–2013 годов с ежемесячным взятием образцов на контрольных площадках в рамках катенного ряда фаций доминантных урочищ на примере Верхнегорлыкского ландшафта. Результаты лабораторных исследований сравниваются с результатами исследований В.А. Шальнева в 1963–1964 годах [4].

Верхнегорлыкский культурно-природный ландшафт типичных лесостепей располагается в водораздельной зоне бассейнов рек Егорлыка, Кубани и Калауса [5]. Диапазон абсолютных высот 450–800 м. Природные функции, круговороты вещества и энергии сохраняет компонентная подсистема, но обогащается на плакорных участках ландшафта антропогенным круговоротом, незначительно загрязняющим природную среду. Природные подсистемы ландшафта находятся в удовлетворительном состоянии с коэффициентом антропогенного нарушения 0,5.

Климат умеренно-тёплый и умеренно-влажный со средними годовыми температурами воздуха 8,9–9,0°C, при средних температурах января –3,5°C и июля 19–21°C. Во второй половине марта начинается вегетационный период с переходом температуры рубежа +5°C. Переход рубежа +10°C – полная

вегетация наступает во 2-й декаде апреля. Но заморозки иногда наблюдаются в мае (10.05.1952). Вегетационный период продолжается 165–175 дней. Гидротермический коэффициент составляет 1,5. Коэффициент увлажнения приближается к 1,0. Среднегодовое количество осадков 600–620 мм, испаряемость 600–650 мм. На июнь–август приходится максимум испаряемости (110–150 мм), осадков – на май–июнь (90–120 мм).  $K_{увл}$  снижается до 0,3–0,4 в июле–августе, минимальные величины относительной влажности до 30%. В первой декаде ноября с переходом средних суточных температур через  $+5^{\circ}\text{C}$  вегетационный период заканчивается. С конца сентября – начала октября можно наблюдать первые редкие заморозки (25.09.1941). В ландшафте безморозный период длится в среднем 260–270 дней.

Оптимальное соотношение тепла и влаги ( $K_{увл} = 1,0$ ) определило произрастание лесостепной растительности. На склонах останцовых массивов и в верховьях долин рек сохранились крупные леса – Тёмный, Лопатин, Татарский, Мамайский, Русский. В последнем проводились геохимические исследования. Они часто занимают окраины плакоров. Преобладают буково-грабовые и дубово-ясеневые леса. Под лесами сформировались серые лесные почвы. Русский лес произрастает в пределах Ставропольских высот. Основу естественного древостоя составляют граб кавказский (*Carpinus caucasicus*), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior*), клёны полевой (*Acer campestre*) и остролистный (*Acer platanoides*), дуб черешчатый (*Quercus robur*), реже дуб скальный (*Quercus petraea*) и бук восточный (*Fagus orientalis*).

Естественные фитоценозы в первичных и вторичных лесах близки к состоянию динамического равновесия, что выражается в устойчивости состава и сбалансированности фаз травянистой растительности, которые при большом видовом разнообразии образуют группы с разными сроками вегетации, последовательно сменяющие друг друга в ходе годовых циклов. Фенологически этот феномен проявляется в регулярной смене красочных аспектов цветущих злаков и трав с ранней весны до поздней осени [7]. Особенно хорошо выражены смены цветущих растений весной. То, что травянистые растения в лесах быстро и сравнительно пышно развиваются до полного распускания листвы на деревьях, имеет биологический смысл, ведь они должны закончить цикл своего развития до наступления затенения, когда условия их жизни значительно ухудшаются вследствие недостатка света.

Обычно в начале марта, а иногда и раньше, с наступлением весенней оттепели начинают цвести одни из ранневесенних растений – подснежник кавказский (*Galanthus caucasicus*) и птицемлечник дугообразный (*Ornithogalum arcuatum*). Цветение подснежника продолжается до конца марта–начала апреля. Спустя примерно 8–12 дней начинает зацветать пролеска сибирская (*Scilla siberica*), собачий зуб (*Erythronium caucasicum*) или кандык, фиалка душистая (*Viola odorata*) и белая (*Viola alba*), вероника плющелистная (*Veronica hederifolia*), будра плющевидная (*Glechoma hederacea*) и Петров

крест (*Lathraea squamaria*). Яркий голубой ковёр аспектирующей пролески продолжается примерно до середины апреля.

На смену пролескам появляется хохлатка Маршалла (*Corydalis marschalliana*), которая образует почти сплошной серо-жёлтый фон. Местами, но довольно часто, добавляется светло-фиолетовый аспект хохлатки кавказской (*Corydalis caucasica*). Также в это время цветёт толстостенка крупнолистная (*Pachyphragma macrophyllum*), гусиный лук (*Gagea lutea*), морозник кавказский (*Helliborus caucasica*). Затем появляется светлолиловый аспект зубянки пятилистной (*Dentaria quinquefolia*). К её аспекту добавляется желтый аспект ветреницы лютичной (*Anemone ranunculoides*). Их цветение продолжается до начала мая.

В мае цветёт незабудка редкоцветная (*Myosotis sparsciflora*), начинает цвести ландыш кавказский (*Convallaria transcaucasica*) и купены. Перловник выбрасывает метёлки. Во второй половине мая начинается массовое цветение вечерницы сибирской (*Hesperis sibirica*), мятлика борového (*Poa nemoralis*), перловника пестрого (*Melica picta*), птицемлечника дугообразного, птицемлечника Воронова (*Ornitogallum woronowii*), окопника крупноцветкового (*Symphitum grandiflorum*), мерингии (*Moerhringia trinervia*) и др.

В июне появляется белый аспект сныти (*Aegopodium podagraria*) со значительной примесью жёлтого фона желтушника золотистого (*Erisimum aureum*). Из других растений в это время заметное участие в образовании лесного травостоя принимают герань Роберта (*Geranium robertianum*), чистец лесной (*Stachys sylvatica*), вика заборная (*Vicia sepium*), шлемник высокий (*Scutellaria altissima*) и гравилат городской (*Geum urbanum*). Цветение сыти и желтушника длится до конца июня. В течение второй половины лета и осени продолжают развиваться генеративные органы многих луковичных. В целом противоречия в ландшафте осенью сглаживаются, и выявить их труднее, чем в другие сезоны года; эрозионные процессы протекают вяло, отмирают вегетирующие органы травянистой растительности и вступают в стадию «покоя» древесные породы.

Биологические формы движения в зимний период протекают вяло. Происходит медленное увеличение размеров генеративных органов у луковичных; уже в январе под снежным покровом появляются листья и стебли фиалки душистой. На примере пролески сибирской можно наглядно проследить взаимосвязь различных форм движения в зимний период. Изменение физических форм движения (уменьшение радиационного баланса и температур) влечёт за собой смену как механических форм движения (пролеска при помощи втягивающих корней начинает «погружаться» в почву, иногда углубляясь на 0,5–1,0 м), так и биологических («погружаясь» в почву, пролеска «создает» вокруг себя постоянный термический режим, и генеративные органы продолжают развиваться даже зимой) [7].

Геохимический метод является относительно молодым в изучении ритмики ландшафтов. Смена геохимического состава почв напрямую связана

с функционированием ландшафта – устойчивой последовательностью постоянно действующих процессов передачи энергии, вещества и информации в ландшафтах, обеспечивающей сохранение того или иного характерного для значительного отрезка времени состояния ландшафта [4].

Особенности ритмики рассматриваются в рамках четырёх фаций, которые формируют типичный для данного ландшафта катенный ряд элементарных ландшафтов Б.Б. Полынова:

Точка № 1. Фация плакоров, сложенная среднесарматскими известняками и золовыми суглинками, с грабово-ясеновыми лесами на серых лесных почвах. В подросте преобладает клён, в подлеске бузина и бересклет.

Точка № 2. Фация окраин плакоров, сложенная среднесарматскими известняками и золовыми суглинками, с дубово-ясеново-кленовыми лесами на деградированных чернозёмах. В подросте преобладает клён двух видов (полевой и остролистный), в подлеске – боярышник и бересклет.

Точка № 3. Фация крутых склонов балки западной экспозиции, сложенные песками, с ясеново-дубовыми лесами на недоразвитых почвах. В подросте преобладает клён и дуб, в подлеске – бузина и боярышник.

Точка № 4. Фация днища речной балки, сложенной ясеновыми глинами, с грабовыми лесами на серых лесных почвах. В подросте преобладают клён и граб, в подлеске – боярышник.

Почвенные образцы отбирались с глубины 5–10 см (горизонт А) и 50–60 см. (горизонт С), уровень влажности измерялся на лабораторном анализаторе влажности, определение содержания гумуса в почве проводилось по методике «РП-002 Определение общего гумуса мокрым сжиганием по И.В. Тюрину». Лабораторная обработка почвенных образцов осуществлялась согласно «Методике выполнения измерений массовой доли меди, свинца, кадмия и цинка в пробах почв, донных отложениях, растениях и пищевых продуктах» на «Полярографе АВС-1.1». На графиках показаны усреднённые данные почвенных проб за два года наблюдений (2012–2013) на одних и тех же точках наблюдения в один и тот же день каждого месяца.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

При анализе влажности почвенного покрова отмечается падение влажности при росте средней температуры (рис. 1).

В зимне-весенний период влага в почве накапливается благодаря увеличившемуся количеству выпадающих осадков и низкому уровню солнечной радиации. Самой высокой влажность почв в этот период была на точке № 1. В летние и осенние месяцы её показатели сопоставимы с почвами других фаций. Повышенная влажность характерна для днища балки, где почвы формируются на глинистых породах. Самые низкие показатели на окраине плакора (№ 2) и крутом склоне, сложенном песками (№ 3).

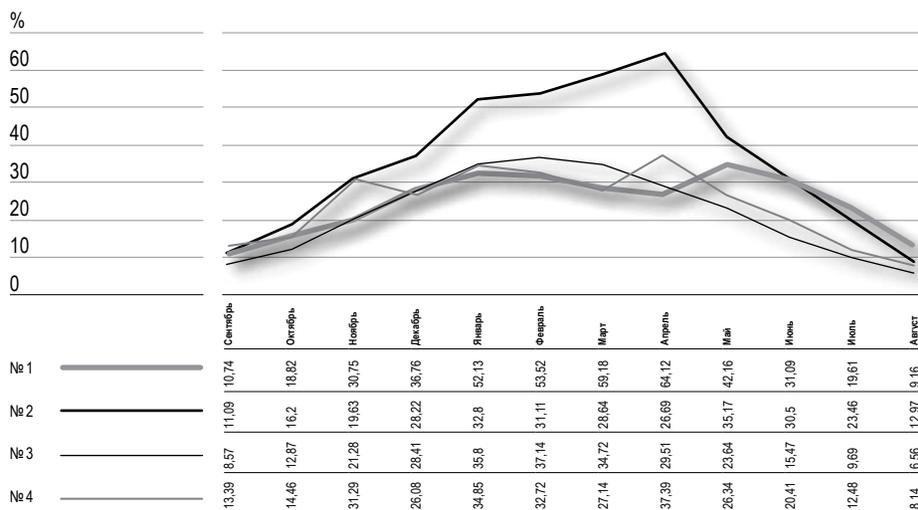


Рис. 1. Влажность почвы горизонта А в 2012–2013 гг.

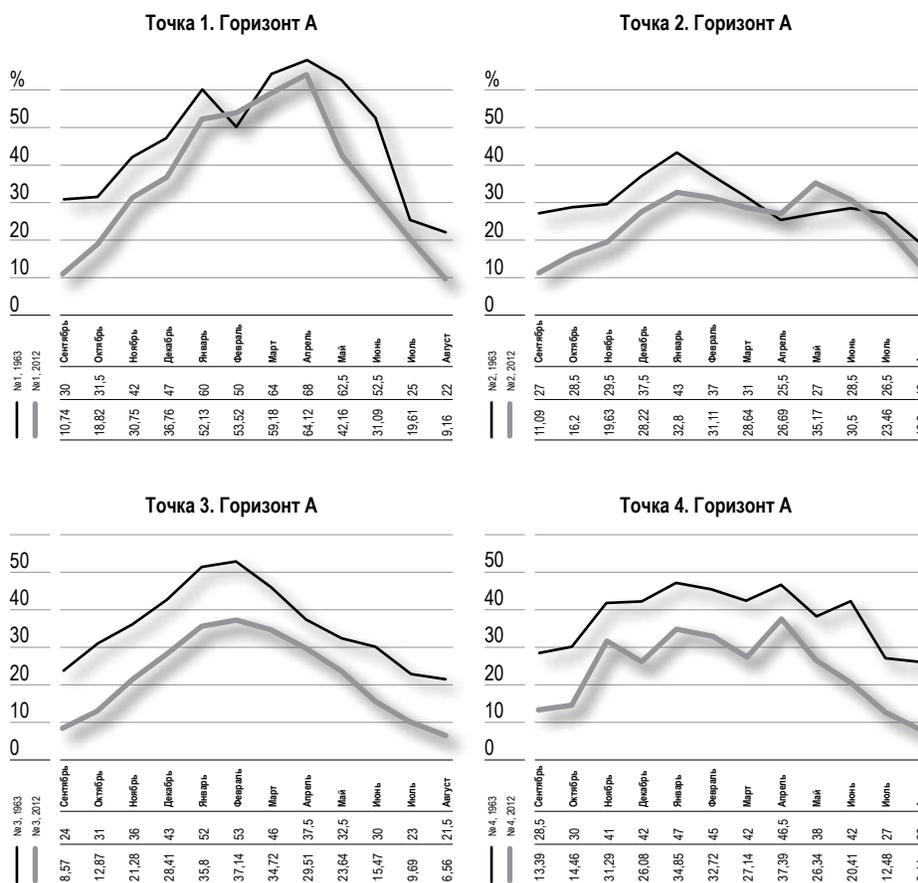
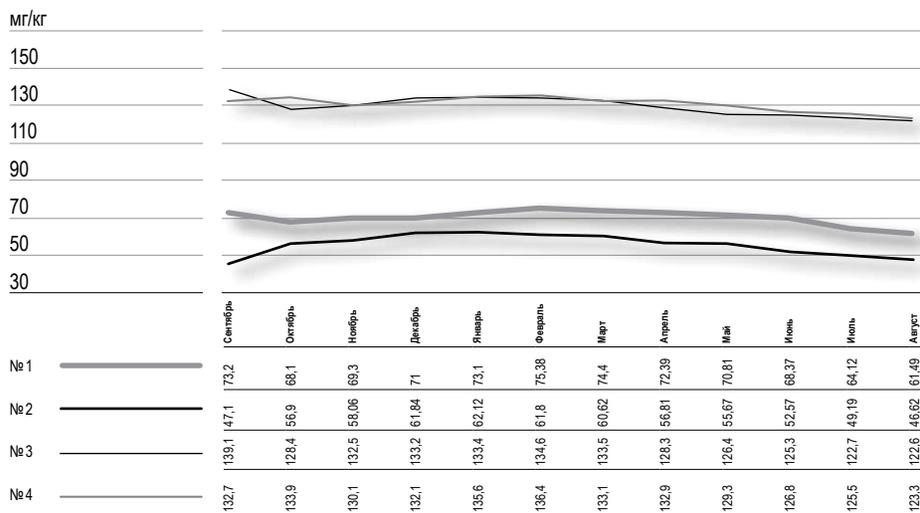


Рис. 2. Влажность почвы горизонта А в 1963 и 2012 г.



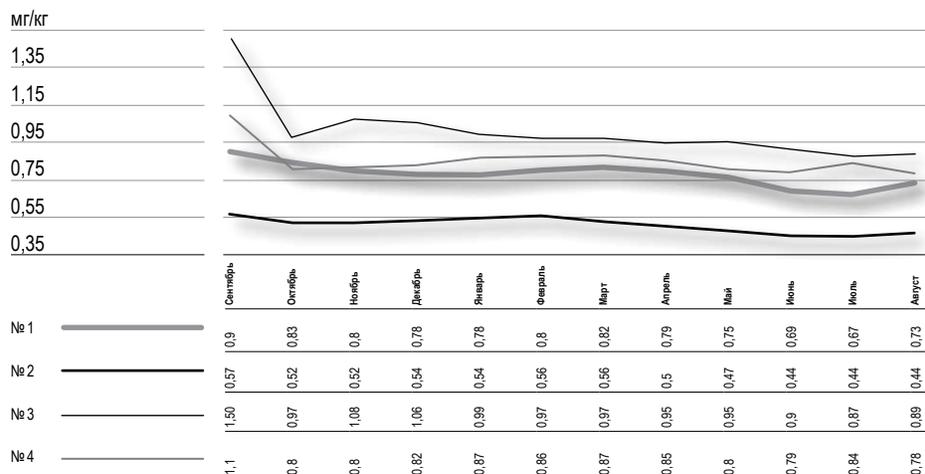
**Рис. 3.** Содержание свинца в горизонте А по месяцам года.

При сравнении влажности почвы в разные годы можно отметить, что за 50 лет произошло общее снижение влажности по всем точкам (рис. 2). Наибольший уровень влажности был зафиксирован в образце точки № 1 в апреле 2013 года – 64,12 %. В апреле 1963 эти показатели достигали 69 %.

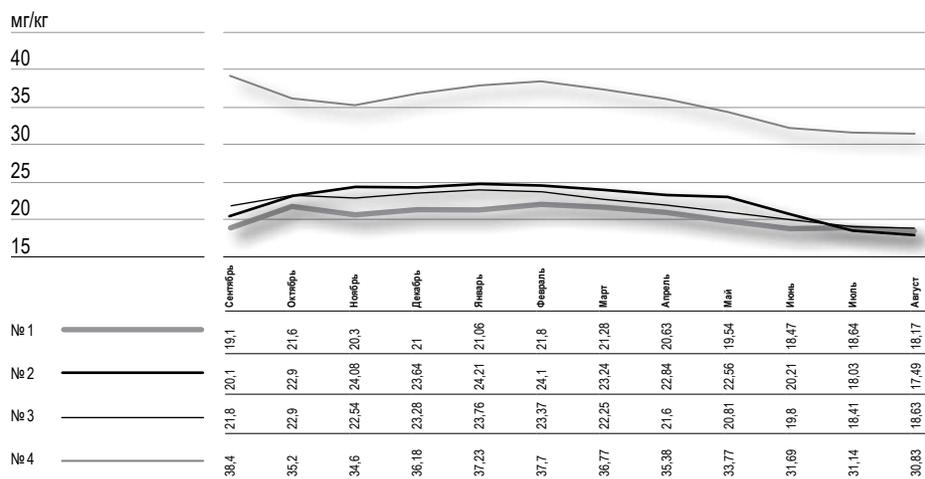
Содержание гумуса колеблется незначительно. Рост наблюдается в весенний период. В течение лета его содержание уменьшается, а зимой с наступлением холодов не изменяется.

В динамике содержания свинца не наблюдается каких-либо резких колебаний (рис. 3). Наибольшее его содержание отмечено в пределах склоновой фации (№ 3) и днище долины (№ 4). Здесь показатели достигают 130–140 мг/кг, что может быть объяснено ролью материнской породы (глины и пески). Отмечается небольшой зимний максимум в пределах 3–6 мг/кг. Самые высокие показатели приходятся на февраль. Некоторый аномальный рост показателей отмечен в сентябре в пределах трёх фаций (№ 1, 3 и 4) и снижение показателей у фации окраины плакора (№ 2).

Динамика содержания кадмия имеет другую специфику, чем свинца (рис. 4). Здесь рост показателей дают осенние месяцы. Особенно сентябрь для фаций склона балки (№ 3) и днища долины (№ 4). Для склона балки высокие показатели сохраняются также в ноябре и декабре. У плакорных фаций (№ 1 и № 2) сезонные колебания показателей прослеживаются слабо. Небольшой рост отмечается в зимние месяцы (на 0,1–0,2 мг/кг) с постепенным снижением в летний сезон. Меньше всего кадмия содержится в почве окраины плакора (№ 2) – до 0,44–0,57 мг/кг, что значительно ниже, чем в почве других фаций. Это связано с активными процессами вымывания на окраине плакора.

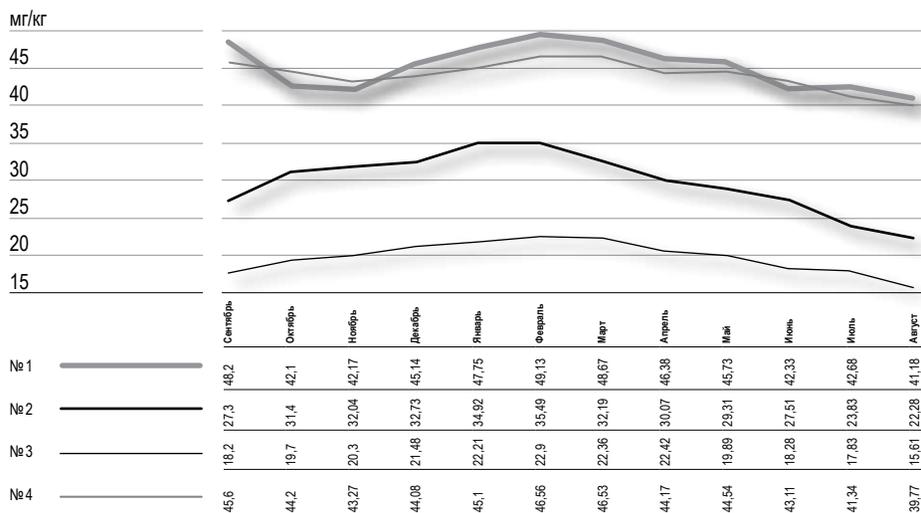


**Рис. 4.** Содержание кадмия в горизонте А по месяцам года.

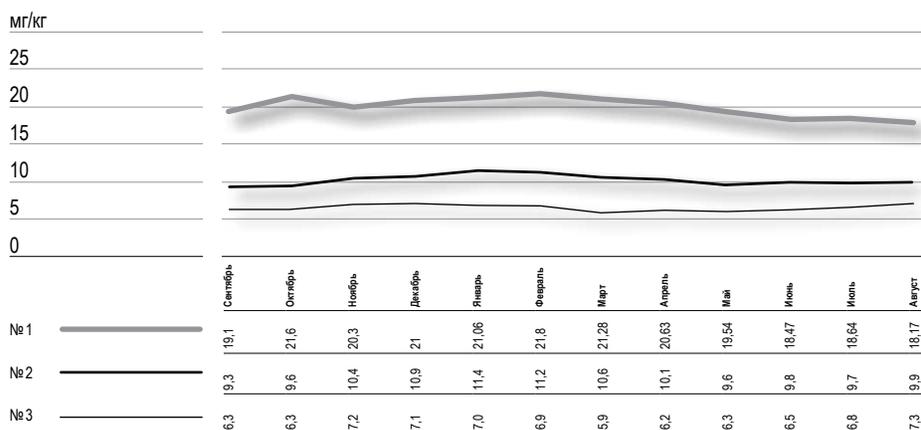


**Рис. 5.** Содержание меди в горизонте А по месяцам года.

Ритмика показателей меди по сезонам года имеет свою специфику (рис. 5). Наибольшая её концентрация наблюдается у фации дна долины (№ 4), т.е. в нижней части катенного ряда. Самые высокие показатели здесь отмечаются в зимний сезон (более 35 мг/кг) с аномалией в сентябре до 38,4 мг/кг и постепенным снижением данных к концу лета и осенью



**Рис. 6.** Содержание цинка в горизонте А по месяцам года.



**Рис. 7.** Содержание меди в вертикальной структуре фации № 1.

(октябрь-ноябрь). У остальных фаций показатели концентрации меди более низкие и колеблются в пределах 16–21 мг/кг. В целом рисунок графика меди на всех точках наблюдения повторяет графики свинца, но с более чёткой динамикой концентрации меди в зимние месяцы и значительным её падением к концу лета.

Концентрация цинка в изучаемых фациях по сезонам года во многом напоминает графики содержания меди. Максимум концентрации цинка, как и свинца и меди, приходится на зимний ритм и частично в начале весны (рис. 6). Однако есть свои отличия, связанные с фацией днища долины (№ 4), где отмечаются очень высокие концентрации (31–38 мг/кг) в пределах горизонта А. Для других фаций эти данные колеблются в пределах 19–24 мг/кг. Очень близкие показатели содержания химических элементов у фаций плакора (№ 1) и днища долины (№ 4). Самые низкие у фации окраины плакора (№ 3).

Вертикальная структура распределения меди рассматривается на примере фации типичных плакоров (№ 1) (рис. 7). Максимальная концентрация элемента отмечена в горизонте А. В годовом графике небольшой рост показателей приходится на зимний сезон и начало весны. Самые низкие величины содержания меди в почвенных горизонтах приходятся на август и сентябрь. В горизонте С сезонные ритмические колебания меди коррелируются с графиком горизонта А. В то же время содержание меди в этом горизонте резко падает до 9–11 мг/кг в разные сезоны года. Самые низкие величины содержания меди отмечены в растительном компоненте в марте, сентябре и октябре. Меняется здесь и годовой ритм накопления химического элемента. Рост величин приходится на конец осени и зиму с небольшим падением показателей в летний сезон и начало осени.

## ВЫВОДЫ

Изучение геохимических особенностей доминантных фаций Верхнегорлыкского ландшафта позволили получить интересные данные о сезонной ритмике:

1. Годовые показатели сезонной ритмики тяжёлых металлов коррелируются с влажностью почвы в горизонте А. Зимой, когда влажность почвы достигает 40–60 %, показатели меди, цинка и свинца самые высокие. Исключением является кадмий. С мая и до конца лета его показатели немного снижаются вместе с показателями влажности.
2. Сезонная динамика проявляется и в величинах отдельных элементов тяжёлых металлов исследуемых фациальных комплексов. Так, максимальные показатели величин Zn присущи только фациям типичных плакоров (№ 1) и днища балки (№ 4). Самые низкие показатели у фации окраины плакора (№ 2). Медь больше накапливается в почве фации днища балки (№ 4), а в остальных фациях её показатели значительно снижены.
3. Изучение содержания меди в вертикальной структуре фации типичного плакора (№ 1) показало большие различия в

концентрации этого элемента в её отдельных компонентах. Самые высокие показатели отмечены в почвенном горизонте А (18–23 мг/кг). В горизонте С эти данные по месяцам года уже колеблются в пределах 8–12 мг/кг. Небольшие величины получены и для травянистой растительности. Это 5,1–5,3 мг/кг, т.е. в 4 раза меньше, чем в горизонте А. С другой стороны, в сезонной ритмике меди в почвенных горизонтах А и С имеется много общего. Рост показателей концентрации меди начинается во второй половине осеннего ритма с небольшим их ростом в зимний сезон. При «утилизации» осеннего опада древесной растительности основная масса элемента меди остаётся в горизонте А. Горизонт С, являясь основным «донором» для древесной растительности (здесь располагается большая часть корневой системы), имеет небольшой возвратный коэффициент миграции элемента меди. Содержание меди в травянистой растительности по сезонам года изменяется мало, в пределах 0,1–0,3 мг/кг. Минимум приходится на весенние месяцы (начало активного вегетационного сезона) с небольшим ростом величин в летние месяцы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исаченко Г.А. Концепция многолетней динамики ландшафтов и вызовы времени // Вопросы географии. №138. 2015.
2. Калесник С.В. Основы общего землеведения // Учпедгиз, 1955.
3. Охрана ландшафтов. Толковый словарь. М.: Прогресс, 1982.
4. Шальнев В.А. Некоторые черты ритмики ландшафтов Ставропольской возвышенности (на примере Верхне-Егорлыкского ландшафта) // Известия Всесоюзного географического общества. №101. 1969.
5. Каторгин И.Ю., Шкарлет К.Ю., Седых Р.Ю. Геоинформационный анализ экологической стабильности бассейна реки Ташла // Наука. Инновации. Технологии. Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета. Выпуск № 3. Ставрополь, 2015. 178 с.
6. Савельева В.В. Природа города Ставрополя: учебное пособие / В.В. Савельева. Ставрополь: Ставропольсервисшкола, 2002. 192 с.
7. Скрипчинский В.В., Вл.В. Скрипчинский. Годичные циклы развития некоторых луковичных и корневищных растений Ставропольской флоры. Матер. по изуч. Ставроп. края, в. 10. Ставрополь, 1960.

**REFERENCES**

1. Isachenko G.A. Konceptiya mnogoletnei dinamiki landshaftov i vyzovy vremeni (The concept of long-term dynamics of landscapes and challenges of the times) // Voprosy geografii. № 138. 2015.
2. Kalesnik S.V. Osnovy obshogo zemlevedeniya (Fundamentals of general earth science) // Uchpedgiz, 1955.
3. Ohrana landshaftov (Landscape protection). Tolkovyi slovar'. M.: Progress, 1982.
4. Shal'nev V.A. Nekotorye cherty ritmiki landshaftov Stavropol'skoi vozvyshennosti (na primere Verhne-Egorlykского landshafta) (Some features of the rhythmic landscapes of the Stavropol height (on the example of the Verhne-Egorlykская landscape) // Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva. № 101. 1969.
5. Katorgin I.Yu., Shkarlet K.Yu., Sedyh R.Yu. Geoinformacionnyi analiz ekologicheskoi stabil'nosti basseina reki Tashla (Geoinformation analysis of ecological stability of a river basin of Tashla) // Nauka. Innovacii. Tehnologii. Nauchnyi zhurnal Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta. V. № 3. Stavropol, 2015. 178 p.
6. Savel'eva V.V. Priroda goroda Stavropolya: uchebnoe posobie (The nature of the city of Stavropol: Tutorial). Stavropol': Stavropol'servisshkola, 2002. 192 p.
7. Skripchinskii V.V., VI.V. Skripchinskii. Godichnye cikly razvitiya nekotoryh lukovichnyh i kornevishnyh rastenii Stavropol'skoi flory (Annual cycles of some bulbous and rhizomatous plants of Stavropol flora) // Mater. po izuch. Stavrop. kraya, v.10, Stavropol', 1960.

**Щитова Н.А. [Schitova N.A.]  
Корнева Л. И. [Korneva L.I.]**

## **ПОЛИМАСШТАБНЫЙ АНАЛИЗ РАЗМЕЩЕНИЯ ИНВЕСТИЦИЙ В РЕГИОНАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ В ПОСТСОВЕТСКОЕ ВРЕМЯ**

**A multiscale analysis of investments placement  
in the regions of the European part of Russia  
in the post-Soviet period**

Статья посвящена комплексному географическому исследованию особенностей размещения и локализации инвестиций на разных территориальных уровнях Европейской части России в постсоветский период. В основу исследования положены идеи полимасштабного и территориального подходов в сочетании с методом «ключей», опорой на геоинформационные технологии. Основная методологическая установка состоит в последовательном сопряженном анализе данных о размещении инвестиций и трансформации территориально-отраслевой структуры хозяйства на разных территориальных уровнях. В статье проводится типология регионов России по уровню инвестиционной активности и на основе сравнительного пространственно-временного анализа экономических параметров ключевых экономических районов (Центрального, Поволжского и Северо-Кавказского) и регионов (Калужской и Смоленской областей, Республик Ингушетия и Татарстан, Ставропольского края) показано, что развитие инвестиционного процесса в Европейской части России проходило поэтапно, сопровождалось сменой центров и направлений инвестирования. В статье выяснены основные факторы, влияющие на привлечение инвестиций и их действие в разных условиях и установлены некоторые общие особенности в размещении инвестиций, в частности их тяготение к устойчивым узловым элементам территориальной структуры хозяйства региона и транзитным транспортным магистралям.

The article is devoted to the complex geographical research of the peculiarities of placement and localization of investments in different territorial levels of the European part of Russia in the post-Soviet period. The research is based on the ideas of multiscale and territorial approaches in combination with the method of "keys", being relied on geoinformation technologies. The main methodological setting consists in the sequential coupled analysis of data on the location of investments and the transformation of the territorial-sectoral structure of the economy at different territorial levels. The typology of Russian regions in terms of investment activity is conducted on the basis of comparative spatio-temporal analysis of economic parameters of key economic regions (Central, region Volga region and North-Caucasian regions) and such regions as (Kaluga and Smolensk regions, Republics of Ingushetia and Tatarstan, Stavropol Territory). That development of the investment process in the European part of Russia was phased in, accompanied by a little change in the centers and areas of investment. The article clarifies that main factors influencing the attracting of investments and their effect in different conditions establish some common features in the allocation of investments, in particular, their attraction to sustainable nodal elements of the territorial structure of the economy in the region and transit transport routes.

**Ключевые слова:** полимасштабный анализ, география инвестиций, Европейская часть России, территориальная структура хозяйства, сравнительно-географический анализ.

**Key words:** multiscale analysis, geography of investment, European part of Russia, territorial structure of the economy, comparative geographical analysis.

## ВВЕДЕНИЕ

Формирование инвестиционного ландшафта российских регионов в постсоветский период происходило в различных условиях. Высокий уровень социально-экономической дифференциации, неодинаковая обеспеченность производственными фондами, природными и инфраструктурными ресурсами, различные геополитические риски и т.п. выступали в качестве ключевых факторов выбора направлений экономической политики. В связи с различиями в стартовые условия складывались разные стратегии инвестиционного развития.

Современные отечественные исследования инвестиционных процессов направлены, преимущественно на анализ географии иностранных инвестиций в России, оценку инвестиционного потенциала и инвестиционного климата, изменения структуры инвестиций в крупных отраслях экономики (преимущественно на федеральном уровне), рассмотрение инструментов инвестиционной политики и инвестиционного проектирования. Крайне мало работ выполнено на макрорегиональном уровне (за исключением Западной Сибири с ее нефте- и газодобывающими регионами). Точечный анализ инвестиционных процессов связан, как правило, с опытом городов по реализации крупных инвестиционных проектов или проведения масштабных федеральных мероприятий (Олимпиада, Универсиада, Чемпионат мира по футболу, международный экономический форум и др.). При этом значительные исследовательские усилия сосредоточены на обсуждении трансформационных процессов в финансово-экономических системах и практически не уделяется внимание анализу территориальных сдвигов капиталовложений и концентрации основных фондов. Не ясно, существует ли единый тренд в размещении инвестиций по территории страны, есть ли объективная связь между объемами инвестиций и региональной спецификой (историческими предпосылками, структурой экономики, состоянием инфраструктуры, позиционными особенностями и др.), с чем связана локализация инвестиций в тех или иных местах, в чем состоит сходство и различия региональных инвестиционных процессов и есть ли возможность масштабирования и трансляции конкретного инвестиционного опыта в другие территории. Одновременно следует обращать внимание на не замкнутость локальных и региональных экономических систем, их зависимость от процессов перемещения населения, работы транспортной системы, близости рынков потребления и сбыта, инновационной инфраструктуры и т.п. [4]. На наш взгляд, важным инструментом поиска ответов на поставленные вопросы может служить географический подход. При этом ключевой методологической основой, определяющей направление исследований, выступает концепция территориальных структур, опирающаяся на идеи системно-структурного анализа и принцип полимасштабности [1, 2, 3].

Основная цель данной статьи – выявить особенности размещения и локализации инвестиционных проектов на разных территориальных уровнях в регионах Европейской части России в постсоветский период.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой информационной базы исследования послужили данные Росстата и региональных комитетов государственной статистики, материалы Агентства стратегических инициатив, сведения, представленные на инвестиционных порталах России и регионов, аналитические доклады коллективов ученых Всемирного банка, ООН и ПРООН, авторской базы данных об инвестиционных проектах на территории Ставропольского края, составленной на основе данных официальных сайтов органов государственной власти.

В основу исследования положены идеи полимасштабного подхода в сочетании с методом «ключей». Основная методологическая установка применения полимасштабного подхода состоит в последовательном сопряженном анализе данных о размещении инвестиций и трансформации территориально-отраслевой структуры хозяйства на макроуровне (страна и ее макрорегионы), мезоуровне (отдельные регионы и межрегиональные сравнения) и микроуровне (выявление внутрорегиональных особенностей). Методология опирается на геоинформационные технологии ввиду значительного объема статистических сведений.

Поскольку сплошное детальное исследование всех территорий Европейской части России достаточно объемно, был применен метод типологии территорий и последующий отбор в качестве ключевых наиболее типичных представителей каждого типа.

В качестве макроструктур рассматривались экономико-географические районы, которые были объединены в три типа по степени однородности экономического пространства. Для определения степени однородности использовался коэффициент вариации внутреннего валового продукта –

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\%,$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение,  
 $\bar{x}$  – средняя арифметическая величина

В расчётах не учитывались данные по г. Москва, г. Санкт-Петербург и Московской области, поскольку столичный статус этих территорий обусловил особый, привилегированный характер инвестиционных процессов, что вносит искажения в интегральную картину инвестиционного развития макрорегионов (табл. 1).

Рейтинг регионов по абсолютному показателю инвестиций в основной капитал за период с 1990 по 2012 гг. позволил получить общее представление об инвестиционном ландшафте России. на основе динамики изменения пози-

Таблица 1. ДИНАМИКА ВНУТРЕННЕГО ВАЛОВОГО ПРОДУКТА (ВРП) И КОЭФФИЦИЕНТА ВАРИАЦИИ ВРП В РАЗРЕЗЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ РАЙОНОВ РФ, 2000-2012 ГГ. (ВРП – млн. руб. в текущих ценах, коэффициент вариации ВРП (v) – %)

Экономический район	ВРП	v	ВРП	v	ВРП	v	ВРП	v
	2000		2005		2010		2012	
<b>Крайне высокая степень дифференциации экономического пространства</b>								
Северо-Кавказский	259 038	130	1 005 080	118	2 627 005	121	3 558 717	122
Западно-Сибирский	1 502 594	120	5 112 159	123	8 158 306	110	11 147 124	113
Восточно-Сибирский	405 548	113	895 782	102	2 028 747	107	2 497 294	100
<b>Высокая степень дифференциации экономического пространства</b>								
Волго-Вятский	203 418	81	526 534	94	1 170 581	91	1 518 076	89
Поволжский	554 547	97	1 493 495	85	3 026 612	81	4 159 711	84
Дальневосточный	321 972	83	826 422	74	2 110 721	76	2 700 318	76
Северо-Западный*	123 522	54	391 686	65	900 527	70	1 219 045	72
<b>Низкая степень дифференциации экономического пространства</b>								
Уральский	754 334	48	1 937 832	50	3 932 389	51	5 525 151	53
Центрально-Черноземный	202 502	25	574 009	29	1 331 026	35	1 866 725	41
Северный	295 232	46	786 420	41	1 488 969	38	1 911 463	41
Центральный*	340 630	29	861 134	34	1 904 684	30	2 548 233	29

Примечание:

В математической статистике величина коэффициента менее 10% свидетельствует об однородности совокупности, от 10% до 30% – об умеренной колеблемости, свыше 30% – высокой колеблемости признака.

\* без Санкт-Петербурга;

\*\* без Москвы и Московской области.

Источник: рассчитано автором по данным Росстата

ций регионов в этом рейтинге было выделено пять типов регионов по уровню инвестиционной активности (рис. 1):

- прорывные (позиция заметно выросла);
- провалившиеся (позиция заметно понизилась);
- устойчивые лидеры (стабильно высокие позиции);
- устойчивые середняки (стабильно средние позиции);
- устойчивые аутсайдеры (стабильно низкие позиции).



Рисунок 1.

**Типология регионов России по уровню инвестиционной активности.**

Дальнейший анализ был ограничен территорией Европейской части России (без Урала) по ряду обстоятельств:

- территория старого освоения;
- преобладание преимущественно несырьевой экономики;
- высокий уровень разнообразия и неоднородности экономического и инвестиционного пространств.

Страновой уровень	→	Россия и экономические районы
Уровень макрорегиона	→	Центральный, Поволжский, Северо-Кавказский ЭР
Региональный уровень	→	Калужская, Смоленская обл., Татарстан, Ингушетия, Ставропольский край
Внутрирегиональный уровень	→	Ставропольский край

ТИП РЕГИОНА	ТИП ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА		
	ПРЕИМУЩЕСТВЕННО ОДНОРОДНОЕ	ВЫСОКАЯ СТЕПЕНЬ РАЗНОРОДНОСТИ	КРАЙНЕ РАЗНОРОДНОЕ
ПРОРЫВНОЙ	Калужская область	—	—
ПРОВАЛИВШИЙСЯ	Смоленская область	—	Республика Ингушетия
УСТОЙЧИВЫЙ ЛИДЕР	+	Республика Татарстан	
УСТОЙЧИВЫЙ СЕРЕДНЯК	+	+	Ставропольский край
УСТОЙЧИВЫЙ АУТСАЙДЕР	+	+	+

**Рисунок 2.** Структура полимасштабного анализа инвестиционных процессов в Европейской части России (сверху) и матрица выбора регионов-ключей (снизу)

Для более детального анализа были выбраны три экономико-географических района – Центральный, Поволжский и Северо-Кавказский, представляющих разные типы экономического пространства по степени его однородности. В каждом из них были отобраны регионы, наиболее интересные с точки зрения развития инвестиционного процесса:

- прорывные (Калужская область);
- провалившиеся (Смоленская область, Ингушетия);
- устойчивые лидеры (Татарстан);
- устойчивые середняки (Ставропольский край).

Таким образом в исследование попали представители всех выделенных классов регионов, кроме устойчивых аутсайдеров.

В качестве ключевого для исследования на внутрирегиональном уровне был выбран Ставропольский край как пример региона с достаточно устойчивыми, но очень средними показателями инвестиционного развития, на

которое не оказывают влияние ни высокая разнородность экономического пространства макрорегиона, ни кризисные явления в экономике, ни отсутствие явных конкурентных преимуществ среди регионов-соседей.

Таким образом, анализ был проведен на четырех территориальных уровнях – страновом, макрорегиональном, региональном и внутрирегиональном (рис. 2). Временной период анализа ограничен 1990–2012 годами.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

1990–2000-е годы ознаменовались масштабными социально-экономическими трансформациями, происшедшими в политическом устройстве и хозяйственной системе России, под влиянием которых и формировался инвестиционный ландшафт страны и его регионов. Наиболее важными среди них были:

- изменение степени и механизмов участия государства в регулировании рыночных отношений;
- сдвиги в отраслевой и территориальной структуре хозяйства, разрушение устоявшихся экономических и логистических связей на разных иерархических уровнях.
- нарастание кризисности в экономической системе страны
- изменение экономического поведения предпринимателей и инвесторов в условиях социально-политической и экономической нестабильности

Развитие инвестиционного процесса в Европейской России сопровождалось сменой центров и направлений инвестирования (рис. 3). В 2000 г. инвестиции в основной капитал тяготели к федеральным городам, регионам Средней и Нижней Волги и Юга России. К 2005 г. сформировались направления активного инвестирования:

- Центр – Европейский Север (Ярославская, Вологодская и Архангельская области);
- Центр – Юг (Тульская, Рязанская, Липецкая, Воронежская, Белгородская области);
- Юг – Поволжье (Краснодарский край, Ростовская, Волгоградская, Самарская, Саратовская области, Республика Татарстан).

Однако к 2012 г. направление Центр – Юг утратило свое значение и инвестиции в средней полосе Европейской России сконцентрировались в Москве и Московской области. Ослабело направление между Югом и Поволжьем, наметилась (по известным причинам) концентрация инвестиций в Краснодарском крае и Татарстане. За счет увеличения государственной

поддержки в связи с определёнными геополитическими сдвигами заметную роль в инвестиционном процессе на Юге страны стала играть Республика Дагестан. Нижегородская область и регионы Европейского Севера сохранили свои позиции, стянув при этом на себя инвестиции с соседних регионов.

### Центральный экономический район.

Довольно высокая однородность экономического пространства района связана с достаточно схожими природными условиями, ресурсной базой и специализацией. Вместе с тем, инвестиционное развитие регионов протекает по разным сценариям. В районе присутствуют пять типов регионов по уровню инвестиционной активности: устойчивые лидеры (Тверская, Тульская и Ярославская области), «прорывные» (Калужская область), устойчивые «середняки» (Рязанская, Владимирская, Брянская области), «провалившиеся» (Смоленская область), устойчивые аутсайдеры (Орловская, Костромская, Ивановская области) (табл. 2).

Таблица 2. ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ПОЗИЦИЙ РЕГИОНОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЙОНА В ОБЩЕМ РЕЙТИНГЕ ПО ОБЪЕМУ ИНВЕСТИЦИЙ В ОСНОВНОЙ КАПИТАЛ, 1990–2012 гг. (место)

Регион	1990 г.	1995 г.	2000 г.	2005 г.	2010 г.	2012 г.	среднее за 12 лет	2012 1990
Тверская область	2,5	1	2	2	1	3	2	-0,5
Тульская область	2,5**	3	1	4	4	2	3	+0,5
Ярославская область	2,5**	2	3	1	3	4	3	-1,5
Калужская область	9,0	6	6	8	2	1	5	+8,0
Рязанская область	5,0	4	5	3	8	5	5	0,0
Смоленская область	2,5**	8	4	6	6	7	6	-4,5
Владимирская область	6,5*	5	8	5	5	6	6	+0,5
Брянская область	6,5*	7	10	11	7	8	8	-1,5
Орловская область	8,0	9	7	10	10	9	9	-1,0
Костромская область	11,0	10	9	7	11	11	10	0,0
Ивановская область	10,0	11	11	9	9	10	10	0,0

Примечание: \*, \*\* Одинаковые позиции рейтинга.  
Проставлялось среднее значение позиции в рейтинге.  
Источник: рассчитано автором по данным Росстата.

Сравнительный пространственно-временной анализ экономических параметров (рис. 4) показал, что в первое десятилетия постсоветского периода все регионы «скатились» в инвестиционную яму «ниже среднего». Процесс их дифференциации начался только с 2005 г. и усилился к 2010 г. Инвестиции концентрируются в регионах с лучшей обеспеченностью трудовыми ресурсами и более развитой транспортно-логистической инфраструктурой.

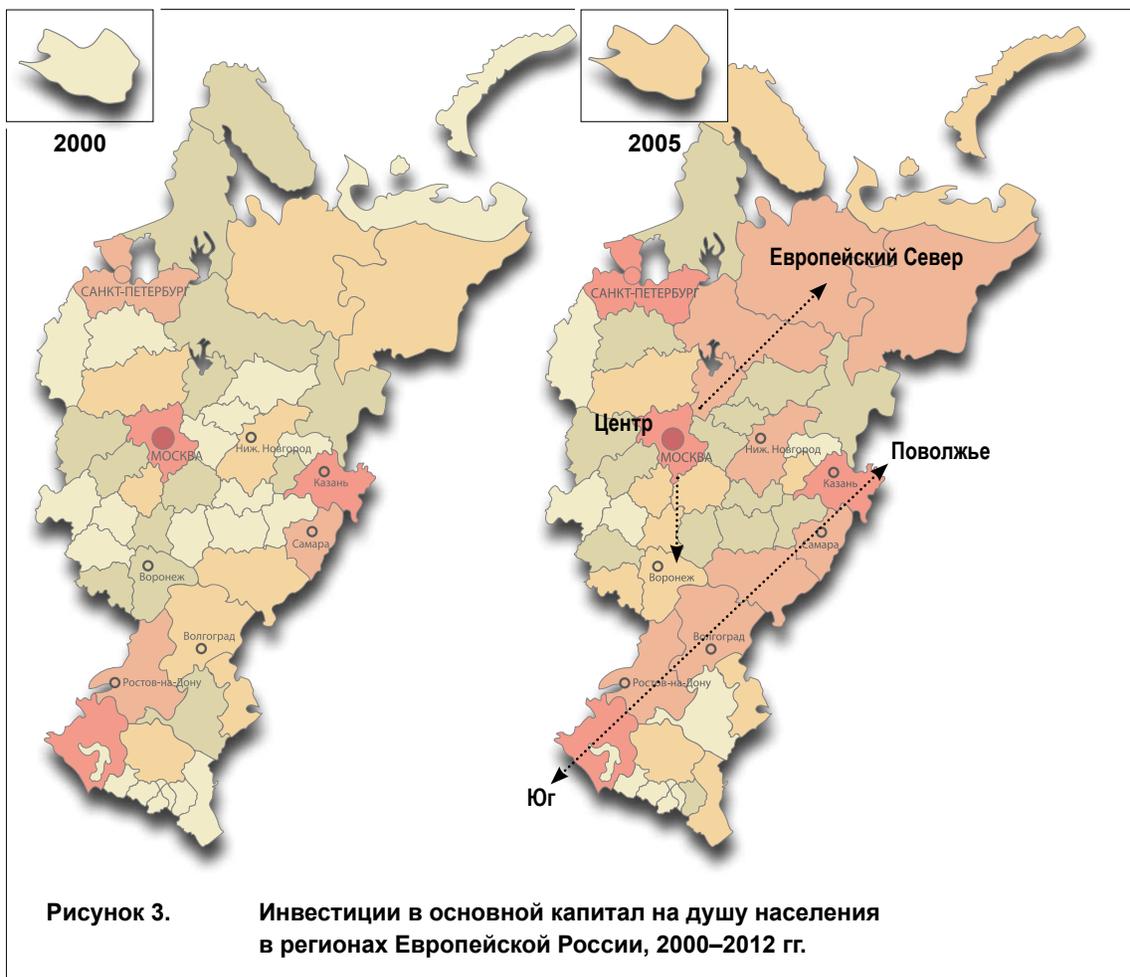
### Поволжский экономический район

представляет собой более разнородное экономическое пространство. Однако, динамика инвестиционного процесса (табл. 3) демонстрирует значительно меньшее разнообразие инвестиционных моделей развития по сравнению с Центральным районом. Присутствуют только три типа регионов – устойчивые лидеры (Республика Татарстан, Самарская область), устойчивые; «средняки» (Астраханская, Волгоградская и Саратовская области), устойчивые аутсайдеры (Республика Калмыкия, Ульяновская и Пензенская области).

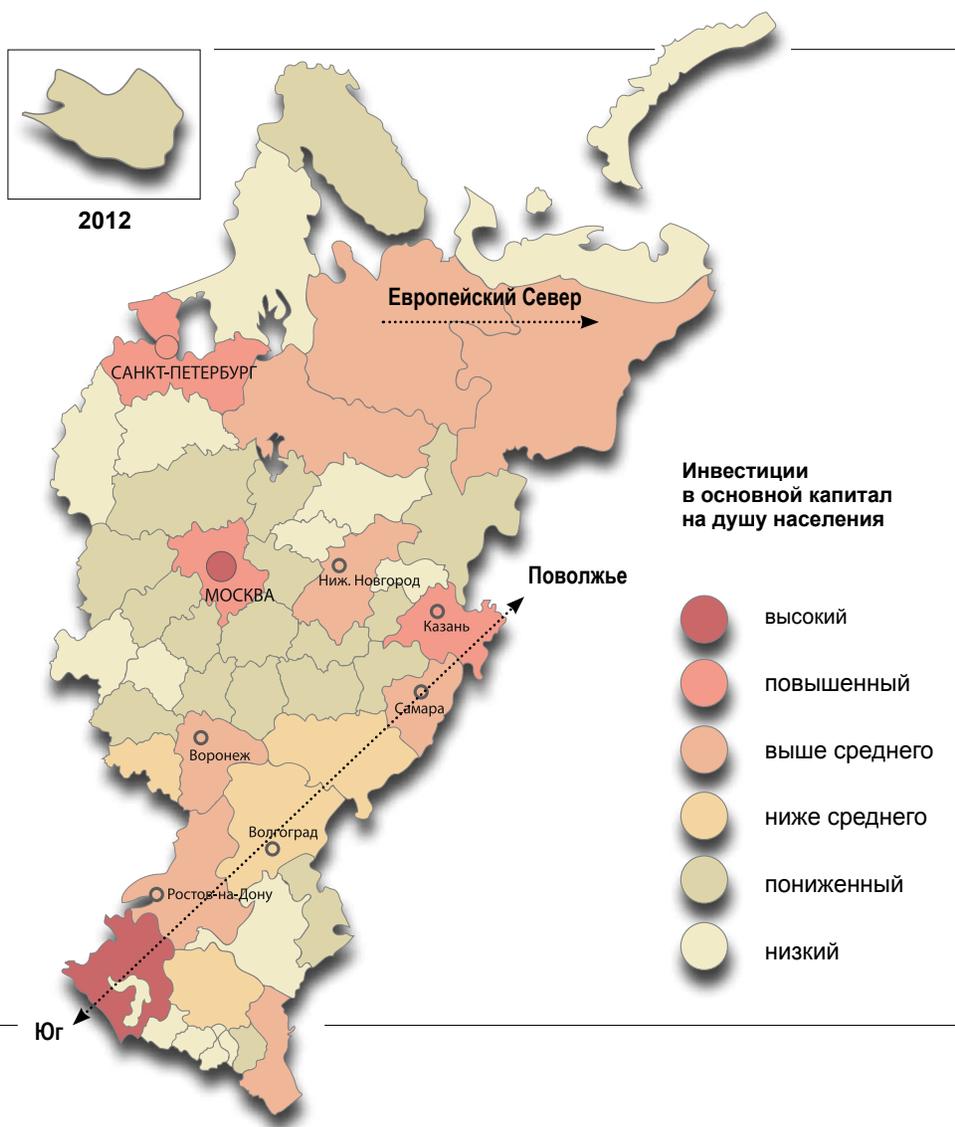
Таблица 3. ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ПОЗИЦИЙ РЕГИОНОВ ПОВОЛЖСКОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЙОНА В ОБЩЕМ РЕЙТИНГЕ ПО ОБЪЕМУ ИНВЕСТИЦИЙ В ОСНОВНОЙ КАПИТАЛ, 1990–2012 гг. (место)

Регион	1990 г.	1995 г.	2000 г.	2005 г.	2010 г.	2012 г.	Среднее за 12 лет	2012/1990
Республика Татарстан	1	1	1	1	1	1	1	0
Самарская область	2	2	2	2	2	2	2	0
Волгоградская область	4	4	5	3	4	3	4	+1
Саратовская область	3	3	3	4	3	4	3	-1
Астраханская область	6	6	4	5	5	5	5	+1
Ульяновская область	5	5	7	7	6	6	6	-1
Пензенская область	7	7	8	6	7	7	7	0
Республика Калмыкия	8	8	6	8	8	8	8	0

Источник: рассчитано автором по данным Росстата.



В Поволжском районе отсутствуют примеры «прорывного» или «про-вального» инвестиционного развития. Однако сочетание в одном регионе двух контрастных территорий – устойчивого лидера (Республика Татарстан) и устойчивого аутсайдера (Республика Калмыкия) – провоцирует нарастание поляризационных процессов в распределении инвестиций. Общая динамика инвестирования аналогична Центральному району (рис. 5).



### Северо-Кавказский экономический район

крайне разнороден по ресурсному потенциалу и основным экономическим показателям. Присутствуют практически все типы инвестиционного развития регионов: устойчивые лидеры (Ростовская область, Краснодарский край), устойчивые «средняки» (Ставропольский край, Чеченская Республика, Республика Дагестан), «провалившиеся» (Республика Ингушетия), устойчивые аутсайдеры (Карачаево-Черкесская, Кабардино-Балкарская Республики, Республики Адыгея и Северная Осетия – Алания) (табл. 4).

Таблица 4. ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ПОЗИЦИЙ РЕГИОНОВ СЕВЕРО-КАВКАЗСКОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЙОНА В ОБЩЕМ РЕЙТИНГЕ ПО ОБЪЕМУ ИНВЕСТИЦИЙ В ОСНОВНОЙ КАПИТАЛ, 1990–2012 г. (место)

Регион	1990 г.	1995 г.	2000 г.	2005 г.	2010 г.	2012 г.	Среднее за 12 лет	2012 1990
Краснодарский край	1,0	1	1	1	1	1	1	0,0
Ростовская область	2,0	3	2	2	2	2	2	0,0
Республика Дагестан	4,0	5	4	4	3	3	4	+1,0
Ставропольский край	3,0	4	3	3	4	4	4	-1,0
Чеченская Республика	5,5*	2	8	5	5	5	5	+0,5
Кабардино-Балкарская Республика	7,0	6	5	8	6	6	6	+1,0
Республика Северная Осетия-Алания	8,5**	7	6	7	7	7	7	+1,5
Карачаево-Черкесская Республика	8,5**	10	10	6	9	8	9	+0,5
Республика Адыгея	10,0	9	7	9	8	9	9	+1,0
Республика Ингушетия	5,5*	8	9	10	10	10	9	-4,5

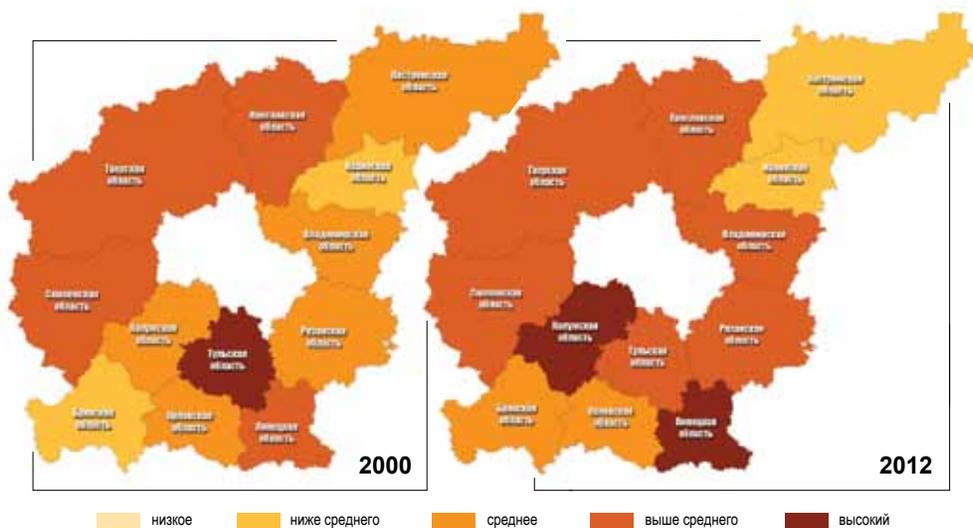
Примечание: \*, \*\* Одинаковые позиции рейтинга. Проставлялось среднее значение позиции в рейтинге.  
Источник: рассчитано автором по данным Росстата.

Основные тенденции динамики в целом совпадают с предыдущими районами. Однако следует отметить более раннюю и более глубокую дифференциацию регионов по распределению инвестиций (рис. 6).

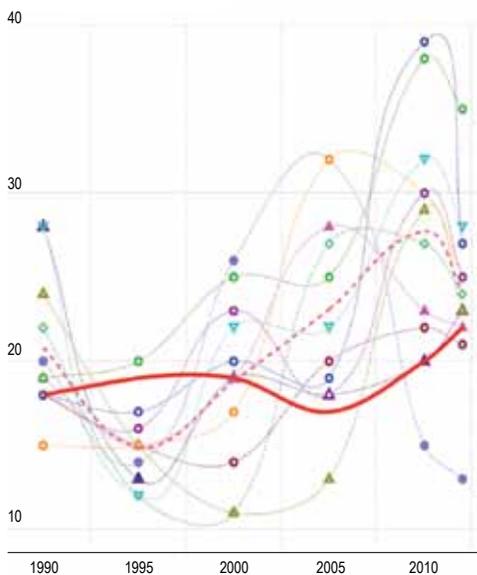
Сравнительный анализ инвестиционных процессов в трех экономико-географических районах показал, что все территории России в первые постсоветские годы обладали очень низким инвестиционным потенциалом, который постепенно возрастал, однако темпы и характер роста в разных регионах были неодинаковы, что привело к возникновению центров накопления инвестиций и активизации экономического развития и очагов с дефицитом инвестиционных проектов и устойчивой экономической стагнацией.

Региональный уровень анализа позволил не только выявить основные факторы, влияющие на привлечение инвестиций и их действие в разных условиях, но и установить некоторые общие особенности в размещении инвестиций и показать влияние специфики места на их локализацию

ВАЛОВОЕ НАКОПЛЕНИЕ ОСНОВНОГО КАПИТАЛА ПО СУБЪЕКТАМ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЙОНА (млн. руб.)



ОТНОШЕНИЕ ОБЪЕМА ИНВЕСТИЦИЙ В ОСНОВНОЙ КАПИТАЛ К ВАЛОВОМУ РЕГИОНАЛЬНОМУ ПРОДУКТУ (%)



ИНВЕСТИЦИИ В ОСНОВНОЙ КАПИТАЛ НА ДУШУ НАСЕЛЕНИЯ (руб.)

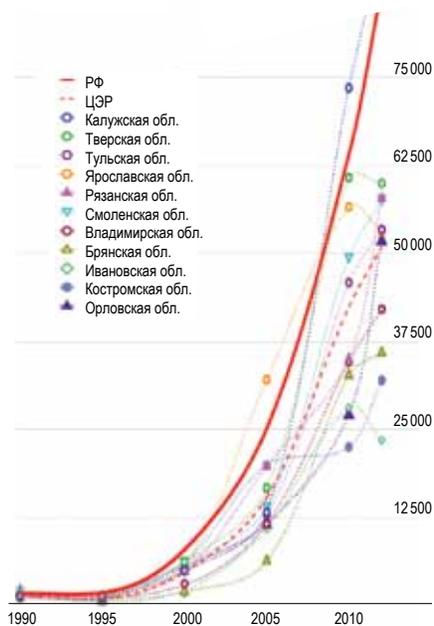
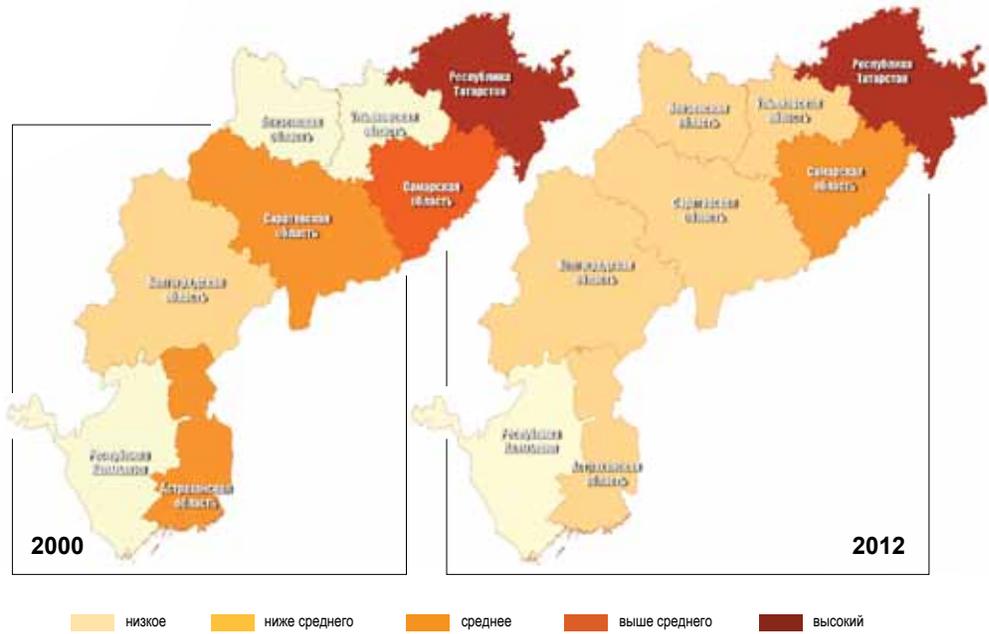


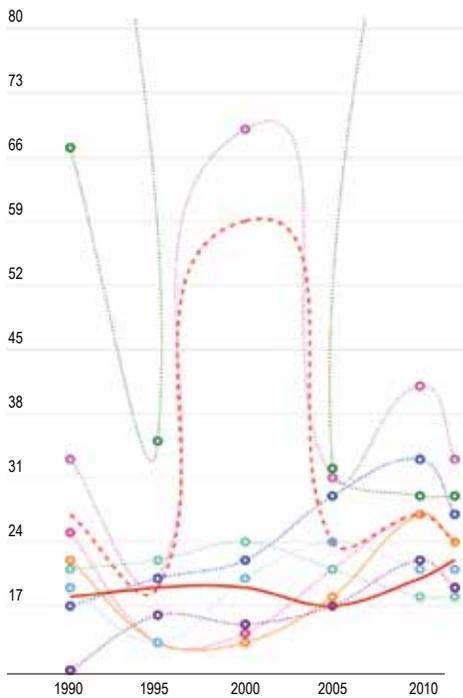
Рисунок 4.

**Динамика основных показателей инвестиционной активности регионов Центрального экономического района, 1990–2012 гг.**

ВАЛОВОЕ НАКОПЛЕНИЕ ОСНОВНОГО КАПИТАЛА ПО СУБЪЕКТАМ ПОВОЛЖСКОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЙОНА, млн руб.



ОТНОШЕНИЕ ОБЪЕМА ИНВЕСТИЦИЙ В ОСНОВНОЙ КАПИТАЛ К ВАЛОВОМУ РЕГИОНАЛЬНОМУ ПРОДУКТУ, в %



ИНВЕСТИЦИИ В ОСНОВНОЙ КАПИТАЛ НА ДУШУ НАСЕЛЕНИЯ, руб.

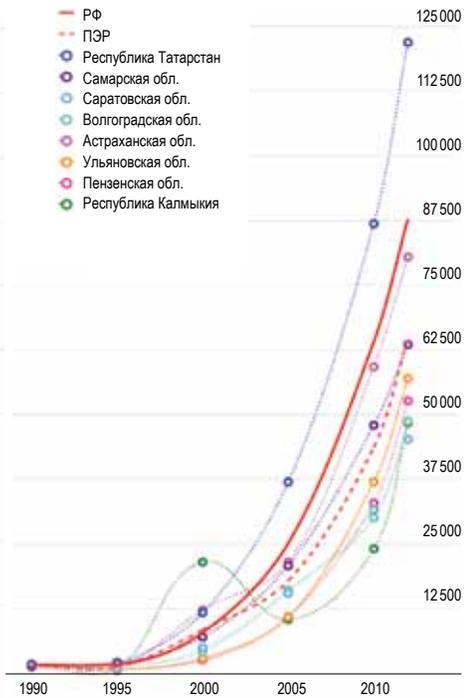
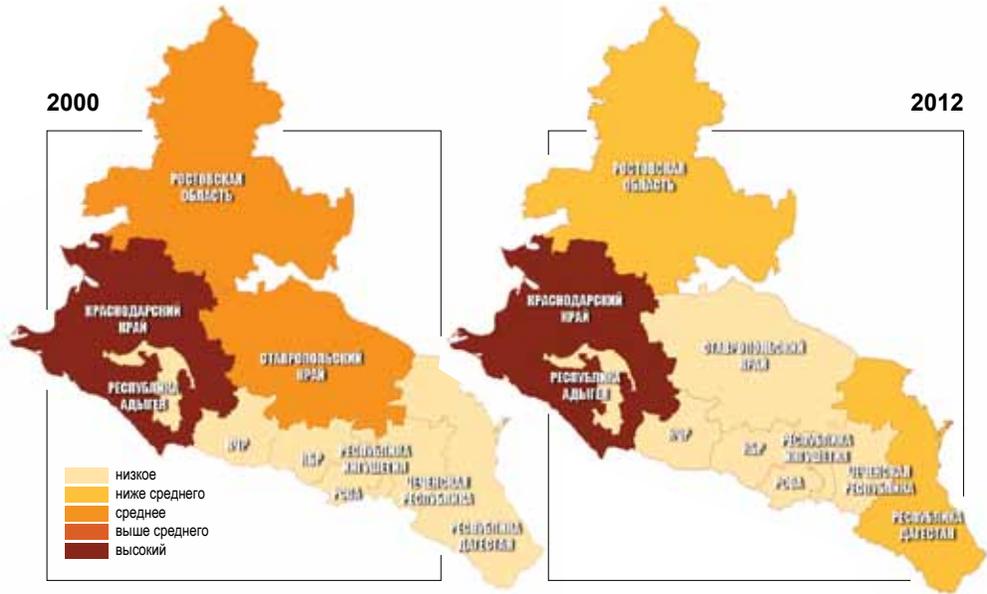


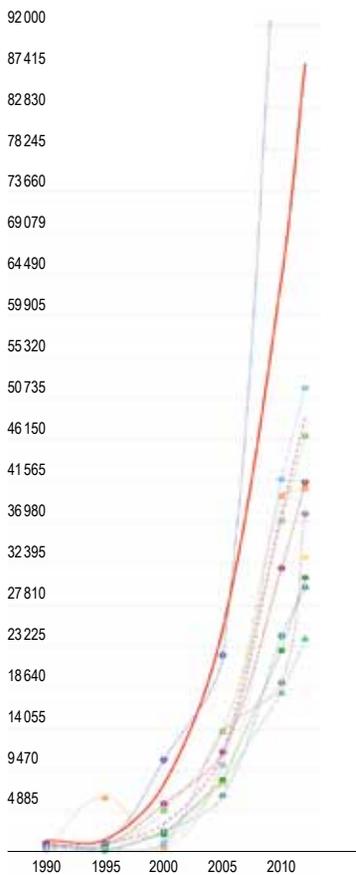
Рисунок 5.

**Динамика основных показателей инвестиционной активности регионов Поволжского экономического района, 1990–2012 гг.**

ВАЛОВОЕ НАКОПЛЕНИЕ ОСНОВНОГО КАПИТАЛА ПО СУБЪЕКТАМ СЕВЕРО-КАВКАЗСКОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЙОНА, млн руб.



ИНВЕСТИЦИИ В ОСНОВНОЙ КАПИТАЛ НА ДУШУ НАСЕЛЕНИЯ, руб.



ОТНОШЕНИЕ ОБЪЕМА ИНВЕСТИЦИЙ В ОСНОВНОЙ КАПИТАЛ К ВАЛОВОМУ ПРОДУКТУ, в %

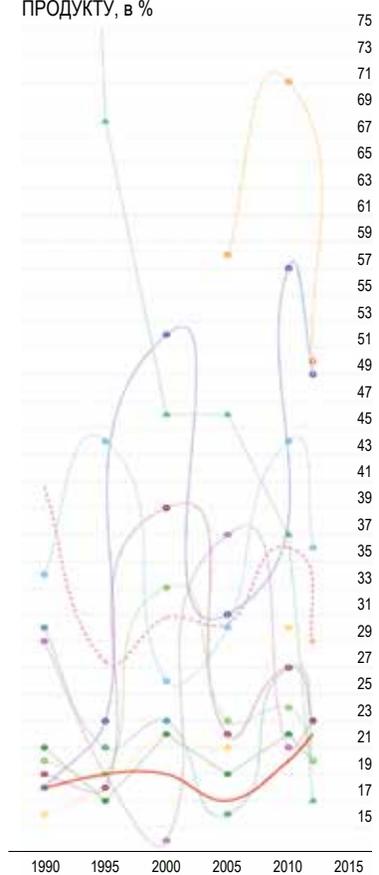


Рисунок 6.

Динамика основных показателей инвестиционной активности регионов Северо-Кавказского экономического района, 1990–2012 гг.

### Калужская область

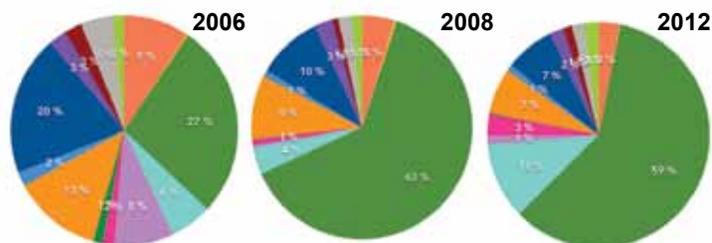
имеет выгоды, обусловленные благоприятным экономико-географическим положением. Территория успешно использует преимущества, связанные с близостью к столице (как крупного рынка сбыта товаров и услуг) и развитой транспортной системой. Близость Москвы заметно повлияла на внутренние различия в системе расселения и инвестиционно-экономическом ландшафте области. Территории, входящие в южную часть Московской агломерации, не только плотнее заселены, но и концентрирует большинство инноваций, передовых предприятий и инвестиционных проектов, в частности, благодаря созданию там индустриальных парков. Города северо-восточной зоны, соседствующей с Московской областью, быстро растут. Так с 2006 по 2012 г. численность населения Калуги выросла с 327,5 тыс. чел. до 331,4 тыс. чел., Обнинска – со 105,4 тыс. чел. до 106,0 тыс. чел. Одновременно численность населения в городах юго-западной зоны сокращается: в Кирове – с 38,8 тыс. чел. до 31,4 тыс. чел., в Людиново – с 41,5 тыс. чел. до 39,8 тыс. чел.

Следует отметить элементы инновационного развития в региональной экономике. Так, за последние 6 лет при стабильном числе субъектов хозяйствования заметно выросла величина их совокупного оборота, что свидетельствует о наличии качественных изменений. Распределение числа предприятий по отраслям экономики оставалось практически неизменным, за исключением некоторых отраслей. Кризис 2008 г. существенно сократил долю компаний в финансовом секторе и в сфере недвижимости. Резко увеличилось число субъектов хозяйственной деятельности в области государственного управления и обеспечения безопасности, что было вероятно связано с привлекательностью бюджетного финансирования данных отраслей (рис. 7).

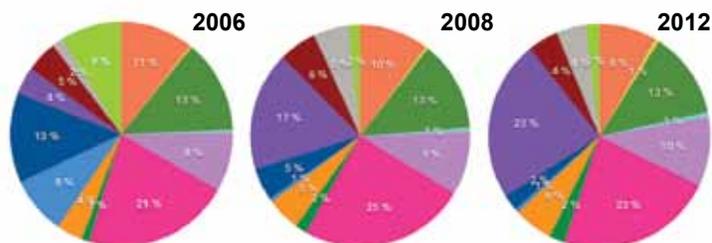
Заметно изменилась структура валового регионального продукта. Увеличилась доля обрабатывающих производств с 29,2% в 2006 г. до 38,2% в 2012 г., строительного сектора – с 6,2 до 8,2%, операций с недвижимым имуществом – с 7,3 до 9,0% соответственно. Сократилась доля сельского хозяйства с 11,5% в 2006 г. до 7,4% в 2012 г., торговли и ремонта – с 16,8% до 12,7%, транспорта и связи – с 9,4 до 5,4% соответственно. В структуре объема отгруженных товаров и услуг за этот период вдвое сократилось производство пищевых продуктов (с 23,3 до 11,1%) и неметаллических изделий, кроме резиновых и пластмассовых (с 6,9 до 3,2%), в 2,5 раза сократилось производство машин и оборудования, втрое – целлюлозно-бумажное производство (с 8,9 до 2,8%). В то же время более, чем в 5 раз выросло производство транспортных средств и оборудования (с 8,6 до 45,5%), в 1,4 раза – производство электрооборудования, электронного и оптического оборудования (с 15 до 21%).

Такие изменения в структуре ВРП тесно связаны с отраслевой структурой инвестиций: в период с 2006 по 2012 г. отмечается значительная концентрация вложений в реальный сектор экономики, в наиболее конкурен-

ИНВЕСТИЦИИ В ОСНОВНОЙ КАПИТАЛ ПО ОТРАСЛЯМ ЭКОНОМИКИ  
(млн руб., 2006, 2008, 2012 гг.)

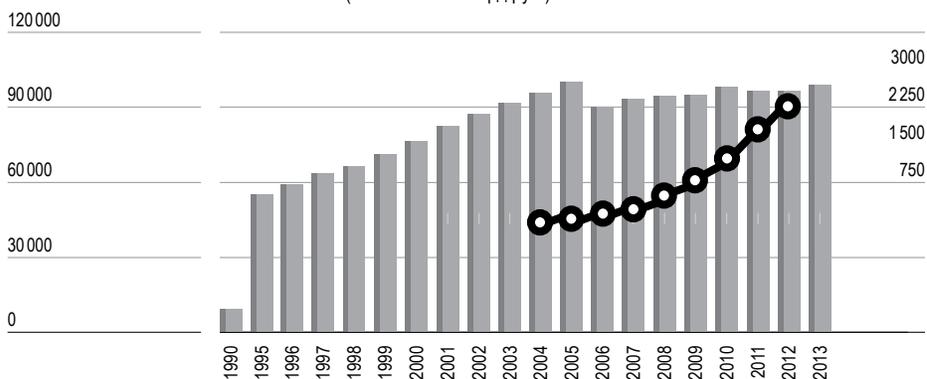


РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ОТРАСЛЯМ ЭКОНОМИКИ  
(ед., 2006, 2008, 2012 гг.)



- с/х
- обрабатывающие производства
- торговля, ремонт
- финансы
- образование
- рыболовство
- производство энергии, газа, воды
- гостиницы, рестораны
- недвижимость
- здравоохранение
- добыча ПИ
- строительство
- транспорт, связь
- гос. управление, оборона
- прочие

КОЛИЧЕСТВО ПРЕДПРИЯТИЙ (ед. 1990–2012 гг.)  
И ИХ ОБОРОТ (2004–2012 гг. млрд руб.)



**Рисунок 7. Основные показатели экономического и инвестиционного развития Калужской области.**

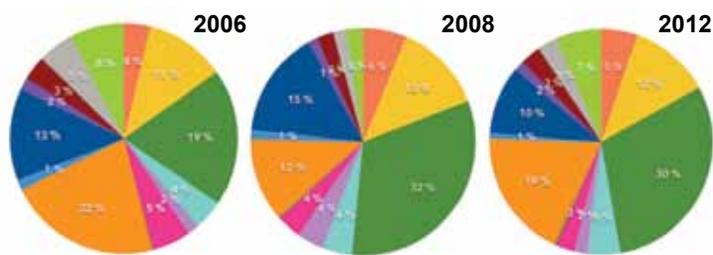
тоспособные и значимые его сферы – обрабатывающую промышленность, недвижимость, транспорт и связь. В 2006 г. существенная доля инвестиций в основной капитал концентрировалась в сферах обрабатывающих производств (27%) и недвижимости (20%), остальная часть была равномерно распределена среди иных сфер экономики. В кризисном 2008 г. доля инвестиций в обрабатывающие производства вдвое увеличилась (до 63%) и к 2012 г. остается наиболее значительной (59%). В 2012 г. к указанным отраслям добавилась сфера производства электроэнергии, газа и воды, в которой работает незначительное количество предприятий и организаций, но которая наряду с этим получает 11% инвестиций в основной капитал (рис. 6).

Следует отметить, что высокие позиции Калужской области в инвестиционных рейтингах сохраняются не только благодаря позиционным выгодам, но и вследствие формирования благоприятных институциональных условий. Согласно совместному исследованию аудиторской компании KPMG и Российского союза промышленников и предпринимателей [8] в отличие от многих регионов, которые в качестве конкурентных преимуществ выделяют действующие производственные мощности, инфраструктуру или природно-ресурсную базу, Калужская область пошла по другому пути. Ее руководители попытались сосредоточиться на следующих конкурентных преимуществах: клиентоориентированная политика, продуманный и эффективный подход к работе с инвесторами, непрерывное развитие и совершенствование инфраструктуры региона и выгодное географическое положение (близость к Москве и странам Восточной Европы). Формируются элементы региональной институциональной инвестиционной среды. Создана система региональных институтов развития, индустриальных парков, особых экономических зон и логистических центров, которые помогают реализовывать инвестпроекты максимально быстро и комфортно [5, 6]. Еще одним привлекательным для инвесторов фактором является высокая степень «кластеризации» экономики региона – вновь возникающие предприятия имеют возможность взаимодействовать с уже функционирующими или ориентировать на них свое производство посредством технологии B2B.

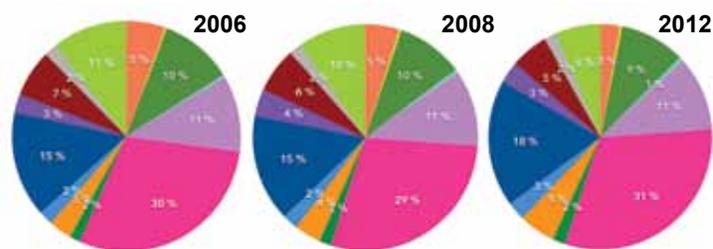
### **Республика Татарстан**

занимает выгодное транспортно-географическое положение, находясь на пересечении важнейших магистралей, соединяющих восток и запад, север и юг страны и успешно использует это преимущество [6, 15]. Благодаря хорошо развитой системе городского расселения, население по территории региона распределено равномерно, численность населения городов пропорционально возрастает. За шесть лет с 2006 по 2012 г. численность населения выросла в г. Казани со 1 116 тыс. чел. до 1 117 тыс. чел., в г. Набережные Челны – с 506,4 тыс. чел. до 519 тыс. чел., в г. Нижнекамске – с 226,6 тыс. чел. до 235,4 тыс. чел., в г. Альметьевске – с 141,9 тыс. чел. до 149 тыс. чел.

ИНВЕСТИЦИИ В ОСНОВНОЙ КАПИТАЛ ПО ОТРАСЛЯМ ЭКОНОМИКИ  
(млн руб., 2006, 2008, 2012 гг.)

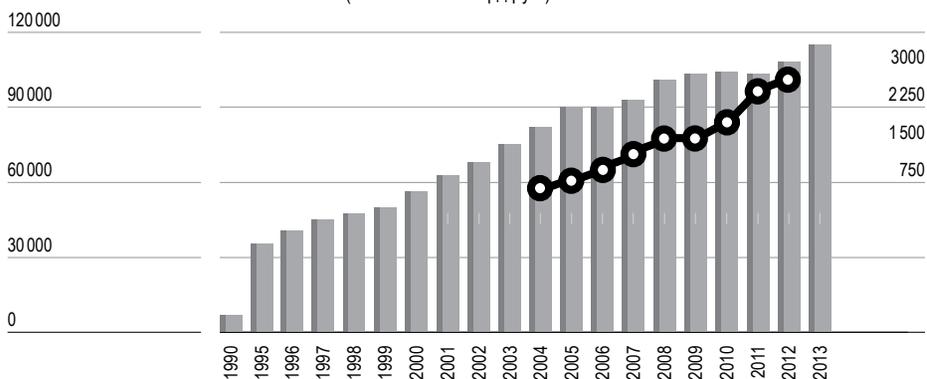


РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ОТРАСЛЯМ ЭКОНОМИКИ  
(ед., 2006, 2008, 2012 гг.)



- |                               |                                    |                            |
|-------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| ● с/х                         | ● рыболовство                      | ● добыча ПИ                |
| ● обрабатывающие производства | ● производство энергии, газа, воды | ● строительство            |
| ● торговля, ремонт            | ● гостиницы, рестораны             | ● транспорт, связь         |
| ● финансы                     | ● недвижимость                     | ● гос. управление, оборона |
| ● образование                 | ● здравоохранение                  | ● прочие                   |

КОЛИЧЕСТВО ПРЕДПРИЯТИЙ (ед. 1990–2012 гг.)  
И ИХ ОБОРОТ (2004–2012 гг. млрд руб.)



**Рисунок 8. Основные показатели экономического и инвестиционного развития Республики Татарстан.**

Промышленность является основным драйвером экономического развития, обеспечивая высокие темпы роста региональной экономики. Структура промышленности диверсифицирована, хотя лидирует сырьевой сектор, представленный добычей нефти. Но и отрасли второго плана функционируют вполне устойчиво, в том числе и в периоды усиления кризисных явлений. Тем не менее, в структуре валового регионального продукта произошли изменения. В период с 2006 по 2012 г. доля добычи полезных ископаемых сократилась с 30,6 до 22,2%, строительства с 10,3 до 9,7%. Выросла доля обрабатывающих производств с 16,7 до 17,4%, торговли и ремонта – с 11,7 до 14%, транспорта и связи – с 6,9 до 7,7%, сферы недвижимости – с 4,8% до 8,6%. В структуре объема отгруженных товаров и услуг заметно увеличилась доля производства кокса и нефтепродуктов – с 16,8 до 24,5%. Сократилась доля производства транспортных средств и оборудования – с 25,1 до 20,3%. При этом Татарстан – единственный из регионов-ключей, демонстрирующий устойчивый рост числа предприятий (более чем в 3 раза за постсоветский период) и их совокупного оборота, сохранение их количества в отраслях экономики (рис. 8).

Стабильность экономики отразилась и на неизменности структуры инвестиций в основной капитал, которая соответствует специализации региона и способствует увеличению доли поддерживаемых капиталовложениями отраслей в ВРП региона. Кризис существенно не повлиял на расстановку приоритетов в инвестировании. Произошло лишь незначительное сокращение доли инвестиций в сферу транспорта и недвижимости, и заметное увеличение в обрабатывающую промышленность.

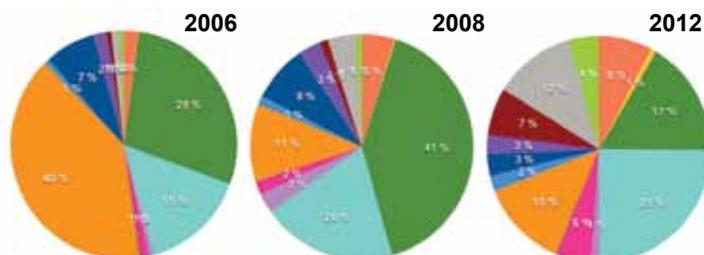
Выгоды богатого ресурсного потенциала и основательного экономического фундамента были подкреплены грамотными административно-управленческими решениями, направленными на поддержку инвесторов. Инвестиционная инфраструктура республики признана самой эффективной в России. ОЭЗ «Алабуга», созданная в 2005 г. и официально запущенная в конце 2007 г., является крупнейшей в своем роде на территории России, в 2015 г. ее выручка составила 731,5 млн руб. (в 660 раз больше, чем в 2007 г.).

Анализ инвестиционной политики Татарстан показал, что ведущим фактором снижения рисков в условиях сырьевой ориентации экономики является диверсификация регионального производства. Именно такая стратегия развития характерна для Республики. Регион является привлекательным для инвестиций как в добывающий сектор, так и в высокотехнологичные отрасли, поэтому он стабильно занимает высокие позиции в рейтингах инвестиционной привлекательности.

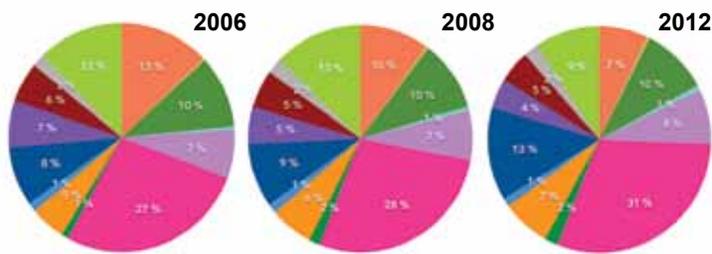
### **Смоленская область,**

не смотря на очевидные потенциальные преимущества экономико-географического положения (регион является важным транспортным

ИНВЕСТИЦИИ В ОСНОВНОЙ КАПИТАЛ ПО ОТРАСЛЯМ ЭКОНОМИКИ  
(млн руб., 2006, 2008, 2012 гг.)

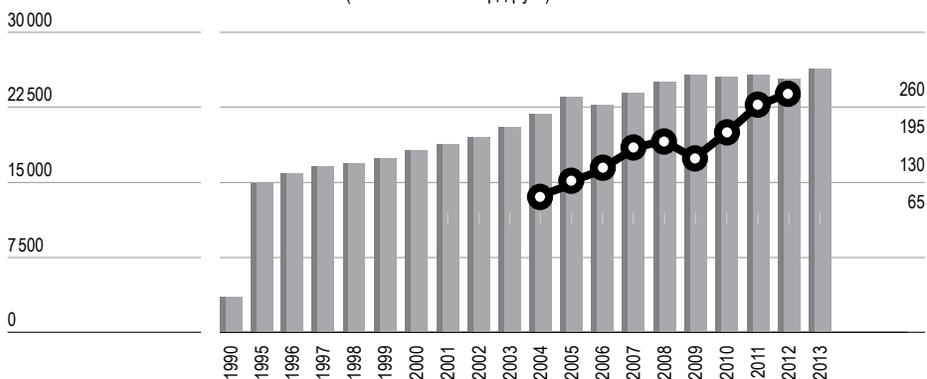


РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ОТРАСЛЯМ ЭКОНОМИКИ  
(ед., 2006, 2008, 2012 гг.)



- с/х
- обрабатывающие производства
- торговля, ремонт
- финансы
- образование
- рыболовство
- производство энергии, газа, воды
- гостиницы, рестораны
- недвижимость
- здравоохранение
- добыча ПИ
- строительство
- транспорт, связь
- гос. управление, оборона
- прочие

КОЛИЧЕСТВО ПРЕДПРИЯТИЙ (ед. 1990–2013 гг.)  
И ИХ ОБОРОТ (2004–2012 гг. млрд руб.)



**Рисунок 9. Основные показатели экономического и инвестиционного развития Смоленской области.**

и коммуникационным узлом, занимает выгодное приграничное и пристольичное положение), не получила заметного притока инвестиционных проектов. Население сосредоточено в двух региональных центрах: административном – г. Смоленске, численность которого растет и северо-восточном – г. Вязьма, с неизменным числом жителей. Остальные города – Рославль, Ярцево, Сафоновно – теряют население.

Число предприятий в отраслях экономики региона оставалось практически неизменным, однако направление инвестиций в основной капитал изменилось кардинальным образом. Если в докризисный 2006 г. 40% вложений приходилось на предприятия транспорта и связи, то уже в 2008 г. их финансирование сократилось почти в 4 раза. Уменьшились инвестиции в сферу сельского хозяйства и обрабатывающую промышленность (рис. 9). В результате недофинансирования доля сельского и лесного хозяйства в ВРП сократилась с 11 до 7,3%, транспорта и связи – с 10,1 до 9,3%. Примечательно, что активное вложение средств в сферу производства электроэнергии, газа в конечном счете выразилось в снижении доли этой отрасли в ВРП региона с 8,9 до 7,4%, что явно свидетельствует о неэффективности вложений.

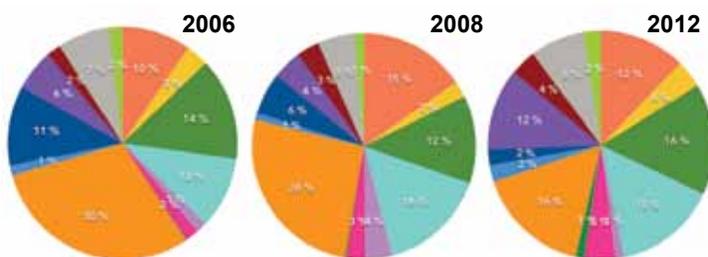
В то же время в структуре ВРП увеличилась доля строительства – с 8 до 10,7%, торговли – с 17,9 до 19,7%, госуправления и обороны – с 5,2 до 7,1%. Произошли изменения в структуре отгруженных товаров и услуг: сократилась доля производства пищевых продуктов с 14,8 до 12,6, производства транспортных средств и оборудования с 11,6 до 9,1%. Увеличилась доля целлюлозно-бумажной промышленности, обработки древесины и производства из дерева – с 4,2 до 8,2%, химическое производство – с 9,5 до 13,2%, производство резины и пластмассовых изделий – с 2,8 до 7,2%, металлургическое производство – с 6,6 до 8,8%, производство машин и оборудования – с 4,1 до 5,4%, электро- и оптического оборудования – с 11,6% до 13,2%.

Смоленская область входит в число регионов России, не обладающих повышенной инвестиционной привлекательностью, каких в России большинство. Между ними идет активная конкурентная борьба за привлечение инвесторов, и большое значение в этой борьбе имеют факторы, выходящие за рамки стандартных требований к региональному инвестиционному климату. Среди наиболее востребованных у инвесторов «бонусов» – наличие особых экономических зон, подготовленные инвестиционные площадки и активная позиция губернатора в качестве куратора инвестиционных проектов и гаранта защиты инвестиций. По этим показателям Смоленская область не дотягивает до уровня инвестиционно успешных регионов, занимая традиционно низкие позиции в рейтингах.

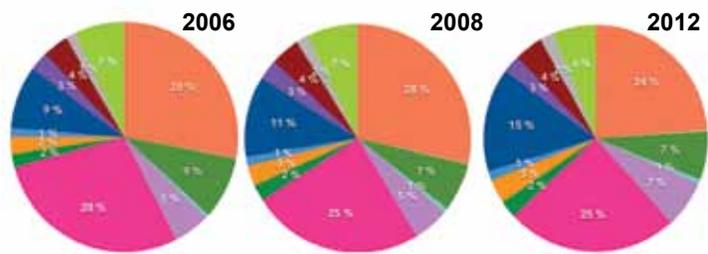
### **Ставропольский край**

входит в число регионов-середняков по уровню инвестиционного развития и вынужден бороться за каждого инвестора, создавая ему

ИНВЕСТИЦИИ В ОСНОВНОЙ КАПИТАЛ ПО ОТРАСЛЯМ ЭКОНОМИКИ  
(млн руб., 2006, 2008, 2012 гг.)

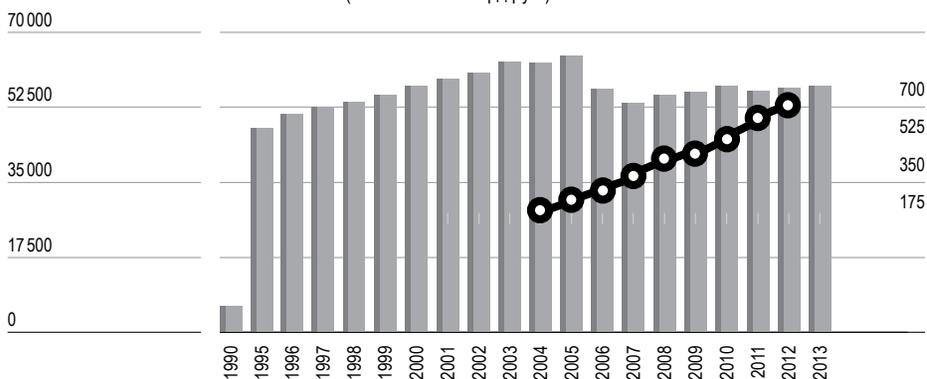


РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ОТРАСЛЯМ ЭКОНОМИКИ  
(ед., 2006, 2008, 2012 гг.)



- |                               |                                    |                            |
|-------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| ● с/х                         | ● рыболовство                      | ● добыча ПИ                |
| ● обрабатывающие производства | ● производство энергии, газа, воды | ● строительство            |
| ● торговля, ремонт            | ● гостиницы, рестораны             | ● транспорт, связь         |
| ● финансы                     | ● недвижимость                     | ● гос. управление, оборона |
| ● образование                 | ● здравоохранение                  | ● прочие                   |

КОЛИЧЕСТВО ПРЕДПРИЯТИЙ (ед. 1990–2013 гг.)  
И ИХ ОБОРОТ (2004–2012 гг. млрд руб.)



**Рисунок 10.** Основные показатели экономического и инвестиционного развития Ставропольского края.

максимально благоприятные условия деятельности. Однако, это далеко не всегда удается. Относительно удачное размещение края в пределах транзитных транспортных коридоров и вблизи границ страны нивелируется соседством с более экономически развитыми регионами – Краснодарским краем и Ростовской областью, имеющими схожую специализацию экономики, но большие возможности реализации инвестиционного потенциала. Складываются неодинаковые тенденции в изменении численности населения главных городов. В Ставрополе и городах курортах (Пятигорске, Ессентуках, Кисловодске) наблюдается рост населения, а в крупном промышленном и транспортном центре Невинномысске – сокращение.

С 2005 г. идет процесс уменьшения числа предприятий при росте их совокупного оборота, что указывает на снижение предпринимательской активности при сохранении спроса на продукцию. Распределение числа предприятий по отраслям экономики с 2006 по 2012 г. оставалось практически неизменным, даже в кризисные годы (рис. 10).

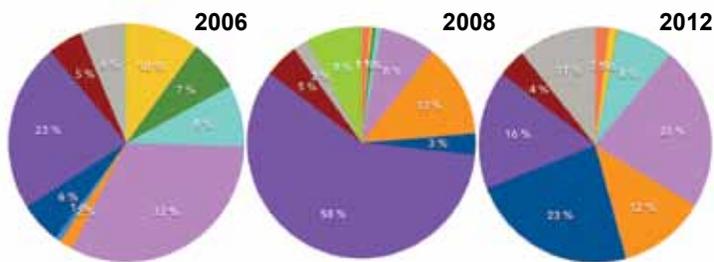
Структура инвестиций в основной капитал претерпела существенные трансформации: вдвое сократилось финансирование сферы транспорта и связи, практически полностью – сферы недвижимости. Вложения в сельское хозяйство, производство энергии, газа и воды, а также строительство несколько увеличились, но в целом их доля невысока. Выросли вложения в социальную сферу, госуправление и оборону. Одновременно меняется и структура ВРП – сжалась доли сельского хозяйства с 16,3 до 13%, производства электроэнергии, газа и воды – с 6,8 до 5,9%, транспорта и связи – с 15 до 9,1%. Выросла доля строительства – с 5,3 до 9,9%, торговли – с 17,4 до 20%, госуправления и обороны – с 4,3 до 8%. В структуре отгруженных товаров и услуг возросла доля производства пищевых продуктов – с 37 до 39,4% и металлургического производства – с 2,7 до 3,2%, но сократилось производство кокса и нефтепродуктов – с 2,5 до 0,2%, транспортных средств и оборудования – с 3,7 до 2,2%.

Ставропольский край занимает места выше среднего в рейтингах «РИА Рейтинг» по социальным показателям, но довольно низкое – по финансово-экономическим, что косвенно указывает на искусственную поддержку социальной сферы властями региона на фоне недостаточного поступления в бюджет средств от экономически эффективных предприятий.

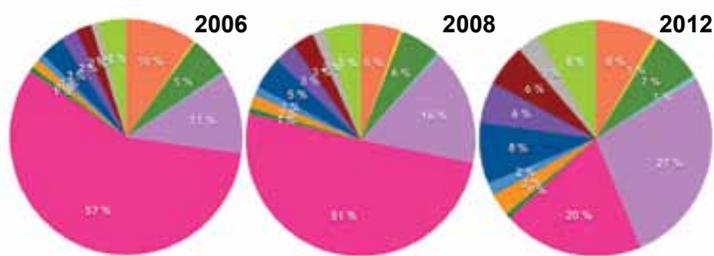
### **Республика Ингушетия**

не имеет естественных преимуществ перед регионами-соседами, более того, у нее гораздо хуже развита инфраструктура, особенно транспортная. Сложный рельеф местности предопределил отсутствие крупных городов в южной части республики. Население растет только в двух городах – Магасе и Карабулаке, остальные население теряют.

ИНВЕСТИЦИИ В ОСНОВНОЙ КАПИТАЛ ПО ОТРАСЛЯМ ЭКОНОМИКИ  
(млн руб., 2006, 2008, 2012 гг.)



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ОТРАСЛЯМ ЭКОНОМИКИ  
(ед., 2006, 2008, 2012 гг.)



- с/х
- обрабатывающие производства
- торговля, ремонт
- финансы
- образование
- рыболовство
- производство энергии, газа, воды
- гостиницы, рестораны
- недвижимость
- здравоохранение
- добыча ПИ
- строительство
- транспорт, связь
- гос. управление, оборона
- прочие

КОЛИЧЕСТВО ПРЕДПРИЯТИЙ (ед. 1990–2013 гг.)  
И ИХ ОБОРОТ (2004–2012 гг. млрд руб.)

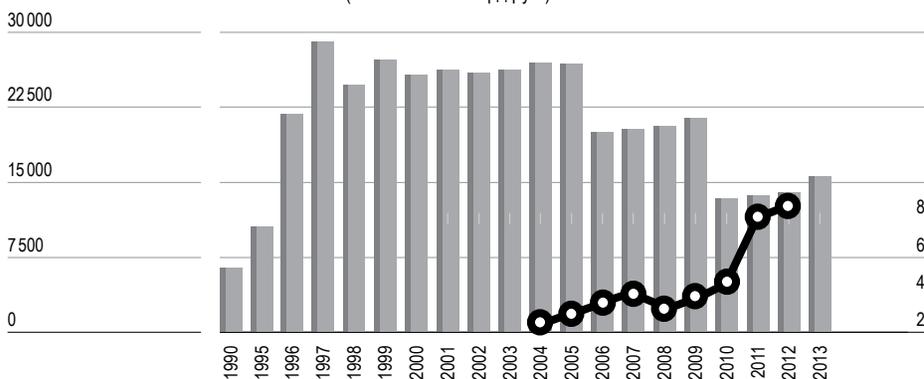


Рисунок 11. Основные показатели экономического и инвестиционного развития Республики Ингушетия.

Количество предприятий в Ингушетии резко увеличилось в 1990-е, но с 2006 г. наблюдается их сокращение, что, видимо, свидетельствует о падении предпринимательской активности. В то же время их совокупный оборот поступательно возрастает, указывая на наличие спроса на производимую продукцию (рис. 11). В 2 раза сократилось число торговых предприятий и выросло количество строительных организаций, что в первом случае указывает на уход предприятий «в тень», а во втором – рост привлекательности и доходности этой отрасли.

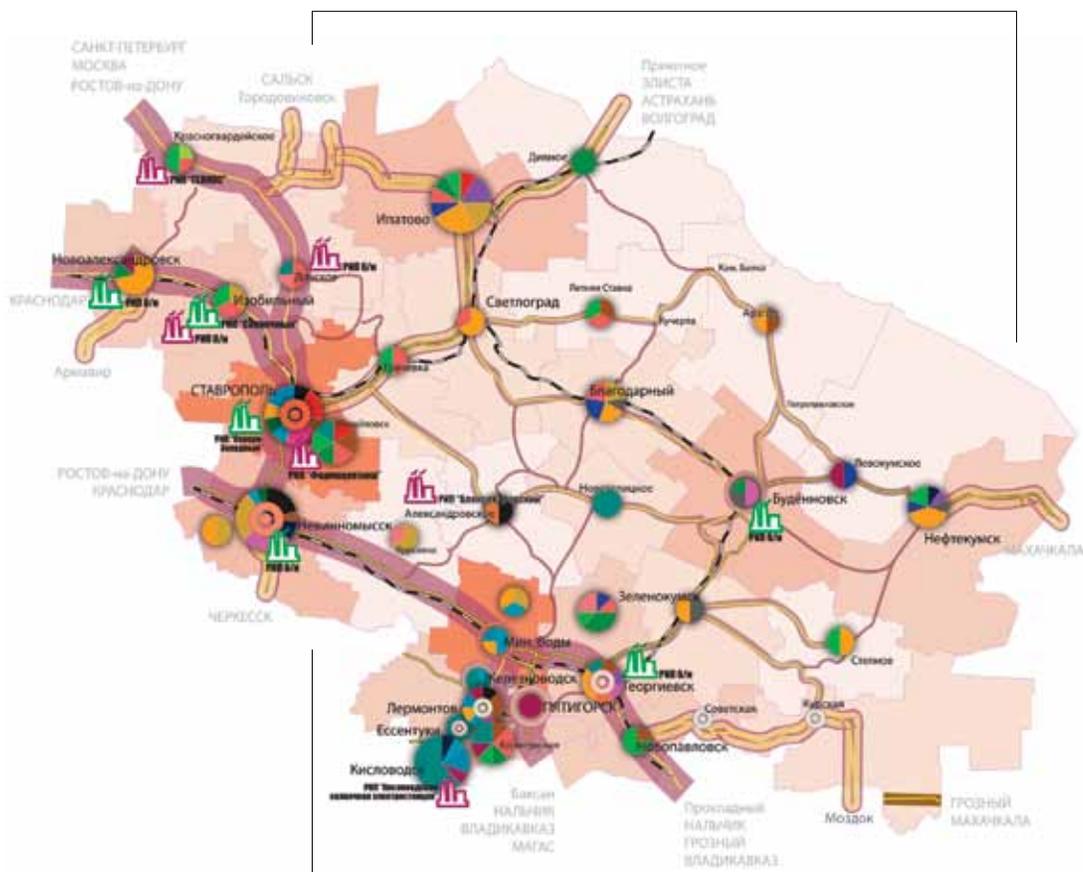
Ингушетия – пример кардинальной смены специализации региона в условиях рыночной экономики. В 2006 г. основу ВРП региона составляло сельское хозяйство – 22,6%. Заметна была роль торговли и ремонта (13%) и сферы госуслуг и обороны (13,9%). Добыча полезных ископаемых составляла 9,8%, строительство – 7,3%, транспорт и связь – 7,4%. В 2012 г. основу структуры ВРП составляли сферы госуправления, доля которой выросла до 22,6%, и строительства, доля которого выросла до 17%. Немного увеличилась доля сферы транспорта и связи – до 9,1%. Сельское хозяйство сократилось до 8,7%, торговля – до 10,4%. Добыча полезных ископаемых и обрабатывающие производства в структуре ВРП Ингушетии в 2012 г. отсутствуют. В то же время в структуре отгруженных товаров и услуг заметно сократилась доля производства пищевых продуктов – с 27,4 до 6,4%, увеличилась доля кокса и нефтепродуктов – с 15,7 до 34,4%, производства неметаллических продуктов – с 31,1 до 55,3%. Сократилась доля продукции металлургического производства – с 15,3 до 0,8%.

Еще более заметно менялись предпочтения инвесторов. Практически прекратились инвестирования в добывающую и обрабатывающую отрасли промышленности, но выросли капвложения в недвижимость и сферу госуправления, что нашло отражение в изменении структуры ВРП.

Инвестиционная привлекательность республики – одна из самых низких в стране. Не смотря на определенные реформы, проводимые в регионе, крупных инвестиционных проектов так и не появилось. Экономическое развитие фактически полностью зависит от финансовой поддержки со стороны федерального центра (доля собственных налоговых и неналоговых доходов в доходной части бюджета не превышает 50%). Однако в условиях современной не вполне благоприятной экономической конъюнктуры возможности для бюджетной поддержки депрессивных регионов сокращаются. Особых геополитических или других факторов привлечения бюджетных инвестиций нет.

На внутрирегиональном уровне исследования были установлены особенности территориального распределения инвестиций в регионе-ключе – Ставропольском крае – и протестировано предположение о связи территориальной структуры хозяйства с географией инвестиционных проектов (рис. 12).

Анализ размещения инвестиционных проектов выявил их не полное соответствие отраслевой структуре. Примерно половина всех инвестиций



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

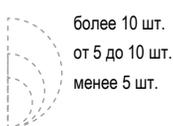
Отраслевая структура инвестиционных проектов муниципальных образований

- металлургия
- машиностроение и металлообработка
- транспорт и логистика
- энергетическая промышленность
- нефтегазовая промышленность
- легкая промышленность
- лесная промышленность
- переработка отходов
- АПК и пищевая промышленность
- виноградарство
- химическая промышленность
- фармацевтическая промышленность
- стекольная промышленность
- строительная промышленность
- недвижимость
- животноводство и птицеводство
- растениеводство
- овцеводство
- садоводство
- социальная сфера
- торговля
- туризм и рекреация

Инвестиции в основной капитал, 2013



Количество инвестиционных проектов



- РИП без резидентов
- РИП с резидентами

Рисунок 12.

Инвестиционная карта Ставропольского края.

направлены на развитие промышленного сектора, составляющего только 13,7% ВРП, включая перерабатывающие предприятия агропромышленного комплекса, примерно четверть – на развитие сельского хозяйства, составляющего 13% ВРП, 15% – на развитие сферы услуг (доля торговли и ремонта в структуре ВРП – 20%, услуг в сфере недвижимости – 6%, социальных услуг – 6,5%) и очень незначительная часть инвестиционных проектов связана с развитием инфраструктуры [7, 9].

Размещены инвестиционные проекты по территории региона крайне неравномерно, что обусловлено их тяготением к урбанизированным зонам и сложившимся устойчивым элементам ТСХ (промышленным центрам, узлам и пунктам, транспортным магистралям федерального уровня), концентрирующим трудовые ресурсы и имеющим высокий потребительский спрос. Выявлено, что размер инвестиций и количество инвестпроектов тем больше, чем выше ранг элемента ТСХ региона и чем ближе расположена транзитная транспортная магистраль. Неравномерность размещения инвестиционных проектов провоцирует внутрирегиональную миграцию лиц трудоспособного возраста, их концентрацию в главных экономических центрах и усиливает депопуляционные процессы в слаборазвитых территориях.

Анализ планируемых сроков реализации инвестиционных проектов показывает, что средний горизонт планирования на территории края невысок – 3 года. Всего 11 проектов (6%) рассчитаны на среднесрочную перспективу, они привязаны к узловым элементам ТСХ края. И только 2 территории оказались достаточно привлекательными для инвестиционного освоения в долгосрочной перспективе (более 10 лет) – это строительство комплекса переработки газа Северного Каспия в этилен и его производные (г. Буденновск) и развитие плодоводства, ягодниководства и овощеводства закрытого грунта, включая закладку высокотехнологичного в обслуживании интенсивного сада (Георгиевский район).

Доля реализованных инвестиционных проектов в регионе низкая. Те из них, что относятся к развитию ведущей сельскохозяйственной отрасли крайне немногочисленны, имеют низкую стоимость и носят локальный характер. Наиболее крупные реализованные проекты направлены в развитие сферы туризма и нефтегазохимической промышленности. Большинство из них увязаны со специализациями городов-узловых структур ТСХ региона и направлены на увеличение объемов производства и (или) оказания услуг, но не на углубление специализации с расширением спектра услуг или ассортимента товаров.

## **ВЫВОДЫ**

1. Опора на географические подходы к организации исследования (принцип полимасштабности, учет пространственно-временных особенностей, методы ключевых территорий, геоинформа-

ционного моделирования и др.) позволила выявить некоторые особенности пространственного распределения инвестиций в Европейской части России. Важное место в программе исследования занимает сопряженный анализ территориальной структуры хозяйства и механизмов встраивания в нее инвестиционных проектов.

2. До начала 2000-х годов инвестиционные процессы были развиты крайне слабо практически повсеместно по всей территории страны. Реальное формирование инвестиционного ландшафта Европейской России приходится на период с 2000 по 2005 г. В борьбе за инвесторов между регионами возникали сопернические отношения и складывались стратегии использования конкурентных преимуществ. Определились отстающие и лидирующие группы регионов. Первоначальное превосходство (до 2005 г.) было на стороне территорий, обеспеченных естественными преимуществами, главным образом, более высоким ресурсным потенциалом, позиционными выгодами, в том числе хорошим транспортно-географическим положением. Определенную роль в процессе перераспределения инвестиций между субъектами макрорегионов сыграла сложившаяся советская территориально-отраслевая структура хозяйства. Позже (2005–2010 гг.) включается действие других факторов, в первую очередь, грамотного позиционирования и управленческой инициативы. При равных долях реинвестированных средств субъекты со схожими экономическими условиями показывали разные результаты: одни – активно вырвались вперед, другие – оставались на месте или стали быстро отставать. К 2012 г. на первый план выходят рыночные механизмы регулирования экономики, и инвестиции сосредотачиваются в лидирующих регионах, успевших окончательно утвердиться на рынке и сформировать относительно более прочную экономическую основу. Сложившееся неравноправие инвестиционного регионального развития только усиливается. «Передовики» становятся практически недосягаемыми для остальных.

3. Успех «прорывных» и резкое падение уровня инвестиционной активности «провалившихся» регионов следует связывать с неверной расстановкой приоритетов в процессе инвестирования. Основными факторами привлечения инвестиций следует считать следующие:

- формирование диверсифицированной региональной экономики с установкой на равномерное инвестирование во все сферы экономики с выделением приоритетных по ведущим направлениям специализации региона;
- стремление к стабилизации экономического развития, сдерживание количественного роста числа предприятий, особенно мелких, стимулирование создания крупных компаний-локомотивов;

- поддержка отраслей, создающих заметное увеличение валовой добавленной стоимости в среднесрочной перспективе.
4. Внутрорегиональное размещение инвестиционных проектов тесно связано с особенностями территориальной хозяйственно-расселенческой структуры. Наиболее привлекательными оказываются урбанизированные ареалы с высокой плотностью населения, концентрацией трудовых ресурсов и потребительского спроса, образующих наиболее устойчивые элементы территориальной структуры хозяйства. Большая часть реализованных инвестпроектов имеет низкую стоимость и краткосрочный горизонт планирования, увязана с локальной специализацией и направлена на увеличение объемов производства, но не способствует диверсификационным процессам по расширению спектра выпускаемых товаров и услуг. Важной особенностью внутрорегионального инвестиционного развития выступает транспортно-географическое микроположение поселений. Населенные пункты, расположенные вблизи автомобильных трасс повышенной проходимости имеют больше шансов для привлечения инвесторов. Размер инвестиций достаточно заметно варьирует в зависимости от транспортной доступности места.
  5. Установлено, что вероятность успешной реализации инвестиционных проектов выше в узловых структурах регионального хозяйства, при условии их соответствия отраслевой специализации. Не соответствующие отраслевой специализации инвестпроекты не реализуются, за исключением проектов с государственной финансовой поддержкой, направленных на формирование новой специализации. Таким образом, гипотеза о «встраиваемости» инвестпроектов в территориальную структуру хозяйства находит свое подтверждение.
  6. Внимание к развитию транспортно-логистической регионально системы является важным фактором управления процессами размещения инвестпроектов и планирования инвестиционного развития. Учёт особенностей и тенденций развития региональной расселенческо-хозяйственной структуры позволяет прогнозировать территориальную и отраслевую структуру инвестиций и успешность их реализации.
  7. Сопряженный анализ динамики ключевых экономических индикаторов экономического и инвестиционного развития показал, что рост инвестиций непосредственно не определяет роста экономики, но в то же время активное экономическое развитие сопровождается увеличением объема инвестиций. Другими словами, развитая экономика «тянет»

за собой инвестиции, а не наоборот. Причины такой в некотором роде парадоксальной ситуации связаны либо с неэффективностью инвестиционных проектов (если они не реализуются), либо с большим периодом их окупаемости и выхода на прибыльное функционирование.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабури́н В.Л., Горячо́ М.Д. География инвестиционного комплекса // Географический факультет МГУ. Москва, 2009. С. 216.
2. Бакланов П.Я. Территориальные структуры хозяйства в региональном управлении. М.: Наука, 2007. 239 с.
3. Бакланов П.Я. Пространственные системы производства (микроструктурный уровень анализа и управления). М.: Наука, 1986. 150 с.
4. Белоусов И.И. Основы учения об экономическом районировании: (Размещение и районирование производительных сил). М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976. 320 с.
5. Инвестиционный портал Калужской области. URL: <http://investkaluga.com> (дата обращения 27.03.17 г.).
6. Инвестиционный портал регионов России. URL: <https://www.investinregions.ru> (дата обращения 27.03.17 г.).
7. Интернет-портал об инвестиционной деятельности в Ставропольском крае. URL: <http://portal.stavinvest.ru> (дата обращения 27.03.17 г.).
8. Отчеты Агентства стратегических инициатив / Медиа // Портал Агентства стратегических инициатив. URL: <http://asi.ru/reports/> (дата обращения 27.03.17 г.).
9. Официальный информационный Интернет-портал органов государственной власти Ставропольского края. URL: <http://www.stavregion.ru>.
10. Презентация инвестиционного потенциала региона / О Смоленской области // Инвестиционный портал Смоленской области. URL: <https://smolinvest.com> (дата обращения 27.03.17 г.).
11. Программа социально-экономического развития Ставропольского края на 2010–2015 годы.
12. Схема территориального планирования Ставропольского края, 2006 г. (актуализированная редакция от 2011 г.).
13. Invest Tatarstan. URL: <http://invest.tatarstan.ru> (дата обращения 27.03.17 г.).

### REFERENCES

1. Baburin V. L., Gorjachko M. D. Geografija investicionnogo kompleksa (Geography of the investment complex). Geograficheskij fakul'tet MGU. Moskva, 2009. S. 216.

2. Baklanov P. Ja. Territorial'nye struktury hozjajstva v regional'nom upravlenii (Territorial structures of the economy in regional management). M.: Nauka, 2007. 239 s.
3. Baklanov P. Ja. Prostranstvennyye sistemy proizvodstva (mikrostrukturnyj uroven' analiza i upravlenija) (Spatial production systems (microstructural level of analysis and management)). M.: Nauka, 1986. 150 s.
4. Belousov I. I. Osnovy uchenija ob jekonomicheskom rajonirovanii: (Razmeshhenie i rajo-nirovanie proizvoditel'nyh sil) (Fundamentals of the doctrine of economic zoning: (Placement and regionalization of the productive forces)). M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1976. 320 s.
5. Investicionnyj portal Kaluzhskoj oblasti (Investment portal of the Kaluga region). URL: <http://investkaluga.com> (data obrashhenija 27.03.17 g.).
6. Investicionnyj portal regionov Rossii (Investment portal of Russian regions). URL: <https://www.investinregions.ru> (data ob-rashhenija 27.03.17 g.).
7. Internet-portal ob investicionnoj dejatel'nosti v Stavropol'skom krae (Internet portal on investment activities in the Stavropol Territory). URL: <http://portal.stavinvest.ru> (data obrashhenija 27.03.17 g.).
8. Otchety Agentstva strategicheskikh iniciativ (Reports of the Agency for Strategic Initiatives) / Media // Portal Agentstva strategicheskikh iniciativ. URL: <http://asi.ru/reports/> (data obrashhenija 27.03.17 g.).
9. Oficial'nyj informacionnyj Internet-portal organov gosudarstvennoj vlasti Stavropol'skogo kraja (The official information Internet portal of public authorities of the Stavropol Territory). – URL: <http://www.stavregion.ru>.
10. Prezentacija investicionnogo potenciala regiona (Presentation of the investment potential of the region) / O Smolenskoj oblasti // Investicionnyj portal Smolenskoj oblasti. URL: <https://smolinvest.com> (data obrashhenija 27.03.17 g.).
11. Programma social'no-jekonomicheskogo razvitija Stavropol'skogo kraja na 2010 – 2015 gody (Program of socio-economic development of the Stavropol Territory for 2010-2015).
12. Shema territorial'nogo planirovanija Stavropol'skogo kraja (Scheme of territorial planning of the Stavropol Territory), 2006 g. (aktualizirovan-naja redakcija ot 2011 g.)
13. Invest Tatarstan. URL: <http://invest.tatarstan.ru> (data obrashhenija 27.03.17 g.)

# БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ, № 1, 2017

УДК 612.178;  
796 :61 (075.8) Коломиец О.И. [Kolomietc O.],  
Петрушкина Н.П. [Petrushkina N.],  
Быков Е.В. [Bykov E.]

## ОСОБЕННОСТИ МЕТАБОЛИЧЕСКИХ АДАПТАЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

**Features of metabolic adaptive changes  
in various physical activities**

Цель исследования состояла в оценке метаболических изменений при различных стратегиях адаптации к физической нагрузке. Обследованы две группы спортсменов: спортсмены высокой квалификации (основная группа) и спортсмены, занимающиеся тхэквондо рекреационного характера (контрольная группа). В процессе тренировки для измерения и оценки показателей, характеризующих механизмы энергообеспечения двигательной деятельности спортсменов, использовали мониторинг Firstbeat-bodyguard. Выявлены особенности потребления кислорода и энергообмена в зависимости от степени тренированности. Полученные результаты подтверждают влияние уровня подготовленности спортсмена на характер течения адаптационных процессов, а также эффективность неинвазивных мониторинговых исследований, позволяющих вести постоянный контроль за функциональным состоянием спортсмена.

The aim of the study was to assess metabolic changes in different strategies of adaptation to physical load. The study included two groups of sportsmen: sportsmen of high qualification (major group) and athletes engaged in Taekwondo recreational nature (control group). In the process of training for measuring and evaluation of the indicators characterizing the mechanisms of energy supply of motive activity of sportsmen, used monitoring Firstbeat-bodyguard. The peculiarities of oxygen consumption and energy metabolism depending on the degree of fitness. The obtained results confirm the influence of the level of preparedness of the athlete on the nature of the flow adaptation processes, and the effectiveness of non-invasive monitoring studies that allow for constant monitoring of the functional state of the athlete.

**Ключевые слова:** спортсмены, метаболизм, энергообмен, адаптация, Firstbeat-мониторинг.

**Key words:** athletes, metabolism, energy metabolism, adaptation, Firstbeat-monitoring.

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности спортивной деятельности и снижение вероятности возникновения перетренированности обусловлены, прежде всего, корректной организацией тренировочного процесса. Характер адаптации к физической нагрузке связан со спецификой, направленностью и степенью выраженности биохимических и функциональных изменений, возникающих при систематической мышечной работе [9, 10, 11].

Нейроэндокринная регуляция, изменяя метаболические адаптационные процессы на различных этапах подготовки спортсмена, определяет сценарий адаптации в каждом конкретном случае. При этом для оценки метаболизма традиционно используют оценку различных биохимических и гормональных показателей [8]. Сложность выполнения таких исследований обусловлена инвазивностью, регистрацией этих показателей в различные моменты времени, применением специального оборудования и дорогостоящих реактивов и т.д.

В настоящее время внимание исследователей обращено к мониторинговым аппаратным (неинвазивным) исследованиям, которые позволяют непрерывно (ежесекундно) фиксировать функциональные изменения в основных системах жизнеобеспечения не только во время тренировки, но и в период позднего восстановления. На основе круглосуточного наблюдения оценивается характер адаптации к конкретной мышечной работе, выявляются «слабые места» спортсмена, прогнозируется успешность его деятельности и своевременно корректируются как тренировочный процесс, так и программа восстановления [2, 3]. Эти положения определяют актуальность и новизну проведенного исследования.

Цель исследования заключалась в оценке особенностей метаболических адаптационных изменений при различных мышечных нагрузках в тхэквондо на основе мониторинга физиологических показателей.

## ОРГАНИЗАЦИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент был проведен в соответствии с положениями Хельсинской Декларацией этических принципов для исследований с участием людей. На проведение исследования было получено этическое разрешение в Комитете по этике УралГУФК. Испытуемые подписали письменное согласие на добровольное участие в исследовании. Они были информированы о цели исследования, используемых методиках и предупреждены о рисках и преимуществах данного проекта.

Для оценки метаболических изменений при различных стратегиях адаптации к физической нагрузке были сформированы две группы спортсменов - тхэквондистов, однородных по возрасту и антропометрическим показателям. Средние значения возраста составили  $19,7 \pm 0,81$  года, длины тела –  $177,3 \pm 6,2$ , массы тела –  $66,1 \pm 2,11$  кг.

Спортсмены высокой квалификации (20 человек) объединены в основную группу. Контрольная группа представлена 20 спортсменами, занимающимися тхэквондо рекреационного характера.

Протокол исследования [7] предусматривал специальные физические нагрузки во время утренней и вечерней тренировок и регистрацию метаболических адаптационных изменений на протяжении занятия (60 минут).

Мониторинг осуществляли с использованием Firstbeat-bodyguard (Firstbeat-Technology-Ltd, Ювяскюля, Финляндия). Полученные данные были проанализированы с помощью соответствующего программного обеспечения “Firstbeat-sport” (версия 5.3.0.4).

Проведена оценка устойчивости к гипоксии (уровень потребления кислорода), характера и уровня метаболизма (метаболический эквивалент, общий энергетический обмен, в том числе отдельно – за счет углеводов и жиров).

Полученные данные были подвергнуты традиционной статистической обработке: расчет средних, ошибок средних, сравнение средне-групповых значений по критерию Стьюдента [1]. Различия считали статистически значимыми при значении  $t > 1,96$  (уровень достоверности – 95%).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования представлены в таблице 1. Как следует из этих данных, максимальное потребление кислорода в основной группе оказалось достоверно ниже, чем в контрольной, соответственно:  $68 \pm 1,26$  мл/кг/мин и  $79 \pm 1,38$  мл/кг/мин ( $t = 5,89$ ). Этот факт свидетельствует о более высоком уровне тренированности квалифицированных спортсменов по сравнению с лицами, у которых тренировочный процесс носил рекреационный характер, и соответственно о лучшей адаптации к мышечным нагрузкам.

Поскольку сценарий адаптации к мышечным нагрузкам определяется уровнем метаболизма, анализу подвергли такие показатели как: метаболический эквивалент (эквивалент обмена веществ) и общий энергообмен, в том числе отдельно за счет углеводов и жиров.

Уровни метаболического эквивалента, рассчитанные в мл/кг/мин/3,5, достоверно не различались (табл. 1), составляя в основной группе –  $21,5 \pm 1,12$  и  $19,9 \pm 0,21$  – в контрольной группе ( $t = 1,40$ ), то есть спортсмены обеих групп при выполнении мышечной работы вне зависимости от ее характера реализовали физические возможности в одинаковой степени.

Далее были рассмотрены такие значимые характеристики, как показатели общего энергообмена и отдельно энергообмена за счет углеводов и жиров (табл. 1). Общий энергообмен в основной группе оказался значимо ниже, чем в контрольной группе (рекреационный характер тренировки):  $366 \pm 9,9$  ккал против  $578 \pm 11,2$  ккал ( $t = 14,18$ ), что также подтверждает лучшую адаптацию квалифицированных спортсменов к реализованным в процессе тренировки мышечным нагрузкам.

Хотя в обеих группах показатели энергообмена за счет углеводов и жиров были однонаправлены, установлены статистически значимые различия между группой спортсменов, занимавшихся по рекреационной программе, и

Таблица 1. ПОКАЗАТЕЛИ МЕТАБОЛИЧЕСКОЙ СТОИМОСТИ ТРЕНИРОВКИ ОБСЛЕДОВАННЫХ СПОРТСМЕНОВ

Показатели	Группы, $M \pm m$ , значение критерия Стьюдента		
	контрольная	основная	t*
Максимальное потребление кислорода, мл/кг/мин	62 ± 1,26	79 ± 1,38	5,89
Метаболический эквивалент, мл/кг/мин/3,5	21,1 ± 1,12	19,9 ± 0,21	1,40
Общий энергообмен, ккал, в том числе:	578 ± 11,2	366 ± 9,9	14,18
за счет углеводов, в % от общего энергообмена	68,9 ± 1,76	55,7 ± 0,99	6,54
за счет жиров, в % от общего энергообмена	31,1 ± 1,25	44,3 ± 0,63	9,43

\* — различия статистически значимы при значении  $t > 1,96$  (95% уровень значимости).

соотношение

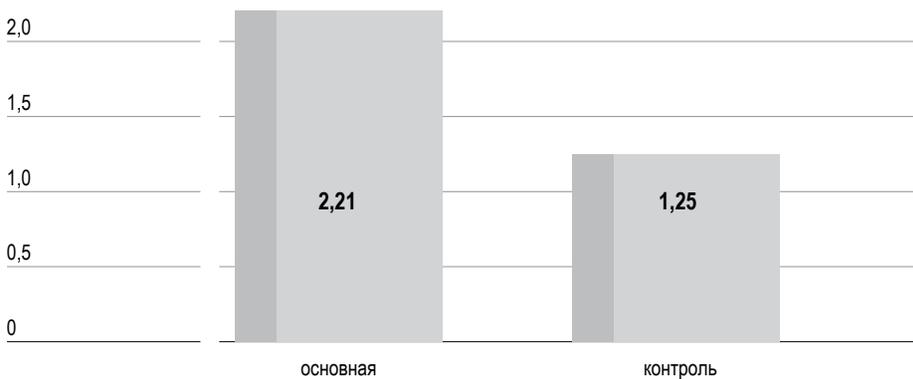


Рис. Соотношение обменных процессов «углеводы / жиры» в обследуемых группах спортсменов.

группой квалифицированных спортсменов. Так, общий энергообмен за счет углеводов в основной группе составил  $68,9 \pm 1,76\%$  от общего энергообмена, в контрольной –  $55,7 \pm 0,99\%$  ( $t = 6,54$ ). В основной группе энергообмен за счет жиров оказался достоверно выше, чем в контрольной группе, соответственно:  $44,3 \pm 0,63\%$  и  $31,1 \pm 1,25$  и ( $t = 9,43$ ).

Вследствие таких особенностей соотношение обменных процессов «углеводы / жиры» в основной группе было равным 2,21, а в контрольной – 1,25 (рисунок). Установленные различия свидетельствуют о различных сценариях адаптации к мышечной нагрузке обследованных спортсменов.

Известно, что адаптация к факторам окружающей среды может быть достигнута за счет использования механизмов двух полярных стратегий: резистентная и толерантная [4].

Резистентная стратегия направлена на активное преодоление организмом действия экстремального раздражителя, что обеспечивается максимизацией функций, усилением основного обмена и катаболических процессов. Это приводит к истощению резервов организма и срыву адаптации.

В случае реализации адаптационных механизмов по сценарию толерантной стратегии увеличивается устойчивость к стрессорным воздействиям, гипоксии и наблюдается экономизация основных функций на всех уровнях организации [5, 10].

Толерантная стратегия адаптации к нагрузкам сопровождается изменением физиологических характеристик состояния человека, а именно уменьшением потребления кислорода и снижением энергетических затрат при одинаковом метаболическом эквиваленте нагрузки. Таким образом, полученные в ходе проведенного исследования результаты подтверждают влияние уровня подготовленности спортсмена на характер течения адаптационных процессов.

Организация тренировочного процесса направлена, в конечном счете, на повышение эффективности спортивной деятельности, что в свою очередь обусловлено комплексом физиологических изменений, обеспечивающих оптимальный сценарий адаптации к мышечным нагрузкам. Реализация этого сценария определяется направленностью и выраженностью физиологических трансформаций и биохимических реакций [6, 13].

При выполнении физической нагрузки максимальное потребление кислорода и метаболический эквивалент отражают максимальные аэробные возможности спортсмена и соответственно максимальную реализацию уровня физических возможностей [12].

При оценке особенностей метаболических адаптационных изменений, регистрируемых в процессе постоянного мониторинга, нами были выявлены некоторые особенности, связанные со спецификой мышечных нагрузок.

Эти различия касались таких показателей как: максимальное потребление кислорода, уровень общего энергообмена и отдельно энергообмена за счет углеводов и жиров. При этом уровни метаболического эквивалента, рас-

считанные для квалифицированных спортсменов и для спортсменов, занимающихся по рекреационной программе, достоверно не различались. Эти факты подтверждают влияние специфики тренировочного процесса на характер адаптации к мышечным нагрузкам.

Обращает на себя внимание факт значительного превышения общего энергообмена в основной группе и большой вклад в него утилизации жиров, что также объясняется особенностями регуляции висцеральных систем и, соответственно, сценарием адаптации.

Ранее при исследовании особенностей метаболизма спортсменов в период сна под воздействием восстановительных мероприятий [3] было выявлено не только преобладание процессов восстановления, но и улучшение качества сна. Более выраженное вагусное влияние в период сна, зарегистрированное в этой работе было подтверждено высоким индексом восстановления, низкими значениями минимальной и максимальной частоты сердечных сокращений, а также показателей потребления кислорода и особенностями энергообмена, зафиксированного во время сна.

Поскольку именно при выполнении физической нагрузки максимальное потребление кислорода и метаболический эквивалент отражают максимальные аэробные возможности спортсмена и соответственно максимальный уровень физических возможностей, мы посчитали оценку этих показателей в ночное время и при восстановлении в этот период малоинформативной. Апробированная программа восстановления продемонстрировала более высокий *уровень* энергообмена за счет жиров.

Эти данные, а также результаты, полученные в настоящем исследовании, по-видимому, могут быть далее использованы для разработки методик «сгонки веса» спортсменов, необходимой в предсоревновательном и соревновательном периоде подготовки. При этом оценка физиологических и метаболических показателей будет сопоставлена с величиной потери массы тела, а также с сохранением спортивной формы и соревновательной эффективностью.

## ВЫВОДЫ

Выявленные в ходе исследования различия изученных показателей свидетельствуют о различных сценариях адаптации к мышечной нагрузке обследованных спортсменов высокой квалификации и спортсменов, занимающиеся тхэквондо рекреационного характера.

1. Высокий уровень тренированности квалифицированных спортсменов подтвержден достоверно более низким показателем максимального потребления кислорода в основной группе, что доказывает факт лучшей адаптации мышечным нагрузкам.

2. Отсутствие достоверных различий между группами по уровню метаболического эквивалента, зарегистрированного при выполнении мышечной работы, свидетельствует о том, что спортсмены обеих групп вне зависимости от ее характера реализовали физические возможности в одинаковой степени.
3. Особенности энергообмена (общий энергетический обмен, отдельно – за счет углеводов и жиров, и соотношение обменных процессов «углеводы/жиры») также подтвердили лучшую адаптацию квалифицированных спортсменов к реализованным в процессе тренировки мышечным нагрузкам.
4. Результаты проведенного исследования доказывают эффективность неинвазивных мониторинговых исследований, которые позволяют вести постоянный контроль функционального состояния спортсмена (не только во время тренировки, но и в различные периоды после нее). Полученная при этом информация может быть использована для внесения коррекции в тренировочный процесс и программу восстановительных мероприятий, а далее для оценки эффективности этой коррекции.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: Финансы и статистика, 1983. 471 с.
2. Быков Е.В., Коломиец О.И. Совершенствование методов контроля за тренировочным процессом на основе современных информационных технологий // Теория и практика физической культуры. 2016. №5. С. 59-61.
3. Коломиец О.И., Быков Е.В., Петрушкина Н.П. Синхронизированное музыкальное воздействие как средство восстановления

- спортсменов // Педагогико-психологические и медико-биологические проблемы физической культуры и спорта. 2017. Т. 123. №1. С. 7-14.
4. Кулинский В.И., Ольховский И.А. Две адаптационные стратегии в неблагоприятных условиях – резистентная и толерантная. Роль гормонов и рецепторов // Успехи современной биологии. 1992. Вып. 56. С. 697–714.
  5. Макунина О.А., Коломиец О.И., Петрушкина Н.П. Заболеваемость и вегетативный статус студентов-первокурсников как показатели стратегии адаптации к обучению в высших учебных заведениях // Ученые записки университета имени П.Ф. Лесгафта. 2015. № 1 (119). С. 97-104.
  6. Мищенко И.А., Кашкаров В.А. Контроль особенностей адаптации высококвалифицированных тхэквондистов к тренировочным нагрузкам в условиях среднегорья // Физическая культура и здоровье. 2015. № 4. С. 56–61.
  7. Никитин И., Коломиец О.И., Быков Е.В. Анализ восстановления спортсменов высшей категории, основанный на вариабельности сердечного ритма: обзор метода анализа восстановления // Материалы IV Международного конгресса «Проблемы физического образования: содержание, направленность, методика, организация». Челябинск, 2015. Т. 1. С. 646–652.
  8. Никулин Б.А. Клинико-лабораторные показатели в системе медико-биологического контроля за спортсменами // Спортивная медицина: национальное руководство / под ред. акад. РАН и РАМН С.П. Миронова, проф. Б.А. Поляева, проф. Г.А. Макаровой. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2012. С. 281–313.
  9. Пономарев В.А., Петрушкина Н.П. Физиологические основы спортивной деятельности // Уральская академия- Челябинск, 2014. 60 с.
  10. Цейликман В.Э., Цейликман О.Б., Синицкий А.И. и др. Биохимические стратегии адаптации в условиях хронического стресса // Человек. Спорт. Медицина. Издательство: Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет). Челябинск. 2008. № 4 (104). С. 56-57.
  11. American College of Sports Medicine. ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription, 7th ed. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins, 2015: 289.
  12. Borsheim E., Bahr, R. Effect of exercise intensity, duration and mode on post-exercise oxygen consumption. Sports Med. 2003. 33. P. 1037–1060.
  13. Brendan Egan, Juleen R. Zierath. Exercise Metabolism and the Molecular Regulation of Skeletal Muscle Adaptation. 2013. Vol. 17. Issue 2. P. 162–184. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cmet.2012.12.012>

## REFERENCES

1. Ayvazyan S., Anyukov I., Meshalkin L. *Prikladnaya statistika. Osnovy modelirovaniya i pervichnaya obrabotka dannyh* (Applied statistics. Fundamentals of modelling and primary data processing). M.: Finance and statistics, 1983.
2. Bykov E.V., Kolomietc O. *Sovershenstvovanie metodov kontrolya za trenirovochnym processom na osnove sovremennyh informacionnyh tehnologiy* (Improvement of methods of control over the training process based on modern information technology) // *Theory and practice of physical culture*. 2016. № 5. P. 59-61.
3. Kolomietc O., Bykov E., Petrushkina N. *Sinhronizirovannoe muzykal'noe vozdeistvie kak sredstvo vosstanovleniya sportsmenov* (Synchronized musical influence as a means of recovery of sportsmen) // *Pedagogical-psychological medico-biological problems of physical culture and sports*. 2017. T. 123. № 1. P. 7-14.
4. Kulinskiy V., Olkhovsky I. *Dve adaptacionnye strategii v neblagopriyatnyh usloviyah – rezistentnaya i tolerantnaya. Rol' gormonov i receptorov* (Two adaptive strategies in adverse conditions – resistant and tolerant. The role of hormones and receptors) // *Successes of modern biology*. 1992. Vol. 56. P. 697-714.
5. Makunina O. A., Kolomietc O., Petrushkina N. *Zabolevaemost' i vegetativniy status studentov-pervokursnikov kak pokazateli strategii adaptacii k obucheniyu v vysshih uchebnyh zavedeniyah* (The incidence and vegetative status of first-year students as indicators of the strategy of adaptation to training in higher educational institutions) // *Scientific notes of University named after P. F. Lesgaft*, 2015. N 1 (119). S. 97-104.
6. Mishchenko I., Kashkarov V. *Kontrol' osobennostey adaptacii vysokokvalificirovannyh tskhekvondistov k trenirovochnym nagruzkam v usloviyah srednegoria* (Control features of adaptation of highly skilled athletes to training loads in the mountains) // *Physical culture and health*. 2015. N 4. P. 56-61.
7. Nikitin I., Kolomietc O., Bykov E. *Analiz vosstanovleniya sportsmenov vysshey kategorii, osnovanniy na variabel'nosti serdechnogo ritma: obzor metoda analiza vosstanovleniya* (Analysis of recovery of athletes of the highest category, based on heart rate variability: a review of the method of analysis recovery) // *Proceedings of the IV International Congress "Problems of physical education: content, focus, methodology, organization"*/ Chelyabinsk. 2015. Vol. 1. P. 646-652.
8. Nikulin B. *Kliniko-laboratornye pokazateli v sisteme mediko-biologicheskogo kontrolya za sportsmenami* // *Sportivnaya medicina: nacional'noe rukovodstvo* (Clinical and laboratory parameters in the

- system of medico-biological control in athletes) // Sports medicine: the national manual / ed. RAS and RAMS, S.P. Mironov, Professor B.A. Polyaev, Professor G.A. Makarova. M.: GEOTAR-Media, 2012. P. 281–313.
9. Ponomarev V., Petrushkina N. Fiziologicheskie osnovy sportivnoy deyatel'nosti (Physiological bases of sports activity) // Ural Academy. Chelyabinsk, 2014. 60С
  10. Tseilikman V. E., Zelikman.B., Sinitsky A. I. Biohimicheskie strategii adaptatsii v usloviyah hronicheskogo stressa (Biochemical adaptation strategies under conditions of chronic stress) // Man. Sport. Medicine Publisher: South-Ural state University (national research University). Chelyabinsk., N 4 (104) 2008. P. 56-57.
  11. The American College of sports medicine. The ACSM guidelines for testing and prescription, 7th / Ed. Philadelphia, PA: Lippincott Williams and Wilkins. 2015: 289.
  12. Borsheim E., Bahr R. Effect of exercise intensity, duration and mode post-workout oxygen consumption // Sports Med. 2003. 33. P. 1037-1060.
  13. Brendan Egan, Juleen R. Zierath. The exercise metabolism and the molecular mechanisms regulating adaptation of skeletal muscles. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cmet.2012.12.012>. 2013. Vol. 17. Issue 2. P. 162–184.

УДК 616.716.8:  
616.45-001-089

**Фишер В.В. [Fisher V.V.],  
Яцук И.В. [Yatsuk I.V.],  
Батурин В.А. [Baturin V.A.]**

## **ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАРИАЦИОННОЙ РИТМОПУЛЬСОМЕТРИИ И КАЛЬЦИЙ- МАГНИЕВОГО РАВНОВЕСИЯ ПРИ ОПЕРАЦИОННОМ СТРЕССЕ У ПАЦИЕНТОВ С ХИРУРГИЧЕСКИМИ ВМЕШАТЕЛЬСТВАМИ В ЧЕЛЮСТНО-ЛИЦЕВОЙ ОБЛАСТИ**

**Dinamic of indicators of variation  
rhythmopulsometry and calcium-magnesium  
balance in the operating stress in patients  
with syrgery in the maxillofacial region**

Цель исследования: Изучить сопряженность флюктуаций параметров вариационной пульсометрии с колебаниями внутриклеточного содержания кальция и магния у мужчин и женщин в различные сроки операционного стресса. Стрессовая напряженность организма оценивалась по параметрам вариабельности сердечного ритма и определения содержания ионов кальция и магния в эритроцитах до операции, во время хирургического вмешательства, на третьи и пятые сутки после операции. Во время оперативного вмешательства отмечалось объяснимое преобладание симпатической регуляции сердечного ритма с нормализацией показателей в послеоперационном периоде и восстановлением в организме состояния нормотонии к пятым суткам после операции. Электролитные изменения проявились в нарастании концентрации ионов кальция в послеоперационном периоде и снижении содержания магния в клетке к пятым суткам наблюдения, по сравнению с исходными значениями. Таким образом, несмотря на нормализацию, показателей вариационной ритмопульсометрии, изменения в кальций-магниевом балансе сохранялись.

The purpose of this work is to study conjugate fluctuation parameter variation pulsometry with fluctuations in intracellular calcium and magnesium for men and women in different periods of operational stress. The stress intensity of the organism was assessed by the parameters of heart rate variability and the determination of the content of calcium and magnesium ions in erythrocytes before surgery, during surgery, on the third and fifth days after the operation. During the operative intervention, there was an explicable predominance of sympathetic regulation of the heart rhythm with normalization of indicators in the postoperative period and restoration of the normotonia state in the body. Electrolyte changes were manifested in the increase in the concentration of calcium ions in the postoperative period and in the decrease in the magnesium content in the cell by the fifth day of observation. Thus, despite normalization, changes in the calcium-magnesium balance were maintained for the fifth day after the operation, and for indicators of variation rhythmopulsometry.

**Ключевые слова:** операционный стресс, вариабельность сердечного ритма, кальций, магний.

**Key words:** surgical stress, heart rate variability, calcium, magnesium.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в медицинской науке, по-прежнему, одним из перспективных направлений исследований остается совершенствование знаний в теории адаптации организма. Действительно – это немаловажно в современном обществе, в котором появляется все больше факторов способных снижать адаптационные возможности организма, так как адаптация является основой эволюционного развития организма. А при определенных условиях факторы внешней и внутренней среды организма способны приводить к развитию значимых отклонений в функциональности основных систем организма.

Неоценимый вклад в формирование представлений о процессах формирования стресс-реакции внес знаменитый канадский физиолог-исследователь Ганс Селье. В 1936 году он опубликовал свою первую работу посвященную вопросам адаптации организма, в которой описал основные механизмы общего адаптационного синдрома. В дальнейшем было разработано учение о стрессе, согласно которому стресс – это неспецифическая стереотипная реакция организма, не зависящая от природы стрессора, возникающая в условиях, угрожающих нарушением гомеостаза. При этом с биологической точки зрения, стресс – это эволюционно сложившаяся приспособительная реакция. Однако при определенных условиях стресс-реакция может превратиться из звена адаптации организма к различным факторам в звено патогенеза различных заболеваний [11].

Классическим примером стресс-реакции является хирургический стресс [10], в ответ на который в организме начинают реализовываться различные механизмы общего адаптационного синдрома, связанные с работой двух систем: стресс-реализующей и стресс-лимитирующей [8].

Деятельность стресс-реализующей системы опосредуется, в первую очередь, через симпатoadреналовую реакцию организма. Патофизиологически это проявляется в гиперкатаболизме и неогликогенезе, на фоне гипергормонемии. Кроме этого, развиваются изменения электролитного баланса, проявляющиеся в повышенной экскреции магния из организма и избыточном накоплении клеткой кальция. На фоне снижения содержания естественного антагониста – магния, кальций активирует большое количество фосфолипаз, вызывающих разрушение фосфолипидов клеточных мембран и накопление свободных жирных кислот [18, 19, 20].

В стадию тревоги и стадию истощения общего адаптационного синдрома эти изменения носят компенсаторный характер. А в стадии истощения они носят уже деструктивный характер, так как организм находится в состоянии декомпенсации защитных механизмов.

Одновременно со стресс-реализующей системой, филогенетически в организме сформировалась стресс-лимитирующая система, действие которой направлено на снижение интенсивности побочных эффектов участников агрессивной стресс-реакции. Активность этой системы реализуется посредством действия ГАМК-ергической системы, ингибиторов протеолиза, эндогенных опиатов, простагландинов, антиоксидантной системы, регуляторов ионных каналов, антигипоксантов [6, 8].

Общеизвестно, что изменения, происходящие в организме при активации всех этих механизмов, приводят к колебаниям в работе сердечно-сосудистой системы, которую можно рассматривать как основной индикатор этих процессов [12]. Практически все основные колебания в работе системы кровообращения происходят под контролем вегетативной нервной системы, с преобладающим действием ее симпатического звена. Активация парасимпатического отдела изучена недостаточно, но достоверно известно, что он участвует в гиперинсулинемии [3].

Обобщая вышеописанные процессы, происходящие в организме, можно сформулировать еще одно определение стресса как состояние, проявляющееся специфическим синдромом, который включает в себя все неспецифические изменения в биологической системе.

Несмотря на то, что миллионы людей ежедневно подвергаются стрессу, находясь в периоде хирургического воздействия, процессы, происходящие в организме человека, изучены не окончательно. Любая информация об ответных стресс-реакциях организма позволяет не только подробнее изучить механизмы реализации стресса в организме человека, но и наметить пути профилактики возникновения повреждений. Учитывая, что операционный стресс является не только многофакторным, но и персонифицированным событием, информация о сопряженности различных стресс-реакций между собой представляется наиболее интересной. Подобные сведения, вероятно, позволят не только определить средства фармакологического воздействия, но и хронологические аспекты применения лекарственных препаратов в период операционного стресса.

В связи с этим была изучена и показана эффективность использования метода вариационной пульсометрии как критерия стресс-повреждения и эффективности фармакологической защиты [13].

**Цель работы:** изучить сопряженность флюктуаций параметров вариационной пульсометрии с колебаниями внутриклеточного содержания электролитов: кальция и магния у мужчин и женщин в различные сроки операционного стресса.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено на базе кафедры клинической фармакологии с курсом дополнительного постдипломного образования, кафедры анестезиологии, реаниматологии и скорой медицинской помощи Ставропольского государственного медицинского университета и городской клинической больницы скорой медицинской помощи г. Ставрополя.

В исследование было включено 30 человек отделения челюстно-лицевой хирургии без значимой сопутствующей патологии, которые были прооперированы в плановом порядке и представили информированное согласие на участие в исследовании. Протокол исследования был согласован локальным этическим комитетом. Средний возраст пациентов составил  $26,5 \pm 8,3$  лет (55% мужчин и 45% женщин).

Пациенты перед оперативным вмешательством проходили процедуру традиционного обследования, включающую осмотр, сбор анамнеза, клинико-лабораторное обследование. Наличие значимой сопутствующей патологии и прием дополнительных лекарственных средств рассматривался как критерий исключения.

Для оценки параметров variability сердечного ритма использовался монитор пациента анестезиологический «Корос 300».

У пациентов за сутки до операции, интраоперационно, на третьи и пятые сутки после операции регистрировались следующие параметры: мода (Mo), амплитуда моды (AMo), вариационный размах (VAR) и индекс напряжения Баевского (ИН), содержание внутриклеточного кальция и магния. Содержание ионизированного кальция определяли по методу Лилли с шавелевой кислотой [5], определение магния проводилось по Д. Глику, Е. Фрейеру, М. Оксу [7] с последующей оценкой концентрации методом цитоспектрофотометрии, основанном на степени поглощения оптического пучка в зависимости от концентрации определяемого вещества. На основании данных полученной оптической плотности судили о концентрации вещества, выраженной в цитоспектрофотометрических единицах (ЦФЕ).

Все пациенты были прооперированы при общей анестезии с искусственной вентиляцией легких в условиях тотальной миоплегии по эндотрахеальной методике [2]. Статистическая обработка результатов произведена с помощью пакета программ Statistica 6.0 for Windows и модуля Excel пакета Office 2007.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Отбор пациентов без значимой сопутствующей патологии, сопоставимость объема, травматичности оперативных вмешательств, однотипность схем анестезии позволили максимально исключить разнонаправленность влияния наиболее значимых агрессивных факторов операционного стресса на индивидуально опосредованные защитные реакции организма. Следует отметить, что, как во время оперативного вмешательства, так и в послеоперационном периоде вплоть до выписки ни у кого из исследуемых пациентов не зарегистрировано существенных отклонений здоровья, послеоперационный период протекал гладко, без особенностей.

В ходе исследования было установлено, что за 24 часа до операции у пациентов исходно преобладала ваготония со следующими параметрами вариационной пульсометрии:  $M_o=0,85 \pm 0,14$  с,  $AMo = 12 \pm 5,6\%$ ,  $VAR = 0,45 \pm 0,42$  с, а ИН составил 24 у.е. (рис. 1).

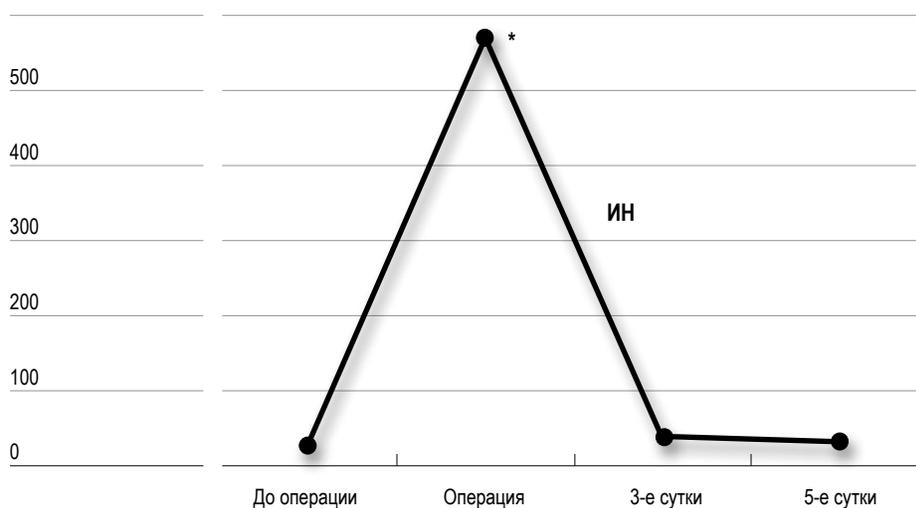
Регистрация параметров во время хирургической инвазии показала увеличение ИН до 566 у.е., что коррелирует с повышением  $AMo$  ( $27 \pm 17\%$ ) и снижением значения  $M_o$  ( $0,69 \pm 0,20$  с). Значения VAR существенно не изменились ( $0,46 \pm 0,45$  с).

На третьи сутки после хирургического вмешательства показатели математического анализа сердечного ритма продолжали изменяться.

Отмечалось повышение  $M_o$  ( $0,81 \pm 0,15$  с) с некоторым снижением  $AMo$  ( $14 \pm 4,1\%$ ) и VAR ( $0,33 \pm 0,45$  с), что привело к уменьшению значения ИН до 38 у.е. (рис. 1).

На последнем этапе регистрации показателей – на пятые сутки послеоперационного периода ИН приближался к исходным значениям, хотя и оставался несколько повышенным. Он был равен 33 у.е. (рис. 1). При этом  $AMo$  продолжала снижаться до  $11 \pm 2,1\%$ . Существенно не изменялась  $M_o$  ( $0,86 \pm 0,15$  с), но увеличивалась величина VAR ( $0,71 \pm 0,45$  с).

Оценка внутриклеточного содержания кальция и магния показала, что в предоперационном периоде концентрация ионизированного кальция составила  $1,1 \pm 0,1$  ЦФЕ. Значения содержания кальция в клетке в момент операции несколько увеличились до  $1,2 \pm 0,1$  ЦФЕ (повышение показателя на 9%). Пик концентрации кальция приходился на третьи сутки после оперативного вмешательства и составил  $1,4 \pm 0,09$  ЦФЕ (увеличение по сравнению с исходными величинами на 27%,  $p < 0,05$ ). К пятым суткам после операции уровень кальция в клетке начал снижаться и достиг значения  $1,35 \pm 0,1$  ЦФЕ, но оставался значимо выше ( $p \leq 0,05$ ) дооперационных значений на 23% (рис. 2).

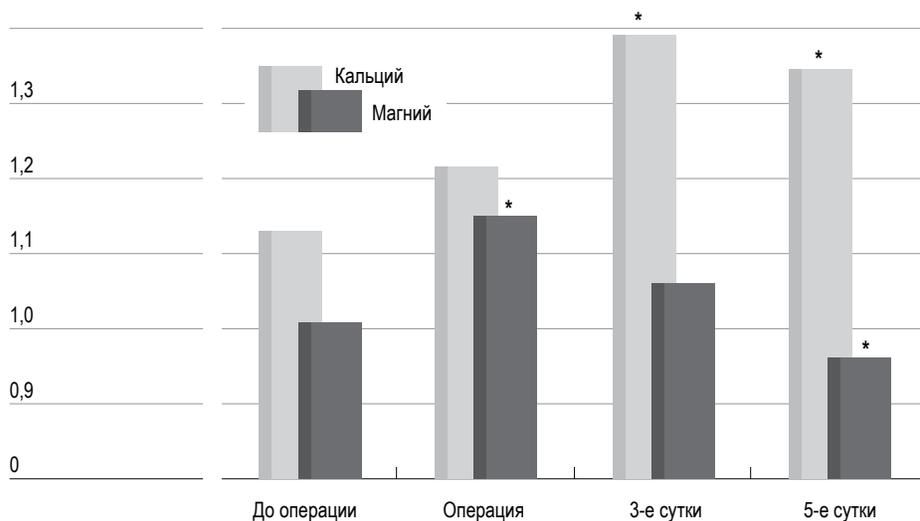


**Рис. 1.** Динамика индекса напряжения в периоперационном периоде.

\* –  $P \leq 0,05$

Уровень внутриклеточного магния до операции в группе составил  $1,01 \pm 0,04$  ЦФЕ. В наиболее травматичный момент оперативного вмешательства отмечалось увеличение содержания иона в эритроцитах до  $1,15 \pm 0,03$  ЦФЕ (повышение на 14% по сравнению с исходными значениями, при  $p \leq 0,05$ ). В раннем послеоперационном периоде наблюдалась тенденция к уменьшению концентрации магния в клетке. Так к третьим суткам его концентрация составляла  $1,06 \pm 0,03$  ЦФЕ (прирост показателя на 5% по сравнению с предоперационным значением). Максимальное изменение этого показателя было выявлено к пятым суткам после операции, когда уровень магния снизился до  $0,96 \pm 0,03$  ЦФЕ, что на 5% ниже ( $p < 0,05$ ) по сравнению с дооперационными значениями (рис. 2).

Проблема прогностической оценки состояния пациентов является наиболее актуальной в современной медицинской науке. В связи с этим, в клинической медицине стало уделяться все большее внимание к использованию в практике средств прогностической оценки состояния пациента, основанных на принципах слежения за системными показателями организма. Одним из основ-



**Рис. 2.** Концентрация ионизированного кальция и магния в периоперационном периоде.

\* –  $P \leq 0,05$  по сравнению с дооперационными значениями.

ных показателей, который характеризует регуляторные процессы протекающие в организме, является показатель вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы [4]. Для оценки степени вегетативной регуляции использование метода математического анализа ритма сердца остается приоритетным [9]. Математический анализ ритма сердца известен также как чувствительный и срочный показатель нейрогуморального гомеостаза организма в целом.

Практическое применение оценки неспецифических адаптационных механизмов при помощи анализа вариабельности сердечного ритма позволяет определять исходное состояние адаптационных возможностей организма. Имея исходный адаптационный статус, возникает возможность в эффективном прогнозировании течения послеоперационного периода и делать выводы о нарастании степени напряжения регуляторных механизмов в зависимости от разных условий.

Согласно полученным результатам, пациенты исходно находились в состоянии умеренной ваготонии. В момент оперативного вмешательства наблюдается активизация всех регуляторных механизмов как со стороны нервной,

так и эндокринной систем [1]. В нашем исследовании это проявилось в максимальном подъеме значения ИН именно в это время. Это свидетельствует о преобладании симпатических влияний на регуляцию сердечного ритма. В раннем послеоперационном периоде показатели вариационной пульсометрии достаточно быстро возвращались к исходным значениям, характеризуя восстановление ваготонической регуляции ритма сердца.

Таким образом, у пациентов при эффективной анестезиологической защите от операционного стресса, достаточно быстро нормализуются показатели вариационной пульсометрии.

В тоже время, динамика изменений внутриклеточного кальция и магния свидетельствовала о более продолжительных сдвигах в послеоперационном периоде. Уровень внутриклеточного кальция прогрессивно увеличивался до 5 суток послеоперационного периода. Содержание магния в клетке имело тенденцию к повышению во время операции с последующим снижением ниже исходных показателей к пятым суткам наблюдения. Такие колебания содержания магния в эритроцитах подтверждают исследования И.С. Чекмана, который описал феномен гипермагниевой постстрессорной мочи у крыс [14]. Стресс и магниевая недостаточность являются неразрывными процессами, которые обладают взаимоотягощающим эффектом. Схожие факты представлены в работах F. Мосси, E. Poleszak, показавших, что острый стресс способствует экскреции магния из организма [18]. Это происходит в следствие гипердреналин- и норадреналинемии, которые способствуют потери магния клеткой. Есть основания полагать, что эти процессы связаны с освобождением магния из внутриклеточных связей, что приводит к значительному росту его концентрации внутри клетки, и как следствие, к ограничению входа этого иона в клетку. Так же есть подтверждения тому, что на этом фоне возрастает чувствительность к ионам магния, что дополнительно препятствует его поступлению в клетку [20].

Поскольку магний играет роль естественного антагониста кальция в организме, его снижение ведет к дестабилизации в работе ионных каналов, что проявляется в возрастании внутриклеточного поступления кальция и, как следствие, приводит к срыву компенсаторных реакций [15, 16, 17]. Как показало наше исследование содержание кальция в эритроцитах нарастало по сравнению с исходными значениями, достигая своего пика к третьим суткам после операции. Такая тенденция нарастания внутриклеточного кальция может опосредовать механизм кальциевого повреждения клетки.

При этом обращает на себя внимание наличие факта этапного затухания сопряженных друг с другом компенсаторных реакций в послеоперационном периоде. Так значение индекса напряжения Баевского закономерно достигает своих максимальных значений во время оперативного вмешательства, а затем наиболее быстро – к третьим суткам послеоперационного периода нормализуется. Внутриклеточная концентрация кальция начинает нарастать с момен-

та операции, но достигает своих максимальных значений лишь к третьим суткам после хирургической агрессии и только на 5 сутки послеоперационного периода намечается тенденция к снижению этого показателя. Содержание магния внутри клетки однонаправленно с вариациями концентрации кальция увеличивается во время хирургического вмешательства. Однако, далее в послеоперационном периоде концентрация внутриклеточного магния снижается, достигая к пятым суткам минимальных значений, причем меньше исходных. Полученные результаты свидетельствуют о том, что у пациентов на пятые сутки после перенесенной хирургической агрессии, несмотря на клиническое благополучие, не наступает нормализация уровней внутриклеточных концентраций кальция и магния. Эти сведения могут характеризовать наличие или состоявшегося субклинического повреждения, или сопряженных закономерных постстрессовых компенсаторных реакций.

Таким образом, маркерами повреждения при операционном стрессе можно считать не только флюктуацию показателей вариационной ритмопульсометрии, но и колебания содержания ионизированного кальция и магния.

Вероятно, что изучаемые параметры вариационной пульсометрии и колебания внутриклеточного содержания кальция и магния сопряжены со стресс-лимитирующей и стресс-повреждающими системами, но при этом не только взаимно обуславливают этапность защитных реакций, но и могут свидетельствовать о степени восстановления в различные сроки постстрессорного периода.

## ВЫВОДЫ

1. Во время оперативного вмешательства отмечалось закономерное преобладание симпатической регуляции сердечного ритма. В послеоперационном периоде происходило возвращение показателей к исходным значениям, характеризующих восстановление исходного уровня ваготонии.
2. Уровень внутриклеточного кальция прогрессивно нарастал на протяжении послеоперационного периода с максимумом на третьи сутки после операции.
3. Концентрация внутриклеточного магния умеренно повышалась сразу после хирургического вмешательства, а затем прогрессивно снижалась, достигая на 5 сутки послеоперационного периода своего минимума.
4. Установлена хронологическая сопряженность флюктуаций показателей вариационной пульсометрии с изменениями внутриклеточной концентрации кальция и магния у пациентов в различные сроки операционного стресса.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Баевский Р.М., Клещкин С.З., Кириллов О.И. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. М.: Наука, 1984.
2. Батурин В.А., Фишер В.В., Сергеев С.А., Яцук И.В. Кальций-магниевое равновесие и эндотелиальная дисфункция при операционном стрессе // Медицинский вестник Северного Кавказа. 2014. № 1. С. 22–25.
3. Воложин А.И., Порядин Г.В. Патофизиология. Т. 3. М.: Издательский центр «Академия». 2006.
4. Калакутский Л.И., Манелис Э.С. Мониторинг параметров вариабельности сердечного ритма в медицине критических состояний // Медицина, фармация. 2001. №14. С. 28.
5. Лилли Р. Патологическая техника и практическая гистохимия. М.: Мир, 1969.
6. Лишманов Ю.Б., Маслов Л.Н., Нарыжная Н.В. Использование центрального введения сигмаопиатных рецепторов для предупреждения адреналовых аритмий в эксперименте // Бюлл. Экспериментальной биологии и медицины. 1997. №9. С. 286–288.
7. Локтев Н.А., Ягода А.В., Боева О.И. и др. Клиническая цитохимия. Ставрополь: Ставроп. гос. мед. акад., 2005.
8. Меерсон Ф.З. Физиология адаптационных процессов: Руководство по физиологии. М.: Наука, 1986.
9. Парин В.В., Баевский Р.М., Волков Ю.Н., Газенко О.Г. Космическая кардиология. Л.: Медицина, 1967.
10. Самохвалов И.М., Зачиняев Г.В., Андрюков Б.Г., Головкин К.П., Апчел В.Я. Динамика эндокринного ответа при стресс-реакциях при хирургическом лечении калькулезного холецистита // Вестник Российской военно-медицинской академии. 2013. №3. С. 38–42.
11. Селье Г. Очерки об адаптационном синдроме / Пер. с англ. М.: Медгиз, 1960.
12. Хаютин В.М., Лукошкова Е.В. Колебания частоты сердечбиений: спектральный анализ // Вестник аритмологии. 2002. № 26. С. 10–21.
13. Хмельницкий И.В., Горбачев В.И. Вариабельность ритма сердца при проведении анестезиологического пособия // Анналы аритмологии. 2016. Т. 13. №2. С. 96–102.
14. Чекман И.С., Горчакова Н.А., Николай С.Л. Магний в медицине. Кишинев, 1982.
15. Aarts M.M., Tymianski M. TRPM7 and ischemic CNS injury // *Neuroscientist*. 2005. 11(2). P. 116–123.
16. Graeff R. M., Podein R.J., Aarhus R., Lee H.C. Magnesium ions but not ATP inhibit cyclic ADP-ribose-induced calcium release // *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 1995. 206(2). P. 786–791.
17. McNulty S., Fonfria E. The role of TRPM channels in cell death. // *Pflugers Arch.* 2005. Oct. 451(1). P. 235–242.

18. Mocchi F. et al. The effect of noise on serum and urinary magnesium and catecholamines in humans // *Occup Med.* 2001. 5. P. 55–61.
19. Poleszak E. et al. Immobility stress induces depression-like behaviour in the forced swim test in mice: effect of magnesium and imipramine // *Pharm reports.* 2006. 58. P. 746–752.
20. Wang Z., Hu S.Y., Lei D.L., Song W.X. Effect of chronic stress on PKA and P-CREB expression in hippocampus of rats and the antagonism of antidepressors // *Zhong Nan Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban.* 2006. Oct. 31(5). P. 767–771.

### REFERENCES

1. Baevskii RM, Kleckin SZ, Kirillov OI. *Matematicheskii analiz izmenenii serdechnogo ritma pri stresse (Mathematical analysis of heart rate changes during stress)*. M.: Nauka. 1984. P. 221.
2. Baturin VA, Fisher VV, Sergeev SA, Yatsuk IV. Kal'cii-magnievoe ravnovesie i endotelial'naya disfunkciya pri operacionnom stresse (Calcium-magnesium balance and endothelial dysfunction in operating stress). *Medicinskii vestnik Severnogo Kavkaza.* 2014. 1. P. 22–25.
3. Vologin AI, Poryadin GV. *Patofiziologiya (Pathophysiology)*. T. 3. M.: Izdatelskii centr «Akademiya». 2006. P. 281–288.
4. Kalakutskii LI, Manelis ES. *Monitiring parametrov variabelnosti serdechnogo ritma v medicine kriticheskikh sostoyanii (Monitoring heart rate variability parameters in critical care medicine)*. 2001. №14. P. 28.
5. Lilli R. *Patologicheskaya tehnika I prakticheskaya gistohimiya (Pathological technique and practical histochemistry)*. M.: Mir. 1969.
6. Lishmanov UB, Maslov LN, Narijnaya NV. *Ispolzovanie centralnogo vvedeniya sigmaopiatnih receptorov dlya preduprejdeniya adrenalovih arimii v eksperimente (Use of central administration of sigmaopathic receptors to prevent adrenal arrhythmias in the experiment)*. *Bulleten eksperimentalnoi biologii I medicini.* 1997. №9. P. 286–288.
7. Loktev NA, Yagoda AV, Boeva OI. *Klinicheskaya citihimiya (Clinical cytochemistry)*. Stavrop. gos. med. akad. 2005. 488 p.
8. Meerson FZ. *Fiziologiya adaptacionnih processov: rukovodstvo po fiziologii (Physiology of adaptation processes in physiology Guide)*. M.: Nauka. 1986. 635 p.
9. Parin VV, Baevskii RM, Volkov UN, Gizenko OG. *Kosmicheskaya kardiologiya (Space cardiology)*. L.: Medicina. 1967.
10. Samohvalov IM, Zachinyaev GV, Andrukov BG, Golovko KP, Apchel VY. *Dinamika endokrinnogo otveta pri stress-reakciyah pri hirurgicheskom lechenii kal'kultznogo holecistita (The dynamics of the endocrine response in stress reactions in the surgical treatment of calculous cholecystitis)*. *Vestnik Rossiiskoi voenno-medicinskoj akademii.* 2013. №3. P. 38–42.

11. Selye G. Ocherki ob adaptacionnom syndrome (Essays about adaptation syndrome). M.: Medgiz. 1960.
12. Hayutin VM, Lukoshkova EV. Kolebaniya chastoti serdcebienii: spektralnii analiz (Fluctuations in heart rate: the spectral analysis). Vestnik aritmologii. 2002. №26. С. 10-21.
13. Hmelnickii IV, Gorbachev VI. Variabelnost ritma serdca pri provedenii anesteziologicheskogo posobiya (Heart rate variability during the anesthetic). 2016. Т. 13. №2. P. 96–102.
14. Chekman IS, Gorchakova NA, Nokolai SL. Magnii v medicine (Magnesium in medicine). 1982. P. 101.
15. Aarts M.M., Tymianski M. TRPM7 and ischemic CNS injury // Neuroscientist. 2005. 11(2). P. 116–123.
16. Graeff R. M., Podein R.J., Aarhus R., Lee H.C. Magnesium ions but not ATP inhibit cyclic ADP-ribose-induced calcium release // Biochem. Biophys. Res. Commun. 1995. 206(2). P. 786–791.
17. McNulty S., Fonfria E. The role of TRPM channels in cell death // Pflugers Arch. 2005. Oct. 451(1). P. 235–242.
18. Mocchi F. et al. The effect of noise on serum and urinary magnesium and catecholamines in humans // Occup Med. 2001. 5. P.55–61.
19. Poleszak E. et al. Immobility stress induces depression-like behaviour in the forced swim test in mice: effect of magnesium and imipramine // Pharm reports. 2006. 58. P. 746–752.
20. Wang Z., Hu S.Y., Lei D.L., Song W.X. Effect of chronic stress on PKA and P-CREB expression in hippocampus of rats and the antagonism of antidepressors // Zhong Nan Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban. 2006. Oct. 31(5). P. 767–771.

# ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

«Наука. Инновации. Технологии», №1, 2017

Александрова Анна Юрьевна, доктор географических наук, кандидат экономических наук, доцент, профессор кафедры рекреационной географии и туризма Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва. Телефон: 8(495)939-15-55. E-mail: analexan@yandex.ru

Батурин Владимир Александрович, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой клинической фармакологии, аллергологии и иммунологии с курсом ДПО ФГБОУ ВО "Ставропольский государственный медицинский университет" Минздрава России. E-mail: prof.baturin@gmail.com.

Бегдай Инна Владимировна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры экологии и природопользования Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 89187461332. E-mail: algae@mail.ru.

Бережной Виктор Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и математического моделирования Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 89624498940. E-mail: beregnoj@yandex.ru

Блужина Анастасия Сергеевна, научный сотрудник Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 89624037577. E-mail: institutka-aska@mail.ru,

Быков Евгений Витальевич, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой спортивной медицины и физической реабилитации, Уральский государственный университет физической культуры, г. Челябинск. Телефон: 89127747521, E-mail: bev58@yandex.ru

Гасумов Рамиз Алиевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительства нефтяных и газовых скважин Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 88652563026. E-mail: Priemnaya@scnipgaz.ru

Гридин Владимир Алексеевич, доктор геолого-минералогических наук, и.о. директора института нефти и газа Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 94-72-38 (52-10), (52-01). E-mail: gng@ncstu.ru

Диденко Анастасия Юрьевна, аспирант кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8(988)116-37-27. E-mail: anastyd@yandex.ru

Димитриади Юлианна Константиновна, кандидат технических наук, заведующий кафедрой Строительства нефтяных и газовых скважин Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8-918-759-15-91. E-mail: ms.sngs@mail.ru

Дубенко Валерий Евсеевич, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научной работе ОАО «СевКавНИПИгаз». Телефон: 8-(8652) 56-30-26. E-mail: ms.sngs@mail.ru

Закирян Роберт Гургенович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8(918)77-88-675. E-mail: zakinyan@mail.ru

Кожевников Алексей Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры железнодорожной автоматики, телемеханики и связи Воронежского филиала Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II, г. Воронеж. Телефон: (909)21-10-674. E-mail: akozhev@yandex.ru

Коломиец Ольга Ивановна, кандидат биологических наук, доцент, профессор кафедры спортивной медицины и физической реабилитации, Уральский государственный университет физической культуры, г. Челябинск. Телефон: 8-919-115-77-73. E-mail: Kolomiec\_o@mail.ru

Копченков Вячеслав Григорьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации автомобилей машиностроения Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 88652956739. E-mail: Kopchenkov2@rambler.ru

Корнева Лилия Игоревна, аспирант кафедры социально-экономической географии, геоин-

форматики и туризма Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8-918-807-59-40. E-mail: liliya.cstp@gmail.com

Лукьянов Владимир Тимофеевич, доктор технических наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 88652940096. E-mail: RANGM26@yandex.ru

Макоха Анатолий Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и математического моделирования Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 95-68-00, (доб. 49-32). E-mail: anmakoha@yandex.ru

Набродова Екатерина Геннадьевна, аспирант кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8(918)77-53-48-97. E-mail: Katyporova1991@yandex.ru

Нагорнов Николай Николаевич, аспирант направления «Информатика и вычислительная техника» Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 879624513247. E-mail: sparta1392@mail.ru

Петрушкина Надежда Петровна, доктор медицинских наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой физиология, Уральский государственный университет физической культуры, г. Челябинск. Телефон: 89068650253. E-mail: 25ppnn@mail.ru

Самойленко Ирина Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы» Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8-906-479-05-79. E-mail: stvirishka@mail.ru,

Серов Александр Владимирович, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологии наноматериалов Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 95-68-29. E-mail: sav@ncstu.ru

Слюсарев Геннадий Васильевич, доктор технических наук, профессор, советник при ректорате Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8-962-450-92-40. E-mail: gslusarev@ncfu.ru,

Токарев Александр Александрович, аспирант кафедры физической географии и кадастра Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8-918-751-00-65. E-mail: sanchezst@mail.ru

Тышляр Татьяна Евгеньевна, соискатель кафедры прикладной математики и математического моделирования Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 95-68-00, (доб. 49-32). E-mail: k-fmf-primath@stavsru.ru

Федоренко Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика и математическое моделирование» Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8-962-446-37-73. E-mail: fovin\_25@mail.ru

Фёдорова Наталья Григорьевна, доктор технических наук, профессор кафедры строительства нефтяных и газовых скважин Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 88652956800. E-mail: fng8@mail.ru

Фишер Василий Владимирович, кандидат медицинских наук, доцент кафедры анестезиологии, реаниматологии и скорой медицинской помощи ФГБОУ ВО "Ставропольский государственный медицинский университет" Минздрава. Телефон: 8-962-451-13-47. E-mail: vvfisher26@gmail.com

Шальнев Виктор Александрович, доктор географических наук, профессор кафедры физической географии и кадастра Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 35-32-78. E-mail: phisgeo@yandex.ru

Щитова Наталия Александровна, доктор географических наук, профессор кафедры социально-экономической географии, геоинформатики и туризма Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 95-68-00, (доб. 49-91). E-mail: stavgeo@mail.ru

Яцук Иван Викторович, ассистент кафедры анестезиологии, реаниматологии и скорой медицинской помощи ФГБОУ ВО "Ставропольский государственный медицинский университет" Минздрава России. E-mail: yatsukiv@gmail.com

## ABOUT THE AUTHORS

«Наука. Инновации. Технологии», №1, 2017

Aleksandrova Anna Yur'yevna, doctor of geographical sciences, candidate of economic sciences, associate professor, professor of the Department of Recreational Geography and Tourism of Moscow State University named M.V. Lomonosov. Phone: 8 (495) 939-15-55. E-mail: analexan@yandex.ru

Baturin Vladimir Alexandrovich, D. Med. Sci, Professor, Head of the Department of Clinical Pharmacology, Allergy and Immunology. "Stavropol State Medical University". E-mail: prof.baturin@gmail.com.

Baturin Vladimir Alexandrovich, D. Med. Science, Professor, Head of the Department of Clinical Pharmacology, Allergy and Immunology. "Stavropol State Medical University". E-mail: prof.baturin@gmail.com.

Begday Inna Vladimirovna, Associate Professor, Associate Professor, Department of Ecology and Environmental Sciences in the North Caucasian Federal University. E-mail: algae@mail.ru.

Berezhnoy Viktor Vasilevich, candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Associate Professor of Department of the Applied Mathematics and Mathematical Modeling in the North Caucasus Federal University. Phone: 89624498940. E-mail: bereznoj@yandex.ru.

Bluzhina Anastasia Sergeevna, Researcher in the North Caucasian Federal University. Phone: 89624037577. E-mail: institutka-aska@mail.ru,

Bykov Evgeny Vital'evich, doctor of medical Sciences, Professor, head.the Department of sports medicine and physical rehabilitation of the Ural state University of physical culture. Phone: +79127747521, E-mail: bev58@yandex.ru

Bykov Evgeny Vital'evich, doctor of medical Sciences, Professor, head of the Department of sports medicine and physical rehabilitation of the Ural state University of physical culture. Phone: 89127747521. E-mail: bev58@yandex.ru

Gasumov Ramiz Aliyevich, doctor of Technical Sciences, professor, professor of Oil and Gas Wells Construction Department in the North Caucasus Federal University. Phone: 88652563026. E-mail: Priemnaya@scnipgaz.ru

Didenko Anastasiya Yur'yevna, postgraduate student of the Department of General and Theoretical Physics of the North Caucasus Federal University. Phone: 8 (988) 116-37-27. E-mail: anastyd@yandex.ru

Dimitriadi Julianna Konstantinovna, candidate of engineering sciences, head of department «Design of oil and gas wells» in the North Caucasus Federal University. Phone: 8-918-759-15-91. E-mail: ms.sngs@mail.ru

Dubenko Valery Evseevich, candidate of technical sciences, Deputy General Director for Scientific Work of OJSC "SevKavNIPgaz". Phone: 8- (8652) 56-30-26. E-mail: ms.sngs@mail.ru

Fedorenko Vladimir Vasilyevich, Doctor of technical sciences, professor, Professor of the Department «Applied Mathematics and Mathematical Simulation» in the North Caucasus Federal University. Phone: 8-962-446-37-73. E-mail: fovin\_25@mail.ru,

Fisher Vasily Vladimirovich, PhD, assistant professor of the Department of Anesthesiology, Intensive Care and Emergency Medical Care "Stavropol State Medical University". Phone: 8-962-451-13-47. E-mail: vvfisher26@gmail.com

Fisher Vasily Vladimirovich, PhD, assistant professor of the Department of Anesthesiology, Intensive Care and Emergency Medical Care "Stavropol State Medical University". Phone: 8-962-451-13-47. E-mail: vvfisher26@gmail.com

Gridin Vladimir Alekseevich, doctor of geological-mineralogical sciences, acting director of the Institute of oil and gas in the North Caucasus Federal University. Phone: (8652) 94-72-38 (52-10), (52-01). E-mail: gng@ncstu.ru

Kolomietc Olga Ivanovna, Candidate of biological Sciences, associate Professor, Professor, Department of sports medicine and physical rehabilitation of the Ural state University of physical culture. Phone: +79191157773, E-mail: Kolomiec\_o@mail.ru

Korneva Liliya Igorevna, postgraduate student of the Department of Social and Economic Geography, Geoinformatics and Tourism of the North Caucasus Federal University. Phone: 8-918-807-59-40. E-mail: liliya.cstp@gmail.com

Kozhevnikov Aleksey Aleksandrovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Automation, Telemechanics and Communication of the Voronezh branch of the Moscow State University of Communications named Emperor Nicholas II. Phone: (909) 21-10-674. E-mail: akozhev@yandex.ru

Kopchenkov Vyacheslav Grigoryevich, doctor of Technical Sciences, professor, professor of the Department Technical Maintenance of Vehicles in the North Caucasus Federal University. Phone: 88652956739. E-mail: Kopchenkov2@rambler.ru

Lukyanov Vladimir Timofeyevich, doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Development and Operation of Oil and Gas fields in the North Caucasus Federal University. Phone: 88652940096. E-mail: RANGM26@yandex.ru

Makokha Anatoliy Nikolayevich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling of the North Caucasus Federal University. Phone: (8652) 95-68-00, (ext. 49-32). E-mail: anmakoha@yandex.ru

Nabrodova Yekaterina Gennad'yevna, postgraduate student of the Department of General and Theoretical Physics of the North Caucasus Federal University. Phone: 8 (918) 77-53-48-97. E-mail: Katyopova1991@yandex.ru

Nagornov Nikolay Nikolaevich, postgraduate student in "Computer Science and Engineering " in the North Caucasus Federal University. Phone: 89624513247. E-mail: sparta1392@mail.ru.

Petrushkina Nadezhda Petrovna, Doctor in medical Sciences, senior researcher, head Department Physiology, Ural state University of physical culture. Phone: +79068650253, E-mail: 25ppnn@mail.ru

Petrushkina Nadezhda Petrovna, Doctor in medical Sciences, senior researcher, head Department Physiology, Ural state University of physical culture. Phone: 89068650253. E-mail: 25ppnn@mail.ru

Samoylenko Irina Vladimirovna, Candidate of technical sciences, Associate Professor of «Informational Systems» Department in the Stavropol State Agrarian University. Phone: 8-906-479-05-79. E-mail: stvirishka@mail.ru,

Serov Aleksandr Vladimirovich, doctor of engineering sciences, head of department Nanometer-scale materials' technology in the North Caucasus Federal University. Phone: (8562) 95-68-29. E-mail: sav@ncstu.ru

Shal'nev Viktor Aleksandrovich, Doctor of Geographical Sciences, Professor of the Department of Physical Geography and Cadastre of the North Caucasus Federal University. Phone: (8652) 35-32-78. E-mail: phisgeo@yandex.ru

Shchitova Nataliya Aleksandrovna, Doctor of Geographical Sciences, Professor of the Department of Social and Economic Geography, Geoinformatics and Tourism of the North Caucasus Federal University. Phone: (8652) 95-68-00, (ext. 49-91). E-mail: stavgeo@mail.ru

Slusarev Gennady Vasilievich, Doctor of technical sciences, professor, Advisor to the rector of the North Caucasus Federal University. Phone: 8-962-450-92-40. E-mail: gslusarev@ncfu.ru,

Tokarev Aleksandr Aleksandrovich, postgraduate student of the Department of Physical Geography and Cadastre of the North Caucasus Federal University. Phone: 8-918-751-00-65. E-mail: sanchezst@mail.ru

Tyshlyar Tat'yana Yevgen'yevna, Applicant, Chair of Applied Mathematics and Mathematical Modeling, North Caucasus Federal University. Phone: (8652) 95-68-00, (ext. 49-32). E-mail: k-fmf-primath@stavsu.ru Yatsuk Ivan Victorovich, assistant, Department of Anesthesiology, Intensive Care and Emergency Medical Care "Stavropol State Medical University". E-mail: yatsukiv@gmail.com

Fedorova Natalya Grigoryevna, doctor of Technical Sciences, professor of Oil and Gas Wells Construction Department in the North Caucasus Federal University. Phone: 88652956800. E-mail: fng8@mail.ru

Yatsuk Ivan Victorovich, assistant, Department of Anesthesiology, Intensive Care and Emergency Medical Care "Stavropol State Medical University". E-mail: yatsukiv@gmail.com

Zakinyan Robert Gurgenovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of General and Theoretical Physics of the North Caucasus Federal University. Phone: 8 (918) 77-88-675. E-mail: zakinyan@mail.ru

# CONTENTS

«Наука. Инновации. Технологии», №1, 2017

## ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Berezhnoy V.V.,  
Nagornov N.N.** The rationale selection of the modules values for processors in the system of residual classes . . . . . 7
- Kozhevnikov A.A.** The synthesis of analog-to-digital, primary and secondary modular converters . . . . . 17
- Makokha A.N.,  
Tyshlyar T.E.** Constructing and analyzing algorithms of tensor operation paralleling . . . . . 29
- Vaskina A.V.,  
Naats V.I.** Modeling and computing experiment in the problem of predicting the per capita monetary income of the population based on the methods of correlation and regression analysis . . . . . 39
- Fedorenko V.V.,  
Slyusarev G.V.,  
Samoylenko I.V.** Models of ordered polling of parallel data transmission channels . . . . . 53

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ**

<b>Dinevich L., Leshem Y.</b>	Radar monitoring of seasonal bird migration over Central Israel . . . . .	65
<b>Aleksandrova A.Yu.</b>	Geography of tourist flows in the Russian Federation: statistics, trends, challenges . . . . .	95
<b>Bluzhina A.S., Begday I.V.</b>	Features of geochemical processes in the catch- ment area of the river Kalaus in the Stavropol ter- ritory . . . . .	109
<b>Gasumov R.A., Kopchenkov V.G., Luk'yanov V.T., Fodorova N.G., Ovcharov S.N.</b>	Peculiarities of deep wells construction in com- plicated mining and geological conditions of the ciscaucasia. . . . .	123
<b>Gridin V.A., Dubenko V.E., Dimitriadi Ju.K., Serov A.V.</b>	Experimental researches of technological flu- ids' influence on gas permeability of sand-stone reservoirs . . . . .	141
<b>Didenko A.Yu., Nabrodova E.G., Zakinyan R.G.</b>	Mathematical modeling of large scale atmospher- ic circulation . . . . .	149
<b>Tokarev A.A., Shalnev V.A.</b>	Geochemical approach in the study of rhythm morphological landscape units. . . . .	163
<b>Schitova N.A., Korneva L.I.</b>	A multiscale analysis of investments placement in the regions of the European part of Russia in the post-Soviet period . . . . .	175

**БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ**

<b>Kolomiets O., Petrushkina N., Bykov E.</b>	Features of metabolic adaptive changes in various physical activities . . . . .	207
<b>Fisher V.V., Yatsuk I.V., Baturin V.A.</b>	Dinamic of indicators of variation rhythmopulsometry and calcium-magnesium balance in the operating stress in patients with syrgery in the maxillofacial region . . . . .	217
	<b>ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ</b> . . . . .	229
	<b>ABOUT THE AUTHORS</b> . . . . .	231

**Научное издание**

**НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ**

2017

Выпуск 1

Корректор — М.И. Толмачев.

Компьютерная верстка — О.Г. Полевич.

Подписано в печать 30.03.2017. Формат 70 × 108 1/16.  
Гарнитура Times New Roman. Бумага офсетная. Усл. печ. л.  
20,65. Тираж 1 000 экз.

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