

Министерство образования и науки  
Российской Федерации

---

# НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ

---

Научный журнал  
Северо-Кавказского федерального  
университета

---

ISSN 2308–4758



---

**Выпуск № 4, 2016 г.**

---

Выходит 4 раза в год

	<b>«Наука. Инновации. Технологии» Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета</b>
<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. Балегга, 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. Молахосеини, 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
©	ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет», 2016

	<b>«Science. Innovations. Technologies» North Caucasus Federal University</b>
<b>Founder</b>	Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «North Caucasus Federal University»
<b>Editor in chief</b>	V. S. Belozеров, 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. Belozеров, Chief Editor, Doctor of Geographical Sciences, professor; M. Ch. Zalikhanov, Dr. of Geographical Sciences, professor, academician of the Russian Academy of Sciences (Mountain Geophysical Institute, Nalchik); A. G. Hramtsov, Dr. Technical Sciences, Professor, academician of the Russian Academy of Sciences; Y. Y. Balega, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, 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. Belozеров, 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. Polyansky, 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; Tsaturyan L. D., MD, Professor (Stavropol State Med. University, Stavropol); N. I. Chervyakov, Dr. of Technical Sciences, professor; V. A. Shalnev, Dr. of Geographical Sciences, Professor; N. A. Shitova, Dr. of Geographical Sciences, Professor; A. S. Molahosseini, assistant professor, PH.D (Islamic Azad University, Kerman).
<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 (8652) 33-07-32 www.ncfu.ru nit_ncfu@mail.ru
<b>ISSN</b>	2308–4758
©	FGАОУ VPO «North Caucasus Federal University», 2016

# СОДЕРЖАНИЕ

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ, №4, 2016

## ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

<b>Ватишвили М.Р.</b> Метод прерывания града на подступах защищаемой территории со стороны вторжения градовых облаков . . . . .	7
<b>Горбенко И.Д., Есина М.В., Пономарь В.А.</b> Метод слепой электронной подписи на эллиптических кривых: условия и требования . . . . .	25
<b>Зайцева И.В.</b> Программная реализация алгоритма исследования на устойчивость математической модели самоорганизации рынка труда . . . . .	35
<b>Исупов К.С.</b> Алгоритмы оценки модулярных чисел в арифметике с плавающей точкой . . . . .	43
<b>Лавровская Т.В., Рассомахин С.Г., Малофей А.О.</b> Анализ метода линейного целочисленного декодирования псевдослучайных кодов . . . . .	57
<b>Малофей А.О., Харечкина Ю.О.</b> Интерференция параллельных фазо-частотно-модулированных сигналов с двухкратной фазовой манипуляцией . . . . .	63
<b>Рассомахин С.Г., Веклич С.Г., Малофей О.П.</b> Библиотека эталонных моделей сигналов физического уровня . . . . .	67
<b>Самойленко Д.В., Финько О.А.</b> Обеспечение целостности информации в автономной группе беспилотных летательных аппаратов методами модулярной арифметики . . . . .	77

<b>Цимбал В.А., Сорокин О.И., Лягин М.А., Бережной А.А., Крючков Н.В., Хоптар В.В.</b> Правила автоматизированного синтеза конечной марковской цепи, описывающей доведение многопакетного сообщения в соединении «точка-точка» . . . . .	91
--	----

<b>Червяков Н.И., П.А. Ляхов, М.В. Валуева, О.В. Криволапова.</b> Сравнительный анализ аппаратной реализации сумматоров на FPGA . . . . .	99
---	----

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

<b>Белоус В.Н., Кухарук М.Ю.</b> Растительные сообщества обнажений коренной породы северо-западных пределов Ставропольской возвышенности . . . . .	109
--	-----

<b>Белоусов А.И., Близно Л.В.</b> Оптимизация использования природных активов в эколого-ориентированных учетно-аналитических системах. . . . .	127
--	-----

<b>Гасумов Р.А., Шихалиева И.С., Искандерова И.И.</b> Исследование потерь давления при движении газожидкостных потоков в вертикальных трубах . . . . .	139
--	-----

<b>Керимов А-Г.Г., Зенин Д.И., Керимова Е.Г., Теленько Д.С.</b> Применение технологии «Интеллектуальная скважина» для контроля эксплуатации подземного хранилища газа . . . . .	153
---	-----

<b>Набродова Е.Г., Диденко А.Ю., Закинян Р.Г.</b> К скорости распространения внутренних гравитационных волн . . . . .	161
---	-----

<b>Петренко В.И., Петренко Н.Н., Петренко И.Н.</b> Газоэвапоригенная влага как геолого геохимический феномен планетарного масштаба . . . . .	169
--	-----

<b>Подосян А.А.</b> Сельские местности как предпосылка эффективного использования территорий горных регионов (на примере Республики Армения) . . . . .	193
--	-----

**Разумов В.В., Разумова Н.В.** Опасные гидрометеорологические явления на радиационно загрязненных территориях Восточно-Уральского региона России . . . . . 199

**Щитова Н.А., Соловьев И.А., Белозеров В.С.** Проблемы адаптации иностранных трудовых мигрантов (на примере Ставропольского края). . . . . 217

**Щитова Н.А., Чихичин В.В.** Теоретико-методологические аспекты географического исследования процессов адаптации и интеграции иностранных мигрантов . . . . . 225

#### **БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**Бутова О.А.** Церебральная биоэлектрическая активность и дерматоглифическая конституция подростков с задержкой психического развития . . . . . 239

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ** . . . . . 247

**ABOUT THE AUTHORS** . . . . . 251

## **ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ, №4, 2016

УДК 551.509.616 **Ватиашвили М.Р. [Vatiashvili M.R.]**

### **МЕТОД ПРЕРЫВАНИЯ ГРАДА НА ПОДСТУПАХ ЗАЩИЩАЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ СО СТОРОНЫ ВТОРЖЕНИЯ ГРАДОВЫХ ОБЛАКОВ**

**The method of hail interruption near protected area, based on preliminary impact hails cloud and hails cloudy systems**

Одним из градоопасных регионов мира является регион Центрального Кавказа. Здесь от градобитий ежегодно гибнет от 5 до 7%, а в отдельные годы до 18% урожая сельскохозяйственных культур. Для предотвращения ущерба в 1967 г. были начаты производственные работы. Применялись методы конкуренции и ускорения процесса осадкообразования. Несмотря на достигнутые успехи в этом регионе ежегодно отмечались и отмечаются случаи выпадения града со значительным ущербом сельскохозяйственных культур. Причина: действующие методы воздействия на градовые процессы не в состоянии прервать выпадение катастрофического града к подступам защищаемой территории. Предложен метод прерывания града к подступам ЗТ предварительным воздействием на облака и облачные системы, развивающиеся на защищаемой территории со стороны вторжения градовых облаков. В 2004–2008 гг. метод прошел экспериментальную проверку в Ставропольской военизированной службе по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы. После испытания на независимом материале физическая эффективность предложенного метода в среднем составила 96,7%. Метод может быть рекомендован различным странам мира при планировании и проведении противоградовой защиты и работ по искусственному увеличению осадков.

The Central Caucasus is one of the regions which located in area of grate hail dangerous. Every year we lose from 5 to 7% of yield after hailstorm. Sometimes the level of damage reaches 18%. For prevention of damage was started special manufacturing activity in 1967. For it used competition method and acceleration of formation of rainfall. Despite the reached progress in borders of this region was found out that annually the level of deterioration of yield after hailstorms is rising. The reason is: existing methods of impact on hail processes are not able to interrupt the catastrophic hail near protected area. The method for interrupting hail from cloud and clouds systems, based on the preliminary impact hail clouds and clouds systems offering. This method has been pilot-tested in the Stavropol uniformed services on active impact on meteorological and other geophysical processes in 2004-2008. The average efficiency of the proposed method was 96,7% (after testing on an independent physical material). This method can be recommended for anti-hail protection services, planning and working on artificial rain enhancement.

**Ключевые слова:** облака и облачные системы, частицы кристаллизующего реагента, микрофизический и динамический засева, противоградовая защита, прерывание града.

**Key words:** clouds and cloudy systems, particles of the crystallizing agent, microphysical and dynamical seeding, anti-hail protection, hail interruption.

### Введение

Во многих странах мира интенсивные градобития наносят значительный ущерб (более \$ 5 миллиардов) народному хозяйству, уничтожая от 3 до 18 % сельскохозяйственной (с/х) продукции на площади 87 млн га [1]. В число стран входят Республика Грузия и Российская Федерация (РФ). Первая из них расположена в южной, а вторая – в северной части региона Центрального Кавказа. Защищаемые территории (ЗТ) Военизированных служб (ВС) Грузии включает в себя районы Кахети и Квемо Картли, а РФ – Краснодарского и Ставропольского краев, Кабардино-Балкарской и Карачаево-Черкесской республик и Республику Северная Осетия. Для предотвращения ущерба с/х продукции от града в регионе Центрального Кавказа с 1967 г. осуществляется противоградовая защита (ПГЗ) с применением совершенствованных:

- действующих методов конкуренции [22] и ускорения процесса осадкообразования (УПО) в объемах зон будущего градообразования (ОЗБГ) объектов воздействия (ОВ) 1–4-й категорий (ОВ 1–2-й категорий являются градоопасными, а ОВ 3–4-й категорий – градовыми облаками) [2, 9, 10];
- радиолокационных критериев ОВ 1–4-й категории, приведенных в табл. 1, где:  $\Delta H_{Z_m}$ , (км) - высота появления первого радиозеха в области отрицательных температур;  $Z_m$  (dBZ) – максимальная радиолокационная отражаемость по диаметру рассеивающихся частиц в области отрицательных температур;  $\Delta H_{35}$  и  $\Delta H_{45}$  (км) – мощности переохлажденной части радиозеха ОВ 1–4-й категорий, ограниченные изоконтурными радиолокационной отражаемости 35, 45, dBZ [2, 9, 10, 11];
- схем засева ОВ 1–4-й категорий [2, 9, 10, 11], расположенных над уровнем восходящих потоков на высотах изотерм  $6 \pm 3$  °С (соответствует порогу льдообразующего действия йодистого серебра – AgI) и ограниченных изоконтурными радиолокационной отражаемости 15–35 dBZ.

Частицы кристаллизующего реагента (ЧКР) йодистого серебра (AgI) в ОЗБГ ОВ 1–4-й категории [1] диспергируются с помощью противоградовых ракет (ПГР) типа «Алазань», «Алан». Радиусы действия противоградовых ракет (ПГР) и расстояния между траекториями их полета, в зависимости от угла возвышения направляющих противоградовых установок, могут соответственно изменяться от 3 до 11 км и от 0,5 до 2,5 км.

Физическая эффективность действующих методов воздействия в Республике Грузия составляет в среднем 75–85 % [3, 10], а Российской Федерации – 80–98 % [2–4, 8–10]. Несмотря на высокие показатели эффективности ПГЗ на ЗТ региона Центрального Кавказа ежегодно отмечались и по настоящее время все еще отмечаются случаи выпадения града

Табл. 1. КРИТЕРИИ ЗАСЕВА ОВ 1–4-й КАТЕГОРИИ

Параметры ООС	Категория ОВ			
	1	2	3	4
$Z_m$ (dBZ)	$15 < Z_m < 35$	$35 \leq Z_m \leq 55$	$Z_m > 55$	$Z_m > 65$
$\Delta H_n$ (км)	$1 < \Delta H_{Z_m} < 4$	$\Delta H_{35} > 2,5$	$\Delta H_{45} > 3$	$\Delta H_{45} > 4$

со значительным ущербом с/х продукции. Анализ многолетних результатов ПГЗ показывает, что они [8–11]:

- не в состоянии прервать к подступам ЗТ выпадение града из зрелых ОВ 3–4-й категорий, движущихся в направлении ЗТ, если на прилегающей территории (ПТ) отсутствуют зоны предварительного засева (ЗПЗ);
- в состоянии частично прервать выпадение града из зрелых ОВ 3–4-й категорий, когда пункты воздействия (ПВ) расположены вдоль границ ЗТ, оснащенными противоградовыми установками (ПУ) и ПГР, а зоны формирования осадков (ЗФО) этих ОВ, движущиеся в сторону ЗТ, достигают радиуса действия применяемых ПГР. (ЗФО – область, ограниченная по вертикали значениями изотерм  $-5$  –  $-25$  °С, а по горизонтали – значениями изолиний радиолокационной отражаемости  $Z = 15$ – $35$  dBZ).

Дальнейшее ослабление прерывания града из ОВ 3–4-й категорий, движущихся вглубь ЗТ, может осуществляться за счет их многократного засева ЗФО, в соответствии совершенствованных действующих методов воздействия. Для получения положительных результатов, при оптимальных нормах расхода ЧКР, продолжительность воздействия должна быть меньше продолжительности времени проявления его эффекта, которая в ОВ 3-й категории в среднем составляет 17 мин., а в ОВ 4-й категории – 25 мин. [2, 5]. К примеру, ОВ 4-й категории при 4-кратном засеве и скорости движения 40 км/час за 25 мин. может пройти расстояние от границ вглубь ЗТ 13,3 км, оставляя за собой градовую дорожку с ущербом с/х продукции [5]. Повторяемости таковых, зарождающихся на ПТ и движущихся в сторону ЗТ, в районах Республики Грузия достигают 60 %, а Российской Федерации – 31 %, принося существенный ущерб с/х угодьям, достигающий 80–90 % от общего ущерба [7–11].

Целью представленной работы является разработка метода прерывания града к подступам ЗТ предварительным засевом облаков и облачных систем (ООС) ЧКР, развивающихся на ЗТ со стороны вторжения градовых облаков.

**Материалы и методы исследования**

Использовались многолетние материалы:

- наблюдений за ООС, проводимыми в регионе Центрального Кавказа наземными метеорологическими станциями (НМС), самолетами метео-лабораторий (СМЛ) и метеорологическими радиолокаторами (МРЛ);
- опытов по воздействию на градовые процессы и искусственному регулированию осадков – ИРО (искусственное увеличение и/или уменьшение осадков активным воздействием на ООС), фрагментов прерывания града к подступам ЗТ ВС со стороны вторжения градовых облаков.

Привлекался физико-статистический метод исследования, в основу которого положены непараметрические статистические методы. В настоящее время защищаемая от града территория в Республике Грузия достигает 900 тыс. га, а Российской Федерации – 2 млн 421 тыс. га.

**Результаты исследования и их обсуждение**

В основу разработанного метода прерывания града к подступам ЗТ предварительным засевам ООС, развивающихся на ЗТ со стороны вторжения градовых облаков, положены следующие физические представления. В неустойчивой атмосфере отдельные импульсы нисходящего потока, создаваемые в ООС искусственно вызванными осадками, могут значительно усилиться, приводя к ослаблению скорости восходящих потоков, питающих ОВ 3–4-й категории по пути предполагаемой траектории их перемещения в сторону ЗТ. В результате на подступах к ЗТ отмечается прерывание града из ОВ 3–4-й категорий [11]. Метод не имеет аналога. Решение поставленной задачи является актуальным.

Метод прерывания града к подступам ЗТ предусматривает: классификацию ООС; анализ физических принципов активных воздействий (АВ), применяемых в работах ПГЗ и ИРО; оценку критериев пригодности ООС различных классов для АВ и ИРО; схемы засева ЗФО ООС различных классов и нормы расхода в них ЧКР и/или ПГР.

**Классификация ООС**

В работах по ПГЗ и ИРО активному воздействию ЧКР подвергаются следующие классы ООС, которые отличаются друг от друга структурой и динамикой развития, значениями физических и геометрических параметров, полученных с помощью НМС, СМЛ и МРЛ [11–13, 21]. В табл. 2 представлены параметры ООС различных классов, наблюдаемые с высокой вероятностью в регионе Центрального Кавказа. Здесь:  $H_n$ ,  $H_v$  и  $\Delta H_n$  (км) – высоты нижней и верхней границы ООС и мощности их переохлажденной части ООС;  $Z_m$  (dBZ) и  $q_m$  (г/м<sup>3</sup>) – максимальная радиолокационная отражаемость и абсолютная водность в переохлажденной час-

ти ООС;  $K$  (м<sup>2</sup>/с) и  $\sigma$  (м/с) – коэффициент турбулентной диффузии и пульсации скорости ветра в турбулентных зонах ООС;  $d$  (мкм) и  $N$  (м<sup>-3</sup>) – средние размеры и концентрации частиц в ООС;  $W$  и  $V$  (м/с) – скорости восходящих потоков и падающих частиц в ООС.

Приведенные в табл. 2 значения параметров различных ООС успешно используются в работах по воздействию на градовые процессы и ИРО.

**Физические принципы ПГЗ и ИРО**

Они основаны на концепциях:

- преждевременного разрушения ООС нисходящими потоками, инициированными реактивными струями самолетов и ПГР [17, 18], продуктами взрыва противорадовых изделий «Эльбрус-4» [6] и сбросом с вершин облачности грубодисперсных аэрозолей [18];
- искусственного регулирования процесса осадкообразования при микрофизическом и динамическом засевах ЧКР объемов ЗФО.

Микрофизический засев, за счёт увеличения в ЗФО ООС концентрации ЧКР от  $5 \cdot 10^3$  до  $5 \cdot 10^4$  м<sup>-3</sup>, способствует:

- освоению нереализованной в естественных условиях облачной влаги [14, 16], дополнительному увеличению радиолокационной отражаемости ( $Z_m$ ), абсолютной водности ( $q_m$ ); размеров облачных частиц и частиц осадков ( $d$ ), количества осадков на поверхности земли ( $Q$ ) [12, 16, 19].

Динамический засев за счёт увеличения в ЗФО ООС концентрации ЧКР от  $5 \cdot 10^4$  до  $5 \cdot 10^6$  м<sup>-3</sup> и более, способствует [12, 15, 16, 20, 23]:

- выделению скрытой теплоты кристаллизации при замерзании на них капель и дополнительному увеличению скорости восходящих потоков ( $W$ ), среднеквадратических пульсаций скорости ветра ( $\sigma$ ), коэффициента турбулентной диффузии ( $K$ ), высоты верхней границы ( $H_v$ ), мощности переохлажденной части ( $\Delta H_n$ ) ООС, максимальной абсолютной водности ( $q_m$ ) и количества осадков на поверхности земли ( $Q$ ).

При микрофизическом и динамическом засевах ЧКР ЗФО различных ООС отмечается более раннее образование крупы и на более низких уровнях, чем это наблюдается при естественном их развитии.

Таким образом, при микрофизическом динамическом засевах ООС ПГЗ и ИРО сводятся к оценкам критериев пригодности их для АВ, схем засева и норм расхода в них ЧКР и/или ПГР.

Табл. 2. ДИАПАЗОНЫ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РАЗЛИЧНЫХ ООС

Параметры ООС	Классы ООС				
	1. Cu-Cong	2. Cb	3. Ns-As-Cb	4. Ns-As-Ac	5. Ns-As
$H_n$ , км	1,0–1,5	1,5–2,0	0,1–1,0	0,1–1,0	0,1–1,0
$H_b$ , км	1,2–6,0	5,0–15,0	1,0–13,0	1,0–8,0	1,0–6,0
$\Delta H_n$ , км	0,6–5,5	3,3–8,0	0,5–8,0	0,5–5,0	0,5–5,0
$Z_m$ , dBZ	10–28	28–75	28–68	8–28	8–28
$q_m$ , г/м <sup>3</sup>	0,1–1,5	0,5–20,0	0,1–10,0	0,1÷0,3	0,1–0,3
$K$ , м <sup>2</sup> /с	50–200	50–1500	50–500	25–40	5–25
$\sigma$ , м/с	0,1–2,0	0,1–20,0	0,1–15,0	0,1÷0,8	0,1–0,3
$d$ , мкм	500	1000	700	300	200
$N_{кр} = a \cdot q_m$ , м	$2,0 \cdot 10^4 \cdot q_m$	$5 \cdot 10^3 \cdot q_m$	$7,4 \cdot 10^3 \cdot q_m$	$9,6 \cdot 10^4 \cdot q_m$	$3,1 \cdot 10^3 \cdot q_m$
$V_r$ , м/с	2,0	1–4	1–3,5	1–1,3	1–2
$W$ , м/с	2,0–12,0	2,0–50,0	0,08–30,0	0,0–0,2	0,02–0,2

Примечание.

1. Cu-Cong: мощно-кучевые облака; 2. Cb: кучево-дождевые облака; 3. Ns-As-Cb: - слоисто-дождевые, высоко-слоистые и кучево-дождевые облака; 4. Ns-As:Ac: слоисто-дождевые, высоко-слоисто-кучевые облака; Ns-As (слоисто-дождевые и высоко слоистые облака верхнего яруса) [32].

### Критерии пригодности ООС для АВ и ИРО

Под критериями пригодности ООС различных классов для АВ и ИРО понимаются качественные и количественные характеристики их параметров, воздействие на которых оптимальным количеством ЧКР и/или ПГР приведет к оптимальному увеличению и/или уменьшению атмосферных осадков.

Критерии пригодности ООС различных классов для АВ получены по данным НМС, СМЛ и МРЛ. Они представлены в табл. 3, где:  $Z_m$  – максимальная радиолокационная отражаемость ООС в области отрицательных температур,  $\Delta H_n$  и  $t_{нв}$  – мощность переохлажденной части ООС и температура на их верхней границе ООС[21].

В основу критериев ИРО в ЗФО ООС различных классов легли следующие условия, полученные из анализа уравнений (1) – (4) [15, 16, 19, 23]:

$$Z_m = 2,4 \cdot 10^4 q_m^{1,8}, \quad (1)$$

$$q_m = 4,1 \cdot 10^{0,0549 Z_m - 3} \quad (2)$$

$$N_i = 1,91 \cdot 10^{12} \frac{q_m}{d^3 \rho_2}, \quad (3)$$

$$N_i = 7,8 \cdot 10^{12} \frac{10^{0,0549 Z_m - 3}}{d^3 \rho_2}, \quad (4)$$

Искусственные капли и кристаллы, образованные на ЧКР:

— остаются в ЗФО, если  $V_{i,r} = W$ ,  $d_i = d_{i,кр}$  и  $N_i = N_{i,кр}$ ; (5)

— выпадают из ЗФО, если  $V_{i,r} > W$ ,  $d_i > d_{i,кр}$  и  $N_i < N_{i,кр}$ ; (6)

— выносятся из ЗФО, если  $V_{i,r} < W$ ,  $d_i < d_{i,кр}$  и  $N_i < N_{i,кр}$  (7)

В уравнениях (1) – (7)  $d_{i,кр}$  и  $N_{i,кр}$  называются критическими диаметрами (мкм) и концентрациями (м<sup>-3</sup>) замерзших капель, образованных на ЧКР так, как скорости их гравитационного падения равны скоростям восходящих потоков. Численные значения  $d_{i,кр}$  и  $N_{i,кр}$  в различных типах ООС существенно отличаются друг от друга и зависят от водности  $q$ , скоростей гравитационного падения частиц и восходящих потоков (табл. 2).

С помощью уравнений (1) – (3) были проведены численные расчеты и построены графики, связывающие между собой значения  $N_i$  со значениями  $Z_m$ ,  $q_m$  и  $d_i = 500$  мкм параметров ООС различных классов (рис. 1). Из рисунка следует, что необходимым и достаточным условием ИУО является выполнение следующих неравенств:  $d_i > d_{i,кр}$  и  $N_i < N_{i,кр}$ . При этом значение  $N_i$  на рис. 1б должно располагаться ниже изолинии  $d_{i,кр} = 500$  мкм.

Для оценки возможности искусственного вызывания осадков из Cu-Cong по измеренным значениям радиолокационных параметров с помощью табл. 3, определяем пригодность их для воздействия. Если она удовлетворяет критериям засева, то для вызывания искусственных осадков на графике рис. 1а находим измеренное нами по радиолокатору значение  $Z_m$ . Двигаясь с этой точки вверх до точки пересечения с кривой линией, соответствующей значению  $d_{i,кр} = 500$  мкм и, перемещаясь от нее влево, в точке пересечения оси ординат определяем значение  $q_m$ . Далее на рис. 1б на оси абсцисс находим значение  $q_m$ . Двигаясь от этой точки вверх до пересечения с изолинией  $d_i = 500$  мкм, а затем влево на оси ординат находим значение  $N_{i,кр}$ . Для вызывания искусственных осадков должны выполняться следующие условия:  $d_i > d_{i,кр}$  и  $N_i < N_{i,кр}$ . На графике рис. 1 б значения  $N_i$  должны располагаться ниже изолинии  $d_{i,кр} = 500$  мкм.

### Схемы засева ООС в работах по ИРО

Засеву подвергаются все ООС, находящиеся в стадии развития или квазистационарного состояния и удовлетворяющие критериям пригодности их для АВ и ИРО (табл. 2 и табл. 3). Схемы засева ООС различных классов, с учетом структуры и динамики развития, представлены на рис. 2 а и 2 б. Засев Cu-Cong осуществляется на уровнях изотерм минус 5 – минус 15 °С по всей площади зоны повышенной радиолокационной отражаемости, ограниченной изолинией отражаемости  $Z_m = 15$  dBZ и расположенной перпендикулярно направлению его перемещения. Засев Cb осуществляется на уровнях изотерм минус 5 – минус 15 °С во фронтальной части площади ЗФО, ограниченной изоконтурными радиолокационной отражаемости  $Z_m = 15$  dBZ и  $Z_m = 45$  dBZ и расположенной перпендикулярно направлению перемещения ООС (рис. 2 а).

Аналогичным образом, в соответствии построенными схемами засеваются ЗФО ООС Ns – As-Cb, Ns – As – Ac и Ns – As.

### Нормы расхода ЧКР и/или ПГР в ЗФО ООС

В работах по ИРО засев ЗФО ООС осуществляется с помощью ПГР, имеющих различные эффективные радиусы действия. Особенностью этих ракет является то, что на каждом метре траектории их полёта создаются концентрации ЧКР  $N = 10^{10} - 10^{11} \text{ м}^{-3}$  и более [4], превышающие концентрации микрофизического и динамического засевов в четырех – шестикратном размерах.

Распространение ЧКР от линейного мгновенного источника может быть описано уравнением турбулентной диффузии:

$$L_D = 2\sqrt{K \tau \ln(Q / 4\pi K \tau C_R)}, \quad (8)$$

где:  $L_D$  (км) – радиус распространения ЧКР;  
 $K$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) – коэффициент турбулентной диффузии,  
 $\tau$  (с) – время расширения зоны кристаллизации;  
 $Q = 10^{11}$  ( $\text{м}^{-1}$ ) – число ЧКР на единицу пути по линии засева в момент начала диспергирования;  
 $C_R$  ( $\text{м}^{-3}$ ) – заранее заданная конечная концентрация ЧКР в единице объема ЗФО ООС.

После дифференцирования уравнения (8) по времени, получим соотношения для оценки максимального радиуса ( $L_D$ ) и времени ( $\tau$ ) распространения зоны кристаллизации, в зависимости от значений  $Q$ ,  $GR$  и  $K$ :

$$L_D = 0,342 \cdot \sqrt{\frac{Q}{C_R}}, \quad (9)$$

$$\tau = 2,93 \cdot 10^{-2} \frac{Q}{C_R K}. \quad (10)$$

С помощью уравнений (9) и (10) проведено численное моделирование распространения ЧКР в ЗФО различных ООС. Построен график (рис. 3) для оценки нормы расхода частиц кристаллизующего реагента в ЗФО ООС различных классов с целью ИРО.

Расход количества ПГР в ЗФО ООС, рассчитывается по формуле:

$$n = \sum_{k=1}^n \frac{L_1}{L_2 + L_D + \Delta L} k_i, \quad (11)$$

где  $L_1$  (км) – длина ЗФО, в соответствии с которой выбирается длина ее засева;  
 $L_2$  (км) – длина распространения ЧКР в ЗФО, создаваемая отдельными ПГР, в зависимости от эффективного радиуса их действия;  $L_D$  и  $\Delta L$  (км) – значения распространения ЧКР

Табл. 3. КРИТЕРИИ ПРИГОДНОСТИ ООС ДЛЯ АВ

Параметры ООС	Классы ООС				
	Cu-Cong	Cb	Ns-As-Cb	Ns – As –Ac	Ns – As
$Z_m$ , dBz	$\geq 15$	$\geq 15$	$\geq 15$ ;	$\geq 15$	$\geq 15$
$\Delta H_n$ , км	$\geq 2,5$	$\geq 2,0$	$\geq 1,0$	$\geq 3,0$	2,0
$T$ °C	$< -10$	$< -10$	$< -10$	$< -10$	$< -10$

в ЗФО вдоль и поперек движения системы, при заданных коэффициентах турбулентной диффузии  $K$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ), начальной  $Q$  ( $\text{м}^{-1}$ ) и конечной  $N_i$  ( $\text{м}^3$ ) их концентрации;  $k_i$  (шт.) – кратность засева ЗФО ООС

Расстояние между двумя линиями засева ЧКР рассчитывается по уравнению:

$$L_3 = L_D + \Delta L, \quad (12)$$

где  $\Delta L = Vt$  – расстояние между двумя траекториями полета ракет, пройденное ООС с ЧКР со скоростью  $V$  (км/мин) за время  $t$  (мин), равное времени распространения зоны кристаллизации, при заданных коэффициенте турбулентной диффузии  $K$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ), начальной  $Q$  ( $\text{м}^{-1}$ ) и конечной  $N_i$  ( $\text{м}^3$ ) концентрации ЧКР.

### Реализация метода прерывания града на подступах ЗТ

Разработанный метод прерывания града к подступам ЗТ, включает в себя:

- распознавание с помощью «АСУ-МРЛ» ОВ 3–4-й категорий, развивающихся на ПТ и перемещающихся в сторону границ ЗТ со скоростью  $V$ ;
- оценку с помощью «АСУ-МРЛ» расстояния ( $R$ ) между  $Z_m$  ОВ 3–4-й категорий и границ ЗТ по линии предполагаемой траектории их перемещения и времени их достижения границ ЗТ по формуле:  $t = R/V$ ;
- распознавание с помощью «АСУ-МРЛ», пригодных для АВ и ИРО различных классов ООС, развивающихся на ЗТ со стороны вторжения ОВ 3–4-й категорий;

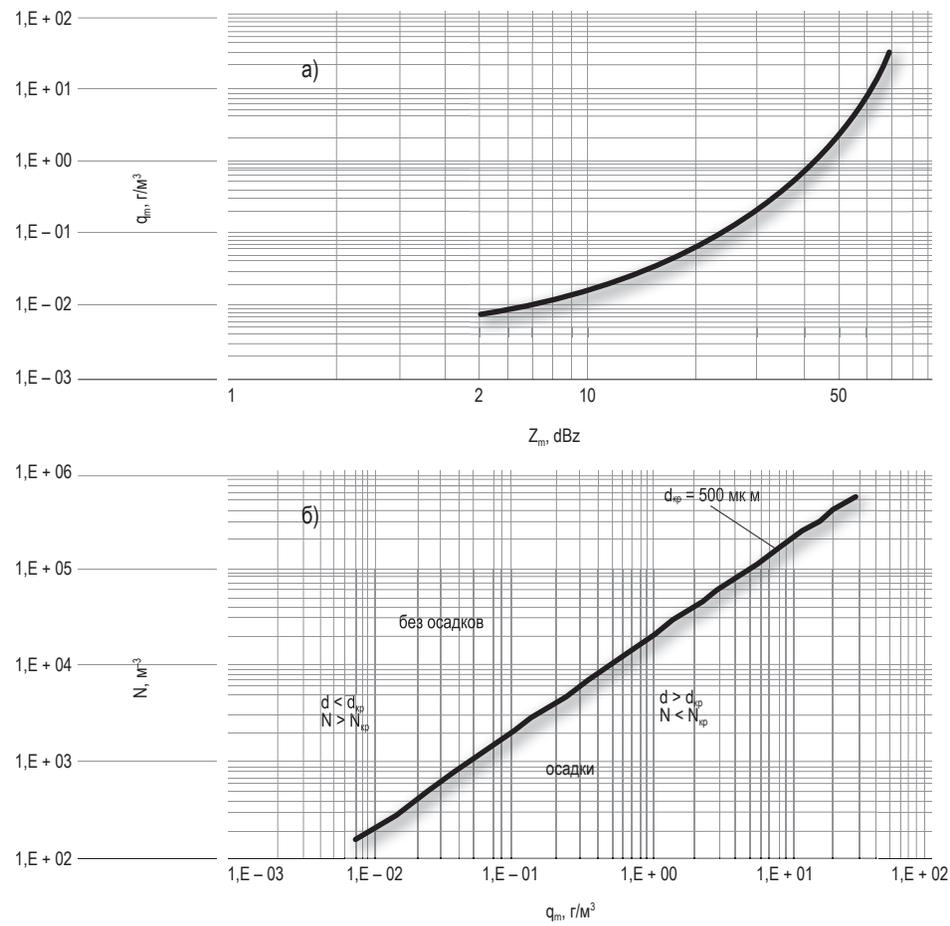
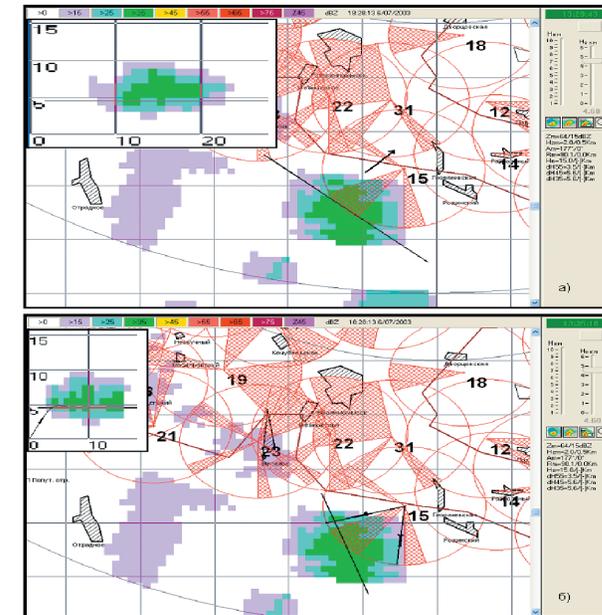


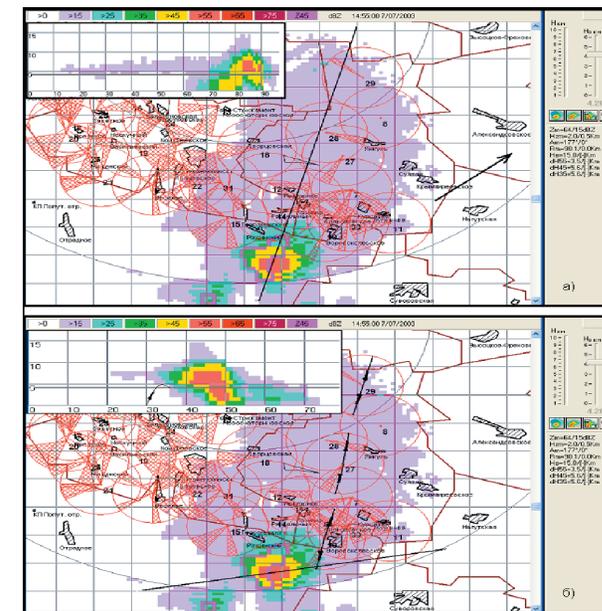
Рис. 1. Связь значений  $N_i$  со значениями  $Z_m$  и  $q_m$  при  $d_i = 500$  мкм в ЗФО ООС различных классов.

- расчет с помощью уравнений (1) и (3) или рис. 1а значения  $q_m$  по данным  $Z_m$ , а с помощью уравнений (3) и (4) или рис. 1б значения  $N_i$  по данным  $Z_m$ ,  $q_m$  и  $d_{кр} = 500$  мкм, с целью выбора концепции микрофизического и/или динамического засева;
- оценку с помощью неравенств (5) – (7) и данных параметров  $q_m$ ,  $d > d_{кр} = 500$  мкм и  $N < N_{кр}$  условий искусственного увеличения осадков из ООС различных классов, развивающихся на ЗТ со стороны вторжения ОВ 3–4-й категории;

а



б

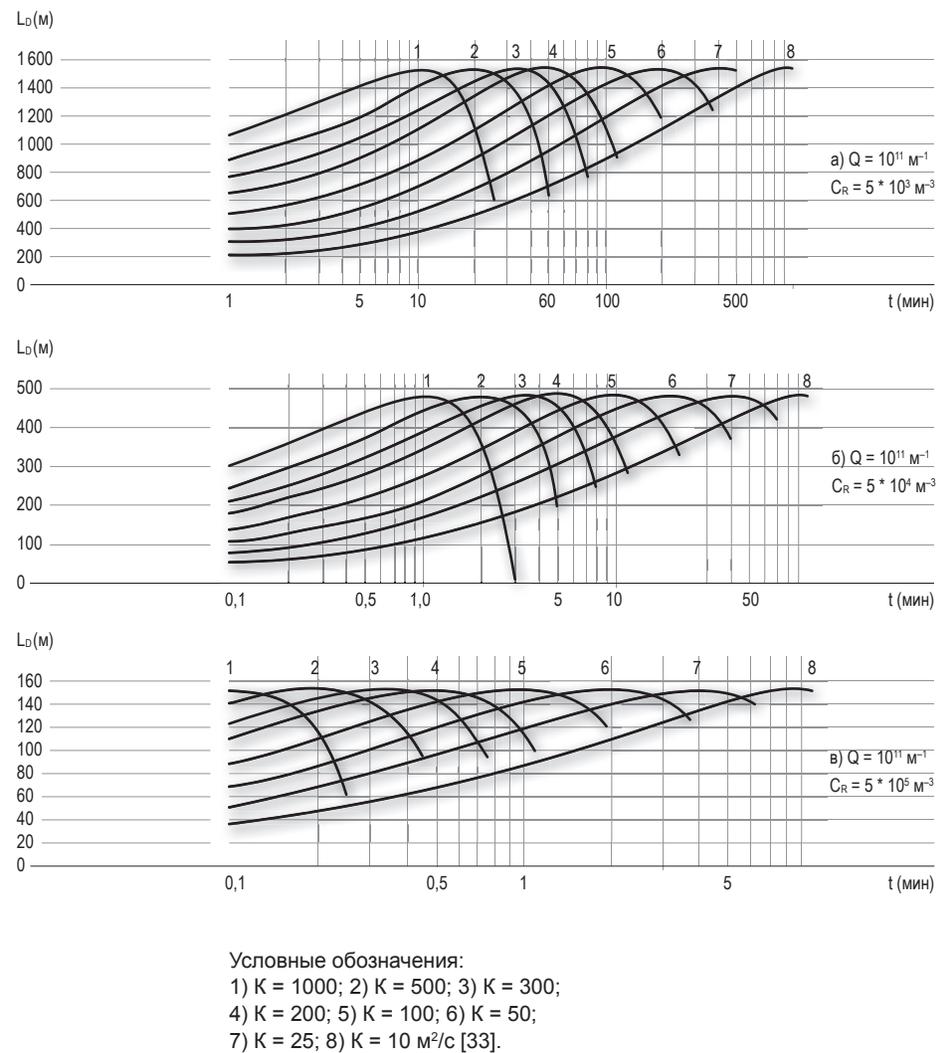


Условные обозначения:

- вертикальный разрез радиозэхо ООС через максимальную радиолокационную отражаемость ( $Z_m$ );
- траектории движения ракеты,
- направление движения ООС.

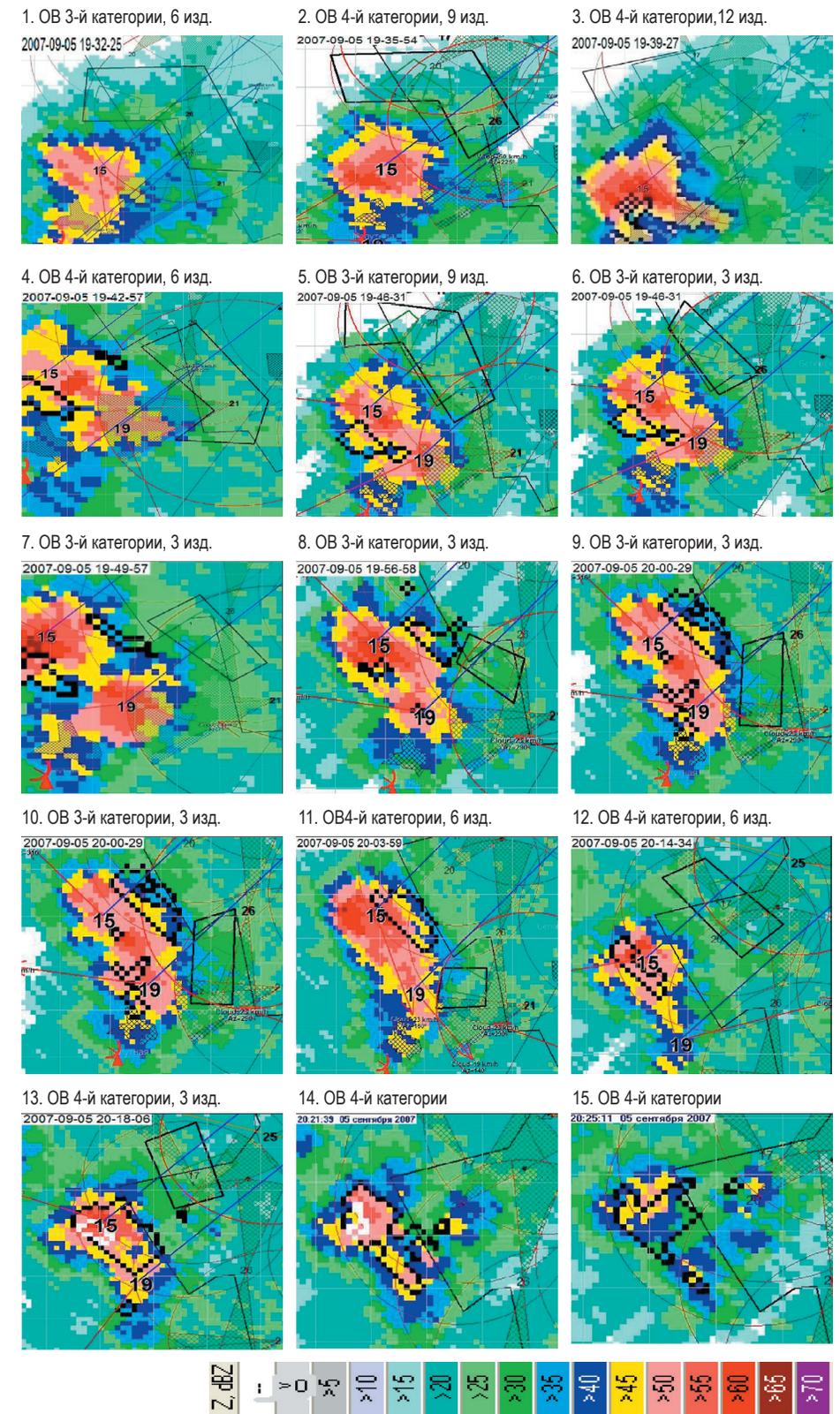
Рис. 2.

Схема засева ЗФО Cu-Cong (а) и Cb (б).

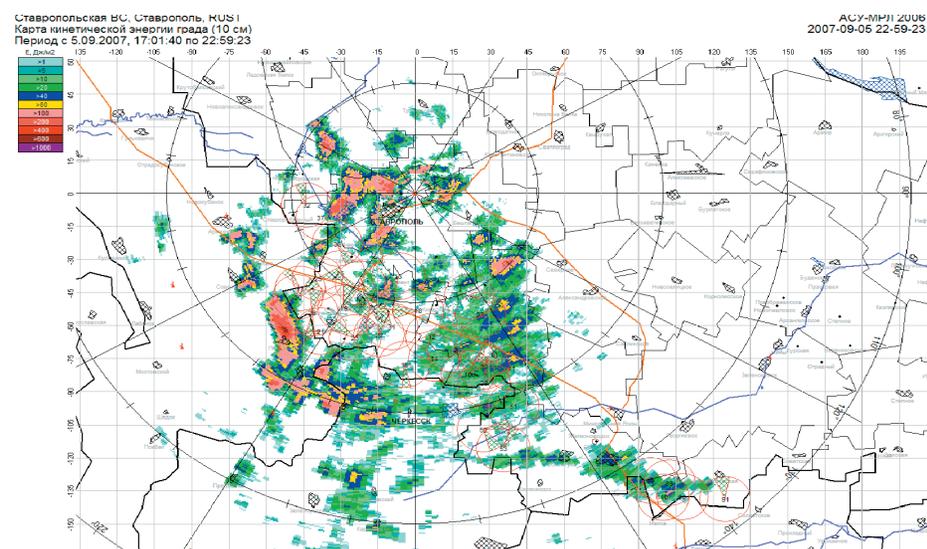


**Рис. 3.** Зависимость  $t$  и  $L_D$  распространения зоны кристаллизации в ЗФО при различных значениях  $K$ ,  $Q$  и  $G_R$ .

- расчет с помощью уравнений (8) – (10) или рис. 3 радиуса ( $L_D$ ) и времени ( $t$ ) распространения ЧКР в ЗФО ООС различных классов по данным значений параметров  $K$ ,  $Q_i$  и  $C_{Ri}$ ;
- оценку с помощью уравнений (11) – (12) норм расхода количества ракет в ЗФО ООС различных классов, развивающихся на ЗТ со стороны вторжения ОВ 3–4-й категории;



**Рис. 4.** Фрагменты засева ООС, развивающихся на ЗТ со стороны вторжения ОВ 3–4-й категории (5 сентября 2007 г.).



**Рис. 5.** Кинетическая энергия падающего града ОВ 3–4 категорий на подступах ЗТ, измеренная на высоте  $H = 3,5$  км над у.м при пороге чувствительности 35 dBZ (5 сентября 2007 г.).

- принятие решения о засеве ЗФО ООС, развивающихся на ЗТ, с целью преждевременного стимулирования из них осадков и ослабления скоростей восходящих потоков, питающих ОВ 3–4-й категорий со стороны их вторжения.

На рис. 4 представлены результаты фрагментов засева ОВ 3–4-й категорий, развивающихся 5 сентября 2007 г. на ПТ, со стороны их вторжения на ЗТ.

Из анализа результатов засева конвективных ячеек (КЯ) № 15 и № 19, переходящих из ОВ 3-й в ОВ 4-й категории и приводящих к прерыванию града на подступах ЗТ следует, что:

- продолжительности времени их засева соответственно достигают 46 и 14 мин, а расход в них количества изделий «Алазань-6» – 54 и 12 шт. Последние значительно ниже средних значений продолжительности воздействия и расхода изделий в ОВ 4-й категории, приведенных в [2].

Полученные результаты подтверждаются данными рис. 5, на котором представлены значения кинетической энергии падающего града из КЯ № 15 и № 19 не на ЗТ, а на подступах ее.

## Выводы

1. Воздействия, проведенные в соответствии действующими методами и схемами засева на вторгшиеся из ПТ на ЗТ ОВ 3–4-й категорий, не в состоянии полностью прервать выпадение града к подступам ЗТ. Их частичное ослабление отмечается лишь за счет многократного засева зон аккумуляции и областей будущего градообразования, оказавшиеся в радиусе действия ПГР.
2. Над районами региона Центрального Кавказа по данным НМС, СМЛ и МРЛ выявлены 5 классов полей ООС и разработаны критерии пригодности их для АВ и ИРО. Они успешно применяются в разработанном методе прерывания града к подступам ЗТ со стороны вторжения ОВ 3–4-й категорий.
3. Проведен анализ физических принципов АВ на ООС, основанных на концепциях преждевременного их разрушения нисходящими потоками и искусственного регулирования процесса осадкообразования в результате микрофизического и динамического засева ЧКР ЗФО ООС. Отличительной особенностью этих засева является более раннее образование крупы на ЧКР и на более низких уровнях, чем это отмечается в естественных условиях.
4. Разработаны схемы засева ООС различных классов с учетом их структуры, динамики развития и эффективного радиуса действия различных ПГИ.
5. Разработаны методы оценки норм расхода количества ПГР с учетом их эффективного радиуса действия и ЧКР с учетом особенностей распространения их концентраций в ЗФО ООС (на каждом метре траектории полёта ПГИ в начальный момент создаются концентрации от  $10^{10}$  до  $10^{11}$   $\text{м}^{-3}$ , превышающие концентрации микрофизического и динамического засева в четыре – шестикратном размерах).
6. Получены уравнения и графики для оценки: норм расхода ЧКР и/или количества ПГР в ЗФО различных ООС; длины и времени распространения ЧКР в ЗФО ООС, в зависимости от значений их коэффициентов турбулентной диффузии  $K$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ), начальной  $Q$  ( $\text{м}^{-1}$ ) и конечной  $CR$  ( $\text{м}^{-3}$ ) концентраций.

7. Анализ выше перечисленных показателей эффективности воздействия позволил: разработать новый метод предварительного засева ООС, развивающихся со стороны вторжения на ЗТ ОВ 3–4-й категории – прервать выпадение града к подступам к ЗТ и увеличить эффективность ПГЗ.
8. Экспериментальная проверка метода проводилась в Ставропольской ВС в период проведения производственных работ по воздействию на градовые процессы (май–октябрь 2004–2008 гг.). Средняя физическая эффективность противоградовой защиты на ЗТ Ставропольского края составила 96,7 % при максимальном значении 99,9%. Результаты испытания убедительно показали возможность прерывания интенсивных градовых процессов на подступах ЗТ.
9. Разработанный новый метод прерывания града может быть использован при планировании и проведении работ по воздействию на градовые процессы и искусственному регулированию атмосферных осадков в различных регионах мира.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абшаев М.Т. Состояние оперативных программ подавления града в мире // Обзор прикладной и промышленной математики. Т. 3. В 2. 1996. С. 246–260.
2. Абшаев М.Т. Активное воздействие на градовые процессы // Руководящий документ. РД. 52.37.596-98. М.: 1998. 32 с.
3. Абшаев М.Т., Малкарова А.М., Оценка эффективности предотвращения града. СПб.: Гидрометеиздат, 2006. 279 с.
4. Абшаев М.Т., Абшаев А. М., Малкарова А. М. Состояние и перспективы развития противоградовых работ // Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата: сборник Международной научной конференции с элементами научной школы. Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2013. С. 3–11.
5. Березкин В.В., Ватиашвили М.Р., Макитов В. С., Федченко Л.М. Оценка времени достижения эффекта воздействия на градовые процессы // Труды ВГИ. Вып. 80, 1991. С. 149-156.

6. Библашвили Н.Ш., Гораль Г.Г., Калов Х.М., Эмба Я.А. Исследование эффективности разрушения конвективных облаков взрывом и продуктами ликвидации противоградовых снарядов // Труды ВГИ. Вып. 47. 1981. С. 36–47.
7. Ватиашвили М.Р., Бахсолиани М.Г., Газашвили А.Г., Георгишвили А.Г., Капанадзе Н.И., Микадзе Б.Ш., Саамишвили Н.Р. Исследование градовых процессов в районах Восточной Грузии // Труды Всесоюзного семинара «Активные воздействия на градовые процессы и перспективы усовершенствования льдообразующих реагентов для практики активных воздействий. М.: Гидрометеиздат, 1991. С. 131–136.
8. Ватиашвили М.Р. Прерывание града предварительным засевом облаков и облачных систем со стороны вторжения ОВ 3–4-й категории // Циклы природы и общества: материалы XIV Международной научной конференции. Ставрополь, 2008. С. 281–290.
9. Ватиашвили М.Р. Уточненный критерий засева объектов воздействия 2-й категории // Циклы природы и общества: материалы XIV Международной научной конференции. Ставрополь, 2008. С. 300–307.
10. Ватиашвили М.Р. Итоговый отчет по теме 1.8.11. «Апробировать в оперативной практике новые технологические достижения по воздействию на градовые процессы» // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). «ГУ» Ставропольская военизированная служба по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы. Ставрополь. 2007, 108 с.
11. Ватиашвили М.Р. Джангуразов Х.Х., Кассиров В.П. Способ активных воздействий на градовые процессы. Патент РФ на изобретение. №2321871, заявка № 2006 121792, а 01 G 15/10/ 2007.
12. Ватиашвили М.Р. Влияние фазовых переходов воды на параметры облаков и облачных систем, развивающихся в естественных условиях и подвергшихся воздействию частицами льдообразующих реагентов // Радиолокационная метеорология и активные воздействия. СПб., 2012. С. 162–177.
13. Ватиашвили М.Р. Исследование градоопасных и градовых ячеек в периоды проведения и отсутствия противоградовой защиты // Труды научной конференции посвященной 80-летию со дня рождения Института геофизики. Тбилиси, 2014. С. 208–213.
14. Ватиашвили М.Р., Априамашвили Н.Ш. К вопросу радиолокационной оценки водозапаса конвективной облачности и коэффициента реализации облачной влаги в районах Восточной Грузии // Труды ВГИ. М.: Гидрометеиздат. 1992. Вып. 85. С. 96–103.
15. Ватиашвили М.Р., Калов Х.М. Размеры трансформации спектра размера гидрометеоров при естественном развитии и активном воздействии на конвективные процессы» // Активные воздей-

- твия на градовые процессы и перспективы усовершенствования льдообразующих реагентов для практики активных воздействий: труды Всесоюзного семинара М.: Гидрометеиздат, 1991. С. 131–136.
16. Ватиашвили М.Р. Физические основы метеорологической защиты населенных пунктов и важнейших объектов // Математическое моделирование в научных исследованиях: материалы Всероссийской научной конференции. Ч. II. Ставрополь, 2000. С. 88–95.
  17. Вульфсон Н.И., Левин Л. М. Разрушение развивающихся кучевых облаков искусственно созданными нисходящими потоками // Доклады. АН СССР. Т. 181, № 4. 1968. С. 855–857.
  18. Гайворонский И. И., Зацепина Л.П., Серегин Ю.А. Результаты опытов воздействия на конвективные облака грубодисперсными порошками с различной дисперсностью и различным удельным весом // Труды ЦАО, Вып. 104. 1976. С. 49–63.
  19. Методические указания по организации и проведению работ по искусственному увеличению осадков из конвективных облаков с помощью противогодовой техники // Г.Г. Сванидзе, Н.А. Бегалишвили, М.Р. Ватян, А.И. Карцивадзе, Ш.Л. Гудушаури. М.: Гидрометеиздат, 1986. 25 с
  20. Мейсон Б. Дж. Физика облаков. Л.: Гидрометеиздат. 542 с.
  21. Облака и облачная атмосфера: Справочник / под ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 647 с.
  22. Сулаквелидзе Г.К. Ливневые осадки и град. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 412 с.
  23. Экба Я А., Ватиашвили М.Р., Закинян Р.Г., Кусова А.А., Ярмолинская О.П. Влияние скрытой теплоты кристаллизации на интенсивность конвекции при воздействии на облака кристаллизующими реагентами // Проблемы физико-математических наук: материалы XLIII научно-методической конференции преподавателей и студентов «Университетская – наука региону». Ставрополь, 1998. С. 5–8.

УДК 004.056.55

Горбенко И.Д. [Gorbenko I.D.],  
Есина М.В. [Yesina M.V.],  
Пономарь В.А. [Ponomar V.A.]

## МЕТОД СЛЕПОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСИ НА ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ КРИВЫХ: УСЛОВИЯ И ТРЕБОВАНИЯ

**Blind electronic signature on elliptic curves method: conditions and requirements**

Работа посвящена рассмотрению метода слепой электронной подписи на основе алгоритма, который описан в ДСТУ ISO/IEC 14888-3:2014 (EC DSA). Рассматривается математическая модель протокола слепой электронной подписи на основе стандартного алгоритма электронной подписи EC DSA. Проводится проверка защищенности протокола слепой электронной подписи на основе этого алгоритма по критерию анонимности. Доказывается, что рассмотренный протокол является защищенным по критерию анонимности, то есть невозможно определить автора подписанного документа. Проводится анализ сложности выполнения электронной подписи исходя из количества и сложности операций, которые необходимы при реализации алгоритма электронной подписи. Сравняется сложность выполнения алгоритма стандартной электронной подписи согласно ДСТУ ISO/IEC 14888-3:2014 (EC DSA) и слепой подписи на его основе. Предоставляются результаты сравнительного анализа и на его основе делаются соответствующие выводы.

The work is devoted to consideration the blind electronic signature method based on algorithm, described in DSTU ISO/IEC 14888-3:2014 (EC DSA). The blind electronic signatures protocol mathematical model based on a standard electronic signature algorithm EC DSA is considered. It is tested the blind signature protocol security based on this algorithm by the anonymity criterion. It is proved, that the considered protocol is protected by the anonymity criterion, that is, it is impossible to identify the author of the signed document. It is analyzed the electronic signature complexity based on the quantity and complexity of operations, which are needed in implementing an electronic signature algorithm. The standard electronic signature according to the DSTU ISO/IEC 14888-3:2014 (EC DSA) algorithm execution complexity and blind signature complexity based on it are compared. The results of comparative analysis are provided and make the appropriate conclusions based on it.

**Ключевые слова:** анализ, анонимность, критерий, слепая подпись, сложность, электронная подпись.

**Key words:** analysis, anonymity, criterion, blind signature, complexity, electronic signature.

### ВВЕДЕНИЕ

Ряд приложений электронных доверительных услуг выдвигает, в качестве обязательного, требование предоставления электронной услуги анонимности (неотслеживаемости). В качестве примера, можно рассматривать системы тайного электронного голосования, электронных денег и т.д. Признанным механизмом предоставления услуги ано-

нимности является применение механизма слепой подписи. Слепой называется подпись, которая накладывается третьей доверенной стороной на предварительно замаскированное сообщение.

В используемой типичной схеме слепой подписи принимают участие, как правило, три стороны [6]: подписывающий – А, эмитент документа – В и проверяющий – С. Эмитент создаёт документ, который подписывающий должен подписать анонимно. То есть, подписывающий не должен знать семантическое содержимое документа и вид финальной подписи. Для этого эмитент маскирует документ при помощи определенного криптографического преобразования и пересылает его подписывающему. Далее подписывающий подписывает замаскированный документ и пересылает его эмитенту. Эмитент снимает с документа преобразование маскирования, а электронная подпись (ЭП), созданная подписывающим, остается под документом в открытом виде. Подписанный таким образом документ получает проверяющий, который проверяет его целостность, истинность и устанавливает авторство при помощи открытого ключа подписывающего.

Принимая во внимание актуальность данной проблемы, на данный момент комитетом ISO/IEC JTC 1/SC 27 разрабатывается пакет стандартов относительно электронных доверительных услуг. Слепая подпись является одной из таких услуг, и относительно неё разрабатывается международный стандарт ISO/IEC DIS 18370-2 [2], который будет регламентировать виды слепой подписи, их использование, а также стандартизировать конкретные механизмы и протоколы слепой подписи.

В [6, 7] были предложены механизмы и протоколы слепой ЭП, которые основываются на алгоритмах ГОСТ 34.10-2001, Шнора и Эль Гамала.

В настоящее время также начали широко использоваться алгоритмы ЭП, которые описаны в международном стандарте ISO/IEC 14888-3:2014 [1]. Поэтому важной становится задача детального исследования алгоритмов ЭП, указанного международного стандарта, с точки зрения применения в механизмах слепой подписи. Для этого необходимо доказать безопасность механизма и протоколов слепой подписи на эллиптических кривых (ЭК) в общем, а также безопасность протоколов при их реализации с использованием стандартов на ЭП, которые рекомендуются к использованию. Также необходимо дать оценки криптографической стойкости непосредственно методам и алгоритмам ЭП на ЭК.

Целью данной работы является определение возможностей и условий реализации, обоснование и разработка обобщенного метода безопасной слепой ЭП на ЭК, а также доказательство безопасности и определения условий реализации конкретных протоколов слепой ЭП при использовании стандарта ISO/IEC 14888-3:2014.

### 1. Общее описание механизма слепой электронной подписи на эллиптических кривых.

Пусть в схеме слепой подписи ЭП на ЭК взаимодействует три стороны [7]: В – абонент (эмитент документа/сообщения  $m$ ), А –

подписывающий и проверяющий С. При этом проверяющим может быть кто угодно из них, либо третья доверенная сторона. Как было сказано во введении, эмитент создает документ  $m$ , который подписывающий должен подписать анонимно, то есть не имея доступ к его семантическому содержанию – на практике – к реальному хеш-значению. Для этого эмитент, получив согласие подписывающего, маскирует документ, а реально – хеш-значение, при помощи определенного криптографического преобразования и пересылает его подписывающему.

После подписания замаскированного документа, подписывающий посылает его эмитенту. Эмитент выполняет обратное, относительно маскирования, преобразование и снимает его, оставив ЭП неповрежденным. Проверяющий, после получения подписанного документа, проверяет его целостность, истинность и устанавливает авторство при помощи открытого ключа подписывающего.

На рисунке 1 схематически изображен протокол слепой ЭП.

Для обеспечения безопасности механизма, предварительно должны быть сгенерированы и защищенным путем распространены определенные общие параметры анализа криптографических преобразований на ЭК. Перечень преобразований и требования к ним определены в соответствующем стандарте [1]. Также должны быть сгенерированы асимметрические пары ключей для подписывающих А, а проверяющий С должен иметь доступ к открытым ключам (сертификатам) подписывающих. Эмитент должен иметь общие параметры, а также ключи маскирования и демаскирования.

Непосредственно этап постановки подписи начинает подписывающий А [4–6]. Он выбирает случайное или псевдослучайное значение одноразового ключа ЭП  $k$ ,  $1 < k < (n - 1)$  и вычисляет точку на ЭК  $E = k \cdot G \bmod n = (x_E, y_E)$ , где  $G$  – базовая точка порядка  $n$ . Далее подписывающий А отправляет точку [8]  $E$  эмитенту В.

Эмитент В вычисляет хеш-значение  $h$  сообщения  $m$  и выбирает параметр маскирования  $\alpha$ , при чем  $1 < \alpha < (n - 1)$ . Потом эмитент вычисляет точку  $C = \alpha \cdot E \bmod n = (x_C, y_C)$ , а также вычисляет величины  $r$  и  $r'$  согласно следующих формул:

$$r = x_C \bmod n \text{ и } r' = x_E \bmod n.$$

Полученные значения  $r$  и  $r'$  эмитент В использует для ослепления действительного хеш-значения  $h$ , например, для EC DSA, получает  $h'$ :

$$h' = \left( \frac{r'}{r} \cdot h \right) \bmod n.$$

Далее эмитент В пересылает значение  $h'$  подписывающему А, который используя полученное значение  $h'$ ,  $r'$ , сеансовый ключ  $k$  и свой личный (секретный) ключ  $d$ , подписывает замаскированное хеш-зна-

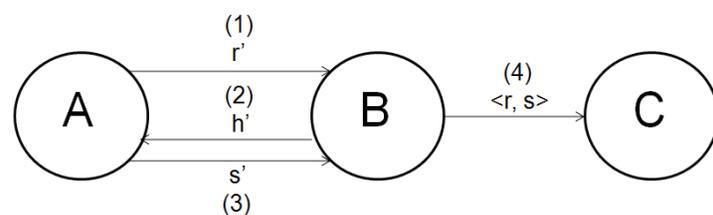


Рис. 1.

**Протокол слепой подписи на эллиптических кривых:**

- (1) – абонент А передает абоненту В  $x$ -координату точки  $E (r')$ ;
- (2) – абонент В «ослепляет» хеш-значение сообщения и передает его абоненту А ( $h'$ );
- (3) – абонент А формирует «ослепленную» подпись  $s'$  и передает её абоненту В;
- (4) – абонент В формирует окончательную подпись под сообщением и передает её проверяющему С (пара  $\langle r, s \rangle$ )

чение  $h'$  и получает  $s'$  для выбранного стандарта, например, для EC DSA:

$$s' = \frac{d \cdot r' + h'}{k} \bmod n,$$

и пересылает значение  $s'$  эмитенту В.

Эмитент В проверяет истинность ослепленной подписи  $s'$  при помощи обычной проверки ЭП, которая определена в соответствующем стандарте [1], используя открытый ключ  $Q$  подписывающего А. Если  $s'$  проходит проверку В, то он формирует из него слепую подпись сообщения в виде  $\langle r, s \rangle$ , то есть демаскирует  $s'$ , превращая его в  $s$ .

При проверке подписи  $\{m, \langle r, s \rangle\}$  проверяющий вычисляет точку  $R = (x_R, y_R)$ , используя алгоритм, который определен в соответствующем стандарте [1], и открытый ключ  $Q$  подписывающего А. Подпись считается истинной, если выполняется следующее соотношение [6]:

$$r = x_R \bmod n.$$

## 2. Проверка защищенности механизма слепой ЭП по критерию анонимности

Для схем слепой подписи, в отличие от других разновидностей ЭП, актуальной есть атака нарушения анонимности. Если считать, что ЭП, которая используется, является стойкой против всех известных и потенциальных атак, тогда для доказательства безопасности механизма слепой подписи необходимо доказать еще и её стойкость к атаке нарушения анонимности.

Суть атаки на анонимность заключается в том, что она может быть реализована подписывающим при условии, что у него будут для каждой сессии постановки подписи все известные ему параметры схемы слепой подписи вместе с идентификатором документа. Накопленная таким образом база данных (БД) может использоваться в атаке, которая заключается

в попытке определения автора определенного документа  $m$  с подписью  $\langle r, s \rangle$ , которая пройдет проверку при помощи открытого ключа подписывающего  $Q$ .

В предложенном протоколе атака нарушения анонимности может быть выполнена, например, следующим образом. Подписывающий А для каждой строки своей БД должен вычислить возможный параметр ослепления  $\alpha'$ . Потом он, при помощи вычисленных параметров  $(h', r', s')$ , для каждой строки БД вычисляет точку  $R'$ . Напоследок – строка построенной таким образом БД, для которой выполнится соотношение

$$r = x_{R'} \bmod n,$$

указывает на эмитента сообщения. На практике точка  $R'$  всегда совпадает с точкой проверки  $R$  и не зависит от параметров  $h'$ ,  $r'$ ,  $s'$ , и, следовательно, не даёт возможности определить автора документа  $m$ . Для доказательства этого утверждения в стандартной проверке ЭП используется значение  $R'$ , вычисленное для соответствующего стандарта. При указанном условии, соответствующий протокол слепой подписи считается защищенным по критерию анонимности, так как невозможно определить автора документа  $m$  [6, 7].

## 3. Анализ безопасности слепой ЭП от атаки на анонимность.

Как указано выше, алгоритмы слепой подписи будут проходить проверку на анонимность, даже, если подписывающий А будет хранить все параметры  $h'$ ,  $r'$ ,  $s'$ , то в дальнейшем он не сможет установить соответствие этих параметров для эмитента, для которого подпись была выполнена. Но есть еще параметр ослепления  $\alpha'$ . Исходя из этого, в некоторой степени, возможно нарушить анонимность слепой подписи. Поэтому считается, что метод слепой подписи на основе алгоритма EC DSA обеспечивает слепую подпись с отслеживаемой анонимностью [5]. Подробнее рассмотрим это ниже.

Рассмотрим возможный путь обеспечения анонимности при помощи аппаратных или аппаратно-программных средств криптографической защиты информации (КЗИ). Использование таких средств для слепой подписи подобно использованию криптографических модулей для генерации ключей пользователей в центрах сертификации ключей (ЦСК). Пользователь может сгенерировать свой ключ на станции в самом центре, но благодаря тому, что использовалось сертифицированное средство КЗИ, пользователь может быть уверен в том, что только он владеет ключом и в ЦСК не осталось копии этого ключа.

Таким же образом криптографическое средство (модуль) может использоваться для слепой подписи. Рассмотрим это подробнее. Пусть есть микромодуль D, в котором будет записана асимметричная пара ключей для выполнения подписи и обеспечения конфиденциальности при получении ослепленного хеш-значения. В таком случае подписывающий А

выступает лишь оператором применения криптомодуля  $D$ , так как у него нет прямого доступа к ключам. Так же криптомодуль  $D$  может полностью заменять  $A$ , тогда эмитент  $B$  получает доступ к работе со средством КЗИ и подписывающий при таком условии оказывается ненужным.

В этом случае выполняются следующие операции [5]: 1) абонент  $B$  направленно шифрует  $h'$  на открытом ключе криптографического модуля  $D$ ; 2) полученный результат шифрования  $E_D(h')$  посылается  $D$  напрямую, либо при помощи оператора  $A$ ; 3)  $D$  расшифровывает  $h'$  и создает  $s'$ ; 4)  $r'$  и  $s'$  посылаются эмитенту  $B$ , а  $h'$  удаляется из памяти  $D$ .

Из-за того, что  $h'$  обрабатывается только в  $D$  и у  $A$  нет возможности расшифровать  $E_D(h')$ , подписывающий не сможет осуществить атаку на анонимность, так как у него не будет одного из указанных параметров.

Предложенный метод, как показал анализ, может использоваться при предоставлении услуг слепой ЭП в облаке. Также он может быть использован при электронном голосовании. При голосовании избиратель заходит в кабинку, где установлена автоматизированная станция и выполняет голосование согласно пунктам 1) – 4). При помощи метода слепой подписи и использования запрограммированного на это средства КЗИ, обеспечивается анонимность голосования и подтверждается действительность и целостность каждого голоса [5].

#### 4. Протокол слепой подписи на основе ISO/IEC 14888-3:2014 (EC DSA). Доказательство безопасности протокола слепой подписи для алгоритма ЭП EC DSA выполняется согласно разделу 1. В таблицах 1 и 2 приведены результаты анализа и параметры протокола слепой подписи на основе алгоритма ЭП EC DSA [1, 4–5].

Докажем корректность проверки на анонимность [1, 5–6]:

$$R' = \alpha' \cdot E \bmod n = \frac{s' \cdot (r'/r')}{s} \cdot E \bmod n = \frac{dr' + h' \cdot r}{k \cdot r'} \cdot E \bmod n = \frac{dr' + \frac{r}{r'} \cdot h' \cdot r}{k \cdot r'} \cdot E \bmod n = \frac{dr' + h}{k} \cdot E \bmod n = \frac{dr' + h}{ks} \cdot kG \bmod n = \left(\frac{dr'}{s} \cdot G + \frac{h}{s} \cdot G\right) \bmod n = \left(\frac{r}{s} \cdot Q + \frac{h}{s} \cdot G\right) \bmod n. \quad (1)$$

С учетом указанного условия (1), соответствующий протокол слепой подписи считается защищенным по критерию анонимности, так как невозможно определить автора документа  $m$  [5–8].

#### 5. Анализ сложности выполнения ЭП

Приведем результаты сравнения сложности выполнения стандартного алгоритма ЭП и алгоритма слепой подписи на основе данной стандартной ЭП [1, 3]. Будем основываться на результатах, которые были получены и описаны в [3]. Результаты анализа приведены в таблице 3.

Табл. 1. ВЫРАЖЕНИЯ ДЛЯ ОСЛЕПЛЕННОЙ И ФИНАЛЬНОЙ ПОДПИСИ И ИХ ПРОВЕРКИ

Параметры	EC DSA
Ослепленная подпись	$s' = d \cdot r' + h' / k \bmod n$
Проверка ослепленной подписи	$R' = (h/s \cdot G + r'/s \cdot Q) \bmod n, r = x_R \bmod n$
Финальная подпись	$s = s' \cdot (r'/r) / a \bmod n$
Проверка финальной подписи	$R = (h/s \cdot G + r'/s \cdot Q) \bmod n (x_E, y_E), r = x_R \bmod n$

Табл. 2. ПАРАМЕТРЫ ПРОТОКОЛА СЛЕПОЙ ПОДПИСИ И ПРОВЕРКИ ЗАЩИЩЕННОСТИ ПРОТОКОЛА ПО КРИТЕРИЮ АНОНИМНОСТИ

Параметры	EC DSA
Открытый ключ	$Q = d \cdot G \bmod n$
Точка $E$	$E = k \cdot G \bmod n = (x_E, y_E)$
Хеш-значение	$E = H(m)$
Точка $C$	$C = \alpha \cdot E \bmod n = (x_C, y_C)$
Величины $r$ та $r'$	$r = x_C \bmod n, r' = x_E \bmod n$
Ослепленный хеш-образ	$h' = (r'/r \cdot h) \bmod n$
Параметр для проверки на анонимность	$\alpha' = s' \cdot (r'/r) / s \bmod n$
Проверка на анонимность	$R' = \alpha' \cdot E \bmod n = (x_{R'}, y_{R'}) \Rightarrow R' = (h/s \cdot G + r'/s \cdot Q) \bmod n, r = x_R \bmod n$

Табл. 3. СРАВНЕНИЕ ЧИСЛА ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ АЛГОРИТМА ЭП СОГЛАСНО ISO/IEC 14888-3:2014 (EC DSA) И АЛГОРИТМА СЛЕПОЙ ЭП НА ОСНОВЕ ДАННОГО СТАНДАРТА

Процесс	Операция	EC DSA	Слепая ЭП EC DSA
Формирование ЭП	$h()$	1	1
	$\pi()$	1	2
	Вычисление обратного элемента $z \bmod n$ в $Z_n$	1	3
	Умножение в $Z_n$	2	7
	Сложение/вычитание в $Z_n$	1	1
	Скалярное умножение точки кривой	1	2
Проверка ЭП	$h()$	1	1
	$\pi()$	1	2
	Вычисление обратного элемента $z \bmod n$ в $Z_n$	1	2
	Умножение в $Z_n$	2	4
	Сложение точек на кривой	1	2
	Скалярное умножение точки кривой	2	4

**Исходя из результатов таблицы 3, можно сделать следующие выводы:**

Процесс формирования ЭП

- 1) вычисление значения функции хеширования  $h()$ : для стандартной и для слепой ЭП необходимо вычислить по одному значению  $h()$ ;
- 2) вычисление значения  $\pi()$  функции: для стандартной ЭП необходимо вычислить одно значение, для слепой ЭП необходимо вычислить два значения;
- 3) операция деления по модулю ( $z^{-1} \bmod n$ ): для стандартной ЭП необходимо выполнить операцию один раз, для слепой ЭП – три раза;
- 4) операция умножения по модулю в поле: для стандартной ЭП необходимо выполнить операцию два раза, для слепой ЭП – семь раз;
- 5) операция сложения/вычитания в поле: для стандартной и для слепой ЭП необходимо выполнить данную операцию по одному разу;
- 6) скалярное умножение точки кривой: для стандартной ЭП необходимо выполнить одно скалярное умножение точки кривой, для слепой ЭП – два скалярных умножения точки кривой;

Процесс проверки ЭП

- 1) вычисление значения функции хеширования  $h()$ : для стандартной и для слепой ЭП необходимо вычислить по одному значению  $h()$ ;
- 2) вычисление значения  $\pi()$  функции: для стандартной ЭП необходимо вычислить одно значение, для слепой ЭП необходимо вычислить два значения;
- 3) операция деления по модулю ( $z^{-1} \bmod n$ ): для стандартной ЭП необходимо выполнить операцию один раз, для слепой ЭП – два раза;
- 4) операция умножения по модулю в поле: для стандартной ЭП необходимо выполнить операцию два раза, для слепой ЭП – четыре раза;
- 5) сложение точек на кривой: для стандартной ЭП необходимо выполнить сложение точек на кривой один раз, для слепой ЭП – два раза;
- 6) скалярное умножение точки кривой: для стандартной ЭП необходимо выполнить скалярное умножение точки кривой два раза, для слепой ЭП – четыре раза.

Операция деления по модулю является самой сложной операцией [3]. Также в алгоритме слепой ЭП количество операций умножения по модулю в поле больше, чем в стандартной ЭП. Исходя из этого, можно сказать, что алгоритм слепой ЭП на основе стандартной ЭП будет вычислительно сложнее, нежели сама стандартная ЭП EC DSA. Однако, также стоит учитывать тот факт, что слепая ЭП обеспечивает защиту по критерию анонимности, в отличие от стандартной ЭП EC DSA.

То есть, можно сделать вывод, что хотя слепая ЭП на основе EC DSA и является вычислительно сложнее, нежели стандартная ЭП, слепая ЭП обеспечивает защиту по критерию анонимности.

## ВЫВОДЫ

1. Метод слепой ЭП обеспечивает подтверждение истинности документов без раскрытия их авторства и может быть реализован с использованием ЭП EC DSA.
2. В случае приведенной слепой ЭП, к критериям проверки защищенности механизма ЭП добавляется критерий анонимности. При его использовании доказываемость невозможности определить подписывающему автору документа, если он будет использовать все известные ему параметры, которые использовались при постановке подписи.
3. При проверке механизма слепой ЭП по критерию анонимности необходимо выяснить, может ли подписывающий вычислить подпись в немаскированном виде при помощи БД промежуточных значений, которую он создает при постановке подписи.
4. Показано, что механизм слепой подписи, который основывается на ISO/IEC 14888-3:2014 (EC DSA), является стойким по критерию анонимности. Также исследования показали, что соотношения между параметрами маскирования надо выбирать таким образом, чтобы с их использованием подписывающий не мог определить автора документа.
5. Основным преимуществом предложенного метода слепой ЭП, относительно существующих, есть то, что действия подписывающего и проверяющего такие же, как описано в соответствующем стандарте для обычной подписи и проверки в группе точек ЭК. Отличие состоит лишь в том, что подписывающий получает хеш-значение, а не вычисляет его сам. Шаги, которые отличают слепую подпись от обычной, выполняются эмитентом. Такая методика делает внедрение функционала слепой ЭП в существующие информационно-телекоммуникационные системы таковым, что почти не требует дополнительных усилий. Необходимо только реализовать протокол для эмитента, а подписывающий и проверяющий могут использовать уже существующие средства создания и проверки ЭП.
6. При рассмотренном подходе можно напрямую ссылаться на существующие стандарты и не вступать с ними в противоречия (проверка подписи по одному стандарту, как для ЭП, так и для слепой подписи).
7. Так как алгоритм слепой подписи в методе слепой подписи совпадает с алгоритмом ЭП соответствующего стандарта, то алгоритм слепой подписи является уязвимым к тем же атакам, что и стандартный алгоритм ЭП.
8. При формировании финальной подписи используется тот самый стандартный алгоритм ЭП потому, что финальная

подпись формируется из слепой, для которой выполняется умножение либо деление на случайное число, которое никоим образом не влияет на стойкость к атакам.

9. Также обнаружено, что рассмотренный алгоритм обеспечивает только отслеживаемую анонимность. Для обеспечения полной анонимности необходимо использовать модели КЗИ, которые предложены в разделе 3 данной работы. Альтернативой может быть изменение самого механизма, но это приведет к потере всех его преимуществ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Information technology – Security techniques – Digital signatures with appendix – Part 3: Discrete logarithm based mechanisms: ISO/IEC 14888-3 (Edition 2 (2006-11-15)): 2006. 68 p.
2. Information technology – Security techniques – Blind digital signatures – Part 2: Discrete logarithm based mechanisms: ISO/IEC DIS 18370-2:2014(E): 2015. 70 p.
3. Горбенко І.Д., Горбенко Ю.І. Прикладна криптологія. Теорія. Практика. Застосування: монографія. Харків: Форт, 2012. 870 с.
4. Єсіна М.В. Протокол сліпого електронного цифрового підпису на еліптичних кривих на основі міжнародного стандарту ISO/IEC 14888-3:2006 (ECDSA) та національного стандарту ДСТУ 4145-2002 / М.В. Єсіна // Теоретичні та прикладні аспекти побудови програмних систем (ТААПСД'15): Праці XII Міжнародної науково-практичної конференції, 23-26 листопада 2015 р. К.: Національний університет «Києво-Могилянська Академія», 2015. С. 65–69.
5. Єсіна М.В. Математична модель протоколу сліпого електронного підпису на еліптичних кривих / М.В. Єсіна // Прикладная радиоэлектроника. Х.: Харьковский национальный университет радиоэлектроники, 2015. Т. 14. №4. С. 300–305.
6. Нікуліщев Г.І. Протокол сліпого електронного цифрового підпису на еліптичних кривих над скінченим векторним полем / Г.І. Нікуліщев // Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2013. № 2. С. 71–76.
7. Нікуліщев Г.І. Анонімність як критерій оцінки захищеності протоколів сліпого електронного цифрового підпису / Г. І. Нікуліщев, Г.Л. Козина // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. 2012. №2. С. 59–65.
8. Бабенко М.Г. О свойстве делимости точки эллиптической кривой над конечным полем на два / М.Г. Бабенко, Е.С. Карнаухова, В. А. Кучуков // Наука. Инновации. Технологии. С.: Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета, 2013. №2. С. 53–62.

УДК 51.77

Зайцева И.В. [Zaitseva I.V.]

### ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ИССЛЕДОВАНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ САМООРГАНИЗАЦИИ РЫНКА ТРУДА

**Software implementation of research algorithm  
on stability of mathematical model  
of self-organization of the labour market**

Предложенная автором математическая модель самоорганизации рынка труда для нескольких отраслей экономики позволяют проанализировать эффективность принятия тех или иных управленческих решений и спрогнозировать вероятность развития событий на рынке труда на основании определения его устойчивого состояния. Входящие в данные модели феноменологические параметры открывают возможности исследования влияния на макроэкономические процессы ряда субъективных факторов. Разработанный программный продукт «EMPOT» является реализацией математической модели самоорганизации рынка труда.

The proposed by author mathematical model of the self-organization of the labor market for a few of industries enable us to analyze the effectiveness of the adoption of certain management decisions and predict the probability of developments in the labor market on the basis of determination of its stable state. Phenomenological parameters included in this model open the possibility of studying the influence on macroeconomic processes of a number of subjective factors. The developed software product «EMPOT» is the realization of a mathematical model of self-organization of the labor market.

**Ключевые слова:** математическая модель, система дифференциальных уравнений, рынок труда, устойчивость, программа «EMPOT».

**Key words:** mathematical model, the system of differential equations, the labor market, the stability, program «EMPOT».

**Введение.** Новые тенденции и закономерности развития, проблемы и противоречия, сопровождающие становление современного рынка труда, требуют всестороннего изучения. Моделирование рынка труда позволяет предотвратить будущие структурные дисбалансы в сфере труда, поддерживать соответствие спроса и предложения рабочей силы, прогнозировать занятость населения, как на ближайшее будущее, так и на некоторую отдаленную перспективу.

Целью математического моделирования рынка труда является получение объективных данных, позволяющих в какой-то мере обеспечить повышение эффективности его функционирования. Создание моделей рынка труда обеспечивает выбор стратегии управления в сфере занятости, учитывая при этом особенности экономического развития, состава трудоспособного

населения, политической ситуации, приоритетов социального развития. Моделирование рынка труда дает возможность объективно оценить его текущее состояние и тенденции изменения, а также принимать обоснованные управленческие решения в сфере трудоустройства и эффективного использования человеческих ресурсов. На основе качественной математической модели рынка труда, возможно: создание информационной базы и системы мониторинга рынка труда; определение различных параметров рынка труда; предоставление заинтересованным службам информации для анализа и прогнозирования конъюнктуры рынка труда и тенденций ее изменения; анализ потребителей рабочей силы; определение наиболее предпочтительных, пользующихся спросом на данный момент специалистов; анализ распределения и перераспределения рабочей силы в аспекте дальнейшего использования по отраслям экономики; анализ имеющейся системы стимулирования занятости для формирования политики занятости; прогнозирование рынка рабочей силы, числа рабочих мест и потребностей в них, а также уровня и структуры занятости населения, его миграции.

Рынок труда в отличие от других типов рынков обладает свойством устойчивости. Однако исследование рынка труда в условиях рыночной экономики на предмет устойчивости, анализ деятельности биржи труда как составной части функционально-организационной структуры рынка труда, использование этих исследований при формировании социальной политики являются недостаточно изученными на сегодняшний день [4].

**Материалы и методы исследований.** Приведем алгоритм исследования на устойчивость математической модели самоорганизации рынка труда представленной для двух отраслей экономики в работе [1] и в работе [2] для нескольких отраслей экономики, которая в матричном виде записывается следующим образом:

$$\dot{N}(t) = WN(t). \quad (1)$$

Для исследования на устойчивость системы дифференциальных уравнений, описывающей динамику перераспределения рабочей силы в  $n$  различных отраслях экономики, необходимо: 1) записать систему дифференциальных уравнений, описывающую динамику перераспределения рабочей силы для нескольких различных отраслей экономики; 2) составить матрицу  $W$  коэффициентов системы дифференциальных уравнений, введя конкретные значения вероятностей  $W_1^{(i,j)}$ ,  $W_2^{(i)}$   $i, j = 1, \dots, n$ ; 3) составить характеристическое уравнение  $\det(W - \lambda I) = 0$  для полученной матрицы коэффициентов  $W$ ; 4) составить матрицу Гурвица для характеристического уравнения матрицы коэффициентов  $W$ ; 5) вычислить диагональные миноры для полученной матрицы Гурвица; 6) сделать вывод об устойчивости системы дифференциальных уравнений.

Указанная методика реализована в виде программного продукта «EMROT». Рассмотрим интерфейс и алгоритм указанной программы (рис. 1).

В правом верхнем углу располагается текстовое поле для ввода об-

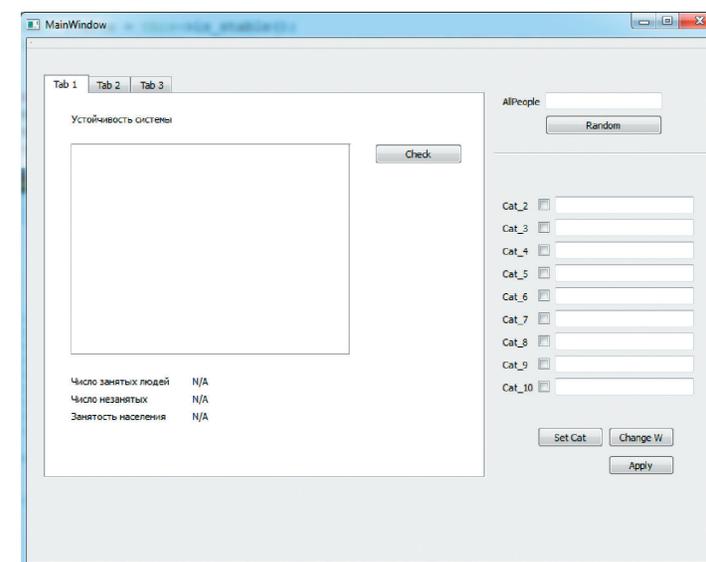


Рис. 1.

Интерфейс программы «EMROT».

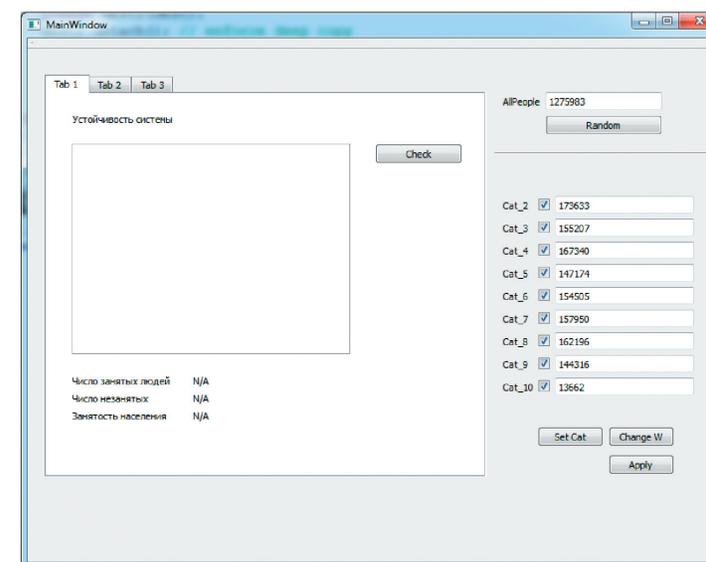


Рис. 2.

Ввод данных о численности населения по возрастным категориям.

щей численности населения, которое исследуется с помощью математической модели. Значения доступны в промежутке от 200 до 1500000. Для автоматического распределения всего населения по возрастным категориям служит пиктограмма «Random» (рис. 2). Количество людей в каждой категории может быть также задано и вручную.

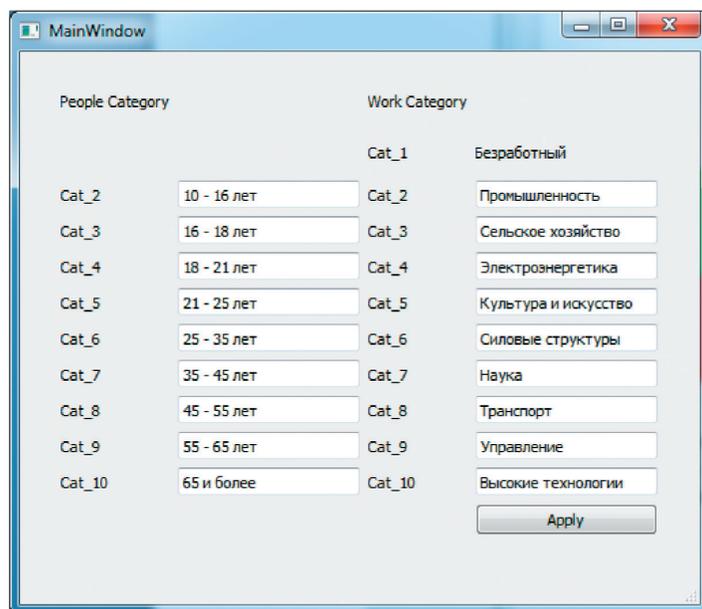


Рис. 3. Пиктограмма «SetCat» для изменения названия категории.

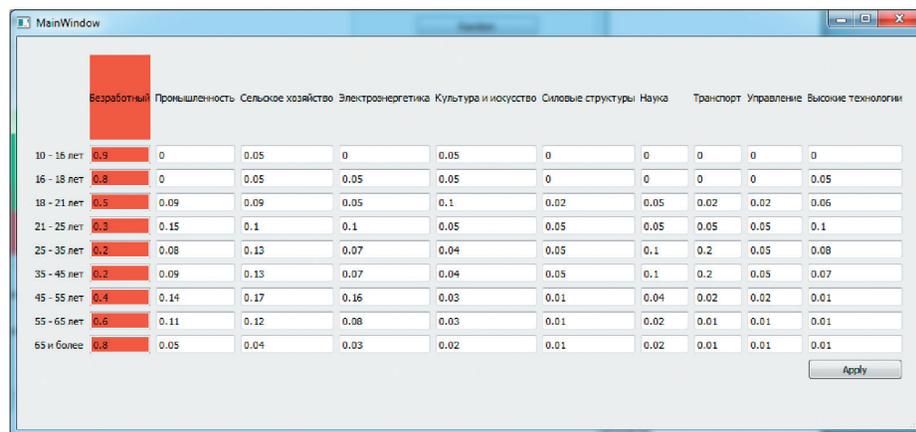


Рис. 4. Пиктограмма «ChangeW» для изменения матрицы весов.

Пиктограммы «SetCat» и «ChangeW» служат для изменения названия категории по умолчанию и изменения матрицы весов соответственно (рис. 3–4). Значения в матрице весов можно изменять с учетом того, что сумма вероятностей в каждой строке должна быть равной единице. После того, как заданы названия категорий и инициализированы значения матрицы весов становится возможной работа с пиктограммой «Apply».

При ручном распределении по категориям может появиться ошибка, связанная с расхождением между суммой количества людей в каждой категории и общим числом людей, указанным в верхнем правом углу. В таком случае на центральной панели появится сообщение с указанием расхождения, которое можно устранить путем перераспределения людей по категориям.

На рисунке 5 приведен пример, демонстрирующий ситуацию с неверным распределением. Знак минус на рисунке 5 свидетельствует о том, что сумма количества людей во всех возрастных категориях больше общего количества людей.

При отсутствии ошибок во входных данных для математической модели на центральной панели появится графическое представление распределения по категориям (рис. 6).

Нажатие на пиктограмму «Check» запускает алгоритм проверки введенных данных на устойчивость в соответствии с предложенным алгоритмом и выводит результат (рис. 7).

Надпись «Not Stable» означает, что предложенная модель распределения рабочей силы не является устойчивой. В случае, когда исследуемая система окажется устойчивой, появится надпись «Stable».

Занятость населения в рассматриваемой модели вычисляется функцией:

```

for(int j = 1; j < this->weight_matrix.getSubSize(); j++) {
    double N1 = 0, N2 = 0;
    for( int i = 0; i < this->peopleCategory.size(); i++) {
        double var = this->weight_matrix.getElement(i, j);
        N1 += double( this->peopleCategory[i] ) *
        this->weight_matrix.getElement(i, j);
        N2 += double( this->peopleCategory[i] ) *
        this->weight_matrix.getElement(i, 0) * this->weight_matrix.
getElement(i, j);
    }
    N1Vector.push_back( N1 );
    N2Vector.push_back( N2 );
}

```

Здесь `weight_matrix` – матрица весовых коэффициентов, `peopleCategory` – распределение населения по категориям, `N1` – количество людей, задействованных в текущий момент времени в отрасли `j`, `N2` – количество людей, которые могут работать в текущий момент времени в отрасли `j`, при условии появления рабочего места, которые на текущий

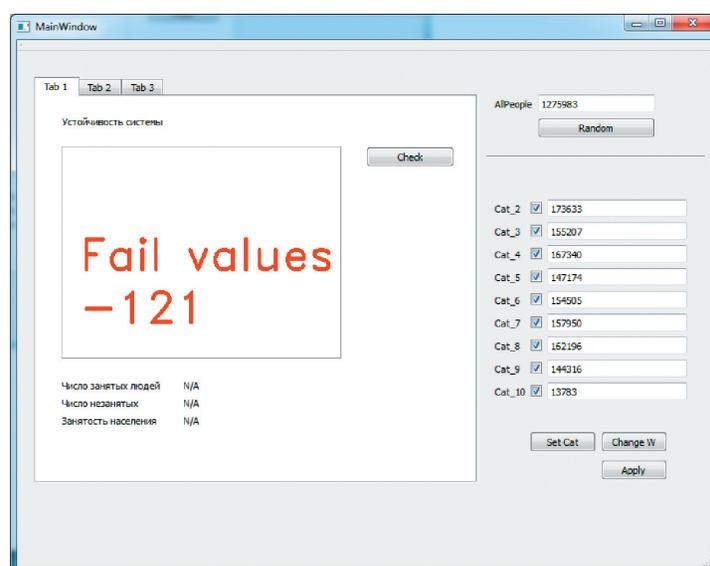


Рис. 5. Диалоговое окно программы с неверным распределением численности населения.

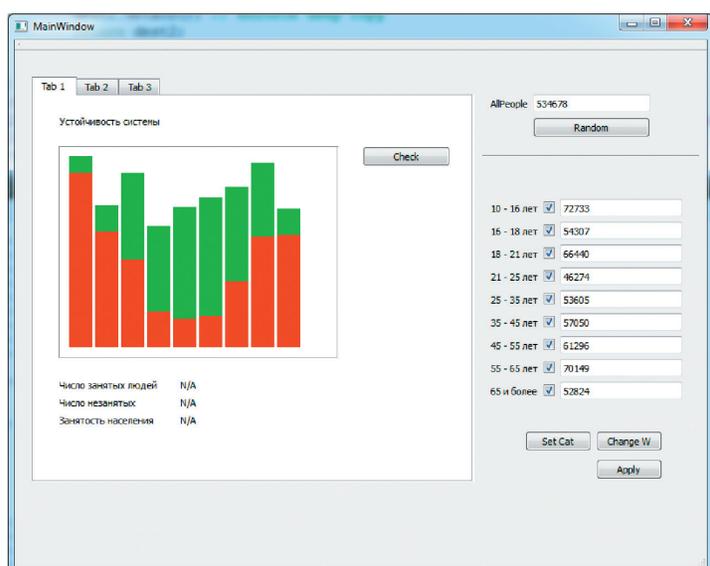


Рис. 6. Графическое представление распределения по категориям.

момент являются безработными. Совокупность всех  $N1$  и  $N2$  по всем отраслям дают общую занятость населения в трудовом процессе:

```
int allN1 = 0, allN2 = 0;
for( size_t i = 0; i < N1Vector.size(); i++ ) {
    allN1 += N1Vector[i];
    allN2 += N2Vector[i];
}
int allPeople = 0;
for( size_t i = 0; i < people.size(); i++ ) {
    allPeople += people[i];
}
```

$allN1$  – общее количество занятых во всех отраслях;  
 $allN2$  – общее количество безработных, которые могут работать во всех отраслях;  
 $double(allN1 + allN2) / double(allPeople) * 100$  – процентное значение заинтересованности населения в трудовом процессе.

#### Результаты исследований и их обсуждение

Моделированию и исследованию устойчивости рынка труда в настоящее время посвящено значительное число работ. Методологический подход к моделированию рынка труда, позволяющий эффективно решать задачи его устойчивости, заложен в работе А.Н. Васильева [3], где представлена одноотраслевая экономика. Модель А.Н. Васильева была записана для нескольких отраслей и в работах [1, 2] проанализирована ее устойчивость. Однако отсутствие программной реализации делает достаточно сложным практическое применение модели для решения задач устойчивости, сохраняя теоретическую актуальность разработанного синергетического подхода к моделированию.

С экономической точки зрения устойчивость системы (1) означает, что в соответствии с исходным уровнем занятости при небольших отклонениях от начального состояния система с течением времени возвратится опять в начальное состояние. Если же задача является неустойчивой, то даже небольшие отклонения (1) обязательно приведут к другому соотношению числа безработных и занятых на производстве в нескольких отраслях экономики. Если система находится в окрестности устойчивой стационарной точки, то имеет место снижение темпов роста безработицы. В противном случае – темпы роста безработицы прогрессируют.

Проанализировав полученные сведения об устойчивых и неустойчивых состояниях рынка труда для  $n$  различных отраслей экономики вполне возможно составить прогноз. Полученный прогноз позволит избежать кризисных состояний на рынке труда. Разработанный программный продукт «EMROT» позволяет автоматизировать процесс определения устойчивого состояния рынка труда, чем облегчает вычислительный процесс.

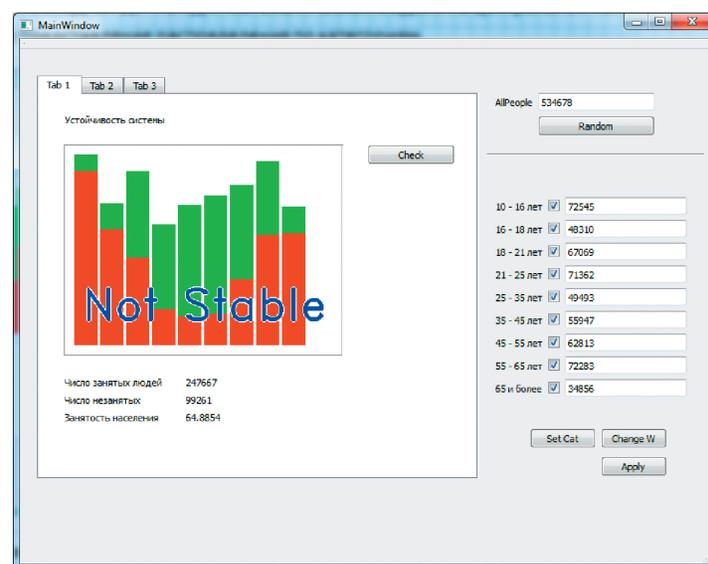


Рис. 7. Результат моделирования.

### Выводы

В работе предложен вариант решения важной социально-экономической задачи, связанной с обеспечением устойчивого функционирования рынка труда, с помощью программного продукта «EMROT». Рынок формализуется в виде модели самоорганизации, представляющей собой систему обыкновенных линейных дифференциальных уравнений, записанных в нормальной форме Коши. На основании полученных сведений об устойчивости системы дифференциальных уравнений можно судить о состоянии рынка труда.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенчин Е.А., Зайцева И.В. Математическая модель самоорганизации рынка труда для двух отраслей экономики // Экономика и математические методы. № 40(2). 2004. С. 137–139.
2. Семенчин Е.А., Зайцева И.В. Математическая модель самоорганизации рынка труда для нескольких отраслей // Обзорные прикладной и промышленной математики. № 10(3). 2003. С. 740–741.
3. Васильев А.Н. Модель самоорганизации рынка труда // Экономика и математические методы. 2001. Том 37. № 2. С. 123–127.
4. Пritула Т.К. Исследование устойчивости четырехвидовой модели взаимодействия приведением к системам двух уравнений // Наука. Инновации. Технологии. 2014. № 3. С. 17–24.

## АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ МОДУЛЯРНЫХ ЧИСЕЛ В АРИФМЕТИКЕ С ПЛАВАЮЩЕЙ ТОЧКОЙ\*

### Algorithms for estimating modular numbers in floating-point arithmetic

В системе остаточных классов (СОК) операции сложения, вычитания и умножения выполняются параллельно по различным цифрам (остаткам) модулярных чисел. Благодаря этому СОК используется для получения максимальной производительности во многих приложениях высокоскоростной компьютерной арифметики. Однако, СОК имеет свои недостатки, особенно в отношении таких вопросов, как оценка величины модулярных чисел. Традиционные техники для оценки величины в СОК, которые основаны на китайской теореме об остатках или преобразовании к системе со смешанными основаниями, приводят к довольно медленным и неэффективным реализациям. Для того, чтобы решить эту проблему был предложен метод интервально-позиционных характеристик (ИПХ). В данной работе рассматриваются прямые и пошаговые алгоритмы вычисления ИПХ в арифметике с плавающей точкой фиксированной разрядности. Для каждого из алгоритмов оценивается сложность (в терминах элементарных арифметических операций) и точность.

In the residue number system (RNS), the operations of addition, subtraction, and multiplication are executed in parallel for different digits (residues) of the modular numbers. Therefore, RNS is used for reaching the maximum performance in many high-speed computer arithmetic applications. However, RNS has disadvantages, especially in issues like estimating the magnitudes of modular numbers. Traditional methods for estimating the magnitudes in RNS that are based on the Chinese remainder theorem, or on the Mixed-Radix Conversion, result in rather slow and inefficient implementation. For solving this problem, the interval floating-point characteristic (IFC) method was proposed. This paper describes direct and stepwise algorithms for IFC computation in fixed-precision floating-point arithmetic. Time complexity (in terms of the elementary arithmetic operations) and accuracy are assessed for each algorithm.

**Ключевые слова:** система остаточных классов, оценка величины, точность, высокая производительность, алгоритмы.

**Key words:** residue number system, magnitude estimation, accuracy, high performance, algorithms.

### Введение

Система остаточных классов (СОК) [1–3], являющаяся непозиционной альтернативой двоичному представлению чисел, популярна во многих приложениях высокоскоростной компьютерной арифметики, таких как цифровая обработка сигналов [4], криптография [5], обнаружение и исправление многократных ошибок кодирования [6, 7]. СОК задается набором попарно взаимно простых модулей  $\{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ . Динамический диапазон определяется произведением  $M = \prod_{i=1}^n m_i$ . Любое целое  $X$  от 0 до  $M - 1$  представляется в СОК своими остатками (вычетами) от деления

\* Работа подготовлена в рамках II Международной конференции «Параллельная компьютерная алгебра и ее приложения в новых инфокоммуникационных системах».

на модули, т. е.  $n$ -кортежем  $\langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ , где  $x_i \equiv X \pmod{m_i}$  или, то же самое,  $x_i = |X|_{m_i}$ . Уникальность такого представления обеспечивается китайской теоремой об остатках [3], на основе которой определяется традиционный способ восстановления двоичной формы числа:

$$X = \left| \sum_{i=1}^n x_i |M_i^{-1}|_{m_i} M_i \right|_M, \quad (1)$$

где  $M_i = M/m_i$ , а  $|M_i^{-1}|_{m_i}$  – мультипликативная инверсия  $M_i$  по отношению к  $m_i$ .

В СОК такие операции как сложение и умножение выполняются параллельно по остаткам операндов:

$$Z = X \text{ op } Y \rightarrow \begin{cases} z_1 = |x_1 \text{ op } y_1|_{m_1}, \\ z_2 = |x_2 \text{ op } y_2|_{m_2}, \\ \dots \dots \dots \\ z_n = |x_n \text{ op } y_n|_{m_n}. \end{cases}$$

В результате трудоемкие операции над числами большой ( $\log_2 M$ ) разрядности эффективно разбиваются на группы малоразрядных ( $\log_2 m_i$ ) операций над остатками, выполняемых параллельно. Это делает весьма привлекательными методы многоразрядной арифметики на основе СОК. Однако они имеют свои недостатки, особенно в отношении таких операций, как сравнение, определение знака, контроль переполнения и пр. Пусть, например, в системе с модулями 3, 5, 7 представлены числа  $X = \langle 1, 0, 6 \rangle$  и  $Y = \langle 2, 4, 0 \rangle$ , которые нужно сравнить. Классический способ сделать это состоит в вычислении двоичных представлений чисел согласно (1) с последующим их анализом. Так, после преобразования  $X = 55$ ,  $Y = 14$ , откуда  $X > Y$ . Но такой способ является затратным, так как требует выполнения сложных операций умножения и сложения больших чисел и редукции по модулю  $M$ . К числу других методов оценки величины в СОК относятся преобразование к смешанной системе (MRC) [2, 3], монотонные функции [8], контроль четности [9] и пр. Однако часто они оказываются непрактичными, так как требуют большого объема вычислений и/или хранения больших подстановочных таблиц.

Еще одним способом, позволяющим оценить величину числа, представленного в СОК, является интервальная оценка его относительной величины [10]. В этой статье рассматриваются различные алгоритмы вычисления такой оценки, выполняется анализ их быстродействия.

#### Интервальная оценка относительной величины в СОК

В основе интервальной оценки относительных величин лежит замечание, что для сравнения чисел и выполнения ряда других немодульных процедур не требуется знать точную величину операндов, а доста-

точно лишь иметь информацию о диапазонах ее изменения. Причем, чтобы исключить необходимость работы с большими числами в диапазоне  $[0, M)$ , имеет смысл оперировать масштабированными относительно  $M$  значениями [11], изменяющимися в диапазоне  $[0, 1)$ . В частности, возвращаясь к рассмотренному выше примеру, для сравнения  $X$  и  $Y$  не обязательно восстанавливать их двоичные представления. Достаточно, к примеру, достоверно знать, что  $X/M$  находится в интервале от 0,5 до 0,7, а  $Y/M$  – в интервале от 0,1 до 0,3. Тогда можно с уверенностью сказать, что  $X > Y$ .

Подобную информацию дает интервально-позиционная характеристика (ИПХ, англ. IFC – Interval Floating-Point Characteristic)  $I(X/M) = [X/M, \bar{X}/M]$ , которая для заданного  $X$  представляет собой интервальную функцию от остатков  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , в общем случае удовлетворяющую неравенствам  $X/M \leq X/M \leq \bar{X}/M$ . Вопросы применения ИПХ для немодульных вычислений рассмотрены в [10].

Границы ИПХ хранятся в виде чисел с плавающей точкой фиксированной точности (разрядности) и вычисляются с использованием направленных округлений:  $X/M$  – с округлением вниз (toward  $-\infty$ ),  $\bar{X}/M$  – с округлением вверх (toward  $+\infty$ ). Направленные округления обеспечивают автоматический учет погрешностей, что позволяет контролировать корректность результатов немодульных операций путем анализа специальных условий, исключающих ситуации, когда точности  $I(X/M)$  недостаточно для однозначной оценки  $X/M$ . Погрешности ИПХ отражаются в ее диаметре

$$\text{diam } I(X/M) = \bar{X}/M - X/M. \quad (2)$$

Чем меньше диаметр (2), тем точнее  $I(X/M)$  локализует  $X/M$ . Другой, в ряде случаев более удобной, мерой точности ИПХ является ее относительная ошибка

$$\delta I(X/M) = \frac{\text{diam } I(X/M)}{X/M}. \quad (3)$$

От быстродействия и точности вычисления ИПХ зависит эффективность сравнения чисел в СОК и других связанных операций.

Далее для операций, выполняемых с округлением вниз и вверх, будут использоваться нотации  $\text{RD}()$  и  $\text{RU}()$ , соответственно. Предполагается, что границы ИПХ представлены двоичными числами с плавающей точкой. Точность (разрядность) границ ИПХ строго фиксирована и составляет  $k$  бит. Все вычисления, кроме целочисленных модулярных операций, выполняются в  $k$ -битной двоичной арифметике с плавающей точкой. Будем полагать, что такая арифметика обладает следующим свойством [12]: для любой элементарной операции  $\text{op} \in \{+, -, \times, \div\}$ , для любого направленного режима округления  $\circ \in \{\text{RD}, \text{RU}\}$  и для любых чи-

сел с плавающей точкой  $a, b$ , таких, что  $a \text{ or } b$  не приводит к переполнению или потере значимости, справедливо соотношение  $\circ(a \text{ or } b) = (a \text{ or } b)(1 + \delta)$ , где  $|\delta| \leq \mathbf{u}$ ,  $\mathbf{u} = 2^{1-k}$ .

### Прямые алгоритмы вычисления ИПХ

Разделив обе части выражения (1) на  $M$  и применив направленные округления, получим следующие выражения для границ ИПХ:

$$\underline{X/M} = \left\lfloor \text{RD} \left( \frac{\sum_{i=1}^n |x_i| M_i^{-1} |m_i| m_i}{m_i} \right) \right\rfloor, \quad (4)$$

$$\overline{X/M} = \left\lceil \text{RU} \left( \frac{\sum_{i=1}^n |x_i| M_i^{-1} |m_i| m_i}{m_i} \right) \right\rceil. \quad (5)$$

На рис. 1 представлен прямой алгоритм вычисления ИПХ на основе (4) и (5). В этом алгоритме  $r_{\text{low}}(X)$  и  $r_{\text{upp}}(X)$  представляют собой значения ранга числа  $X$ , соответствующие нижней и верхней границам ИПХ. Если они равны, то ИПХ является корректной. В противном случае выполняется процедура Adjust, которая анализирует причины вычисления некорректной ИПХ и «исправляет» одну из границ. Если модулярные числа распределены равномерно в диапазоне, то вероятность того, что  $r_{\text{low}}(X) \neq r_{\text{upp}}(X)$  на шаге 12, крайне мала. Кроме этого, данная процедура одинакова для всех представленных в данной работе алгоритмов. Поэтому она не принимается в расчет при сравнении эффективности алгоритмов.

Последовательная реализация алгоритма 1 требует выполнения  $7n$  элементарных операций фиксированной точности ( $n$  целочисленных умножений,  $n$  целочисленных делений с остатком для вычисления пар  $(s, c)$ ,  $n$  целочисленных сложений для вычисления  $h$  и  $4n$  операций с плавающей точкой для нахождения  $s_{\text{low}}$  и  $s_{\text{upp}}$ ). Однако, пары  $(s, c)$  могут быть вычислены параллельно для всех  $i$ ,  $1 \leq i \leq n$ , а для вычисления  $h$ ,  $s_{\text{low}}$  и  $s_{\text{upp}}$  может быть использована каскадная схема суммирования. В этом случае для вычисления ИПХ потребуется, с точностью до константы,  $3 \log_2 n$  элементарных операций.

Используя в отношении алгоритма 1 прямой анализ ошибок округления, с учетом определенных выше свойств машинной арифметики, получим следующую границу диаметра (2):

$$\text{diam } I(X/M) < n^2 2^{1-k}. \quad (6)$$

Улучшить границу (6) возможно путем применения компенсационного метода суммирования (Kahan summation formula) для вычисления  $s_{\text{low}}$  и  $s_{\text{upp}}$  [13, 14]. Данный метод значительно уменьшает вычислительную погрешность по сравнению с наивным подходом. Уменьше-

**Алгоритм 1.** Input:  $X = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ . Output:  $I(X/M) = [\underline{X/M}, \overline{X/M}]$ .

```

1:  $s_{\text{low}} \leftarrow s_{\text{upp}} \leftarrow h \leftarrow 0$ 
2: for  $i \leftarrow 1$  to  $n$  do
3:    $(s, c) \leftarrow \left( |x_i| M_i^{-1} |m_i| m_i, \left\lfloor \frac{|x_i| M_i^{-1} |m_i|}{m_i} \right\rfloor \right)$ 
4:    $h \leftarrow h + c$ 
5:    $s_{\text{low}} \leftarrow \text{RD}(s_{\text{low}} + \text{RD}(s/m_i))$ 
6:    $s_{\text{upp}} \leftarrow \text{RU}(s_{\text{upp}} + \text{RU}(s/m_i))$ 
7: end for
8:  $r_{\text{low}}(X) \leftarrow \lfloor s_{\text{low}} \rfloor + h$ 
9:  $r_{\text{upp}}(X) \leftarrow \lfloor s_{\text{upp}} \rfloor + h$ 
10:  $\underline{X/M} \leftarrow \lfloor s_{\text{low}} \rfloor_1$ 
11:  $\overline{X/M} \leftarrow \lfloor s_{\text{upp}} \rfloor_1$ 
12: if  $r_{\text{low}}(X) \neq r_{\text{upp}}(X)$  then
13:    $\text{ADJUST}(\underline{X/M}, \overline{X/M})$ 
14: end if
15: return  $\underline{X/M}, \overline{X/M}$ 

```

Рис. 1. Прямой алгоритм вычисления ИПХ.

ние погрешности достигается введением дополнительной переменной для хранения нарастающей суммы погрешностей. При этом погрешность результирующей суммы не зависит от числа слагаемых. Алгоритм вычисления ИПХ с использованием компенсационного суммирования представлен на рис. 2.

Как показано в работе [14], компенсационное суммирование позволяет вычислить сумму  $n$  чисел  $y_1, y_2, \dots, y_n$  с абсолютной ошибкой  $E_n$ , удовлетворяющей неравенству

$$|E_n| \leq [2\mathbf{u} + O(n\mathbf{u}^2)] \times \sum_{i=1}^n |y_i|. \quad (7)$$

Поскольку  $s_{\text{low}}, s_{\text{upp}} < n$ , то, применяя (7) к алгоритму 2 и пренебрегая членами второго порядка, получим следующую оценку диаметра ИПХ:

$$\text{diam } I(X/M) < n2^{2-k}. \quad (8)$$

Таким образом, погрешность алгоритма 2 в  $n/2$  раз ниже погрешности алгоритма 1. Число операций в последовательной версии алгоритма составляет около  $14n$ . В таблице 1 приведена схема распараллеливания алгоритма 2 на примере вычисления нижней границы ИПХ для числа в четырехмодульной СОК. Общее число операций при параллельной реализации алгоритма, включая расчет  $h$ , составит около  $11 \times \log_2 n$ .

**Алгоритм 2.** Input:  $X = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ . Output:  $I(X/M) = [\underline{X/M}, \overline{X/M}]$ .

```

1:  $(s, h) \leftarrow \left( |x_1| M_1^{-1} |_{m_1} |_{m_1}, \left\lfloor \frac{x_1 |M_1^{-1}|_{m_1}}{m_1} \right\rfloor \right)$ 
2:  $s_{\text{low}} \leftarrow \text{RD}(s/m_1)$ 
3:  $s_{\text{upp}} \leftarrow \text{RU}(s/m_1)$ 
4:  $c_1 \leftarrow c_2 \leftarrow 0$ 
5: for  $i \leftarrow 2$  to  $n$  do
6:    $(s, c) \leftarrow \left( |x_i| M_i^{-1} |_{m_i} |_{m_i}, \left\lfloor \frac{x_i |M_i^{-1}|_{m_i}}{m_i} \right\rfloor \right)$ 
7:    $h \leftarrow h + c$ 
8:    $y_1 \leftarrow \text{RD}(\text{RD}(s/m_i) - c_1)$ 
9:    $z_1 \leftarrow \text{RD}(s_{\text{low}} + y_1)$ 
10:   $c_1 \leftarrow \text{RD}(\text{RD}(z_1 - s_{\text{low}}) - y_1)$ 
11:   $s_{\text{low}} \leftarrow z_1$ 
12:   $y_2 \leftarrow \text{RU}(\text{RU}(s/m_i) - c_2)$ 
13:   $z_2 \leftarrow \text{RU}(s_{\text{upp}} + y_2)$ 
14:   $c_2 \leftarrow \text{RU}(\text{RU}(z_2 - s_{\text{upp}}) - y_2)$ 
15:   $s_{\text{upp}} \leftarrow z_2$ 
16: end for
17:  $r_{\text{low}}(X) \leftarrow \lfloor s_{\text{low}} \rfloor + h$ 
18:  $r_{\text{upp}}(X) \leftarrow \lfloor s_{\text{upp}} \rfloor + h$ 
19:  $\underline{X/M} \leftarrow |s_{\text{low}}|_1$ 
20:  $\overline{X/M} \leftarrow |s_{\text{upp}}|_1$ 
21: if  $r_{\text{low}}(X) \neq r_{\text{upp}}(X)$  then
22:    $\text{ADJUST}(\underline{X/M}, \overline{X/M})$ 
23: end if
24: return  $\underline{X/M}, \overline{X/M}$ 

```

**Рис. 2.** Алгоритм вычисления ИПХ с компенсационным суммированием.

Другая модификация алгоритма 1 связана с отбрасыванием целой части на каждой итерации суммирования при вычислении  $s_{\text{low}}$  и  $s_{\text{upp}}$ . Этот подход реализуется алгоритмом 3, представленным на рис. 3. Для алгоритма 3 справедлива следующая оценка диаметра ИПХ:

$$\text{diam } I(X/M) < n2^{1-k}. \quad (9)$$

По сравнению с алгоритмом 1 погрешность уменьшается в  $n$  раз. Выполнение алгоритма 3 требует в среднем  $14n$  операций (получение целой и дробной частей числа с плавающей точкой рассматриваются как отдельные операции). При распараллеливании требуется около  $10 \log_2 n$  операций. Таким образом, временные затраты возрастают приблизительно в два и три раза (для последовательной и параллельной версий алгоритма, соответственно) по сравнению с алгоритмом 1. С точки зрения быстродействия, точности и простоты распараллеливания алгоритм 3 является предпочтительнее алгоритма 2.

Табл. 1. СХЕМА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ  $\underline{X/M}$  С КОМПЕНСАЦИОННЫМ СУММИРОВАНИЕМ

$s_1 = \text{RD}\left(\frac{x_1  M_1^{-1} _{m_1}}{m_1}\right)$	$s_2 = \text{RD}\left(\frac{x_2  M_2^{-1} _{m_2}}{m_2}\right)$	$s_3 = \text{RD}\left(\frac{x_3  M_3^{-1} _{m_3}}{m_3}\right)$	$s_4 = \text{RD}\left(\frac{x_4  M_4^{-1} _{m_4}}{m_4}\right)$
▼	▼	▼	▼
$y_1 = s_2$	$z_1 = \text{RD}(s_1 + y_1)$	$c_1 = \text{RD}((z_1 - s_1) - y_1)$	$s_1 = z_1$
			$y_3 = s_4$
			$z_3 = \text{RD}(s_3 + y_3)$
			$c_3 = \text{RD}((z_3 - s_3) - y_3)$
			$s_3 = z_3$
▼	▼		
		$y_1 = \text{RD}(s_3 - c_1 - c_3)$	
		$z_1 = \text{RD}(s_1 + y_1)$	
		$c_1 = \text{RD}((z_1 - s_1) - y_1)$	
		$s_{\text{low}} = z_1, \underline{X/M} =  s_{\text{low}} _1$	

**Алгоритм 3.** Input:  $X = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$ . Output:  $I(X/M) = [\underline{X/M}, \overline{X/M}]$ .

```

1:  $s_{\text{low}} \leftarrow s_{\text{upp}} \leftarrow r_{\text{low}}(X) \leftarrow r_{\text{upp}}(X) \leftarrow 0$ 
2: for  $i \leftarrow 1$  to  $n$  do
3:    $(s, c) \leftarrow \left( |x_i| M_i^{-1} |_{m_i} |_{m_i}, \left\lfloor \frac{x_i |M_i^{-1}|_{m_i}}{m_i} \right\rfloor \right)$ 
4:    $c_1 \leftarrow \text{RD}(s_{\text{low}} + \text{RD}(s/m_i))$ 
5:    $c_2 \leftarrow \text{RU}(s_{\text{upp}} + \text{RU}(s/m_i))$ 
6:    $s_{\text{low}} \leftarrow |c_1|_1$ 
7:    $s_{\text{upp}} \leftarrow |c_2|_1$ 
8:    $r_{\text{low}}(X) \leftarrow r_{\text{low}}(X) + \lfloor c_1 \rfloor + c$ 
9:    $r_{\text{upp}}(X) \leftarrow r_{\text{upp}}(X) + \lfloor c_2 \rfloor + c$ 
10: end for
11:  $\underline{X/M} \leftarrow s_{\text{low}}$ 
12:  $\overline{X/M} \leftarrow s_{\text{upp}}$ 
13: if  $r_{\text{low}}(X) \neq r_{\text{upp}}(X)$  then
14:    $\text{ADJUST}(\underline{X/M}, \overline{X/M})$ 
15: end if
16: return  $\underline{X/M}, \overline{X/M}$ 

```

**Рис. 3.** Алгоритм вычисления ИПХ с отбрасыванием целой части при суммировании.

**Пошаговые алгоритмы вычисления ИПХ.**

Как следует из (6), (8) и (9), при использовании прямого алгоритма и его модификаций диаметр ИПХ не пропорционален величине числа. Это является основным недостатком рассмотренных алгоритмов, так как если число  $X$ , для которого вычисляется ИПХ, мало по сравнению с  $M$ , то относительная ошибка (3) оказывается неприемлемо большой. Данного недостатка лишены рассматриваемые далее алгоритмы, в которых для достижения заданной точности вычислений используется пошаговая техника.

Пошаговый подход предполагает, что границы ИПХ представлены нормализованными двоичными числами с плавающей точкой и состоит в том, что если  $X$  слишком мало по сравнению с  $M$ , то вначале итерационно находится смещенная ИПХ – характеристика числа  $X \times 2^{v_i}$ , относительная ошибка которой не превышает заданного предела. Далее смещенная характеристика без погрешности масштабируется коэффициентом  $2^{v_i}$ , в результате чего диаметр искомой ИПХ уменьшается в  $2^{v_i}$  раз. Такая техника позволяет вычислить ИПХ с любой заданной точностью, при условии, что результат лежит в пределах нормализованного машинного диапазона. Для реализации пошагового подхода фиксируется точность  $\varepsilon < 1$ , константа  $\psi = n^2 2^{1-k} / \varepsilon < 1/4$ , рассчитываются и сохраняются в подстановочных таблицах кортеж смещений

$$\mathbf{V} = (2^{v_1}, 2^{v_2}, \dots, 2^{v_g}), \quad (10)$$

где  $v_i = \lceil \log_2(1/2^{2^i} \psi^i) \rceil$ ,  $g = \lceil -(\log_2 M + \log_2 \psi) / (2 + \log_2 \psi) \rceil$ , и матрица смещенных мультипликативных инверсий

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{g1} & s_{g2} & \cdots & s_{gn} \end{bmatrix}, \quad s_{ij} = \left\lfloor 2^{v_i} \times |M_j^{-1}|_{m_j} \right\rfloor. \quad (11)$$

Вычисления выполняются в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 4.

Шаг 1 алгоритма 4 представляет собой рассмотренный ранее прямой алгоритм. На шаге 9 проверяется достижение заданной точности. Можно доказать, что, в условиях справедливости оценки (6), если  $\overline{X/M} \geq \psi$ , то  $\delta I(X/M) < \varepsilon / (1 - \varepsilon)$ . Если требуемая точность не достигнута, то выполняется уточняющий цикл, где осуществляется подбор необходимого смещения, при котором достигается заданная точность вычислений. Способ задания кортежа (10) обеспечивает, с одной стороны, что условие завершения цикла будет выполнено, а с другой, что при вычислении смещенной верхней границы  $\overline{X_i/M}$  не произойдет переполнения вследствие цикличности диапазона, обусловленной редукцией по модулю 1. Далее,

**Алгоритм 4.** Input:  $X = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle \neq 0$ . Output:  $I(X/M)$ , для которой  $\delta I(X/M) < \varepsilon / (1 - \varepsilon)$ , где  $\varepsilon$  фиксировано.

```

1:  $(\underline{X/M}, \overline{X/M}) \leftarrow \text{STRAIGHTFORWARDIFC}(X)$  ▷ Алгоритм 1
2: if  $\overline{X/M} \geq \psi$  then
3:   return  $\underline{X/M}, \overline{X/M}$ 
4: end if
5:  $i \leftarrow 0$ 
6: repeat
7:    $i \leftarrow i + 1$ 
8:    $\overline{X_i/M} \leftarrow \left\lfloor \text{RU} \left( \sum_{j=1}^n \text{RU}(|x_j s_{ij}|_{m_j} / m_j) \right) \right\rfloor_1$ 
9:   until  $\overline{X_i/M} \geq \psi$ 
10:   $\underline{X_i/M} \leftarrow \left\lfloor \text{RD} \left( \sum_{j=1}^n \text{RD}(|x_j s_{ij}|_{m_j} / m_j) \right) \right\rfloor_1$ 
11:   $\underline{X/M} \leftarrow \underline{X_i/M} / 2^{v_i}$ 
12:   $\overline{X/M} \leftarrow \overline{X_i/M} / 2^{v_i}$ 
13: return  $\underline{X/M}, \overline{X/M}$ 

```

**Рис. 4.** Пошаговый алгоритм вычисления ИПХ с заданной точностью.

после отбрасывания целых частей сумм, границы смещенной ИПХ масштабируются  $i$ -м элементом кортежа  $V - 2^{v_i}$ . В арифметике с плавающей точкой операция деления на степень двойки выполняется посредством изменения значения порядка (экспоненты) делимого, без модификации его мантииссы, поэтому не приводит к увеличению относительной ошибки.

Если выполнение уточняющих итераций не требуется, то алгоритм 4 обладает такой же вычислительной сложностью, что и алгоритм 1, т.е. требует в среднем  $7n$  и  $\log_2 n$  операций, при последовательной реализации и при распараллеливании на  $n$  потоков, соответственно, предполагая, что  $r_{\text{low}}(X) = r_{\text{upp}}(X)$  на шаге 12 алгоритма 1.

При максимальном числе уточняющих итераций дополнительно потребуется выполнить, соответственно,  $3n(g+1)$  и  $\log_2 n(g+1)$  элементарных операций при после-

**Алгоритм 5.** Input:  $X = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle \neq 0$ . Output:  $I(X/M)$ , для которой  $\delta I(X/M) < \varepsilon/(1 - \varepsilon)$ , где  $\varepsilon$  фиксировано.

```

1:  $(\underline{X/M}, \overline{X/M}) \leftarrow \text{STRAIGHTFORWARDIFC}(X)$            ▷ Алгоритм 1
2: for all  $1 \leq i \leq g$  in parallel do
3:    $\overline{X_i/M} \leftarrow \left| \text{RU} \left( \sum_{j=1}^n \text{RU}(|x_j s_{ij}|_{m_j} / m_j) \right) \right|_1$ 
4:    $p_i \leftarrow (\overline{X_i/M} \geq \psi) ? 1 : 0$ 
5: end for
6: Выбрать  $i$  и  $\overline{X_i/M}$  соответствующие первому  $p_i = 1$ 
7:  $\underline{X_i/M} \leftarrow \left| \text{RD} \left( \sum_{j=1}^n \text{RD}(|x_j s_{ij}|_{m_j} / m_j) \right) \right|_1$ 
8:  $\underline{X/M} \leftarrow \underline{X_i/M} / 2^{v_i}$ 
9:  $\overline{X/M} \leftarrow \overline{X_i/M} / 2^{v_i}$ 
10: return  $\underline{X/M}, \overline{X/M}$ 

```

**Рис. 5.** Параллельный алгоритм вычисления ИПХ с заданной точностью.

довательных вычислениях и при использовании каскадной схемы суммирования для расчета  $\overline{X_i/M}$  и  $\underline{X_i/M}$ .

Стоит заметить, что все итерации уточняющего цикла могут быть выполнены параллельно, с формированием и последующим анализом признаков достижения заданной точности. Параллельная версия алгоритма представлена на рис. 5.

При максимальном числе уточняющих итераций для выполнения алгоритма 5 с распараллеливанием уточняющего цикла на  $g$  потоков потребуется приблизительно  $13n$  операций. Если дополнительно распараллеливать вычисления по модулям СОК при подсчете сумм в алгоритме 1 и на шагах 3 и 7 алгоритма 5, то потребуется около  $5 \log_2 n$  операций. При такой полностью параллельной реализации алгоритма необходимо, чтобы устройство позволяло запускать  $n \times g$  потоков, выполняющихся одновременно.

Отметим, что в пошаговых алгоритмах могут быть применены рассмотренные ранее методы уменьшения

погрешностей при суммировании, что позволит уменьшить величину  $g$  и снизить количество уточняющих итераций. Однако при этом увеличивается сложность каждой итерации. Поэтому такой подход видится нецелесообразным, во всяком случае, для алгоритма 5.

### Идентификация причин вычисления некорректной ИПХ

На шаге 12 алгоритма 1, лежащего в основе всех остальных алгоритмов, выполняется проверка равенства  $r_{\text{low}}(X)$  и  $r_{\text{upp}}(X)$ , и если эти числа не равны, то ИПХ является “некорректной”. При этом выполняется процедура Adjust. Эта процедура в общем случае может быть реализована следующим образом:

*Шаг 1.* Вычисляется истинный ранг числа  $r(X)$ .

*Шаг 2.* Числа  $r_{\text{low}}(X)$  и  $r_{\text{upp}}(X)$  сравниваются с  $r(X)$  и выполняется корректировка одной из границ ИПХ по следующим правилам:

- Если  $r(X) = r_{\text{low}}(X)$ , то некорректно вычислена верхняя граница  $\overline{X/M}$ . В этом случае следует принять  $\overline{X/M} = \frac{M-1}{M}$ , где  $\frac{M-1}{M}$  – заранее вычисленная с высокой точностью константа, такая, что  $\frac{M-1}{M} \leq \frac{M-1}{M}$ .
- Если  $r(X) = r_{\text{upp}}(X)$ , то некорректно вычислена нижняя граница  $\underline{X/M}$ . В этом случае следует принять  $\underline{X/M} = \frac{1}{M}$ , где  $\frac{1}{M}$  – заранее вычисленная с высокой точностью константа, такая, что  $\frac{1}{M} \geq \frac{1}{M}$ .

Легко доказать, что, если  $r_{\text{low}}(X) \neq r_{\text{upp}}(X)$ , то один из приведенных случаев будет иметь место. Для вычисления  $r(X)$  может быть использована техника, основанная на теореме о ранге суммы [1]. При использовании подстановочных таблиц сравнительно небольшого размера эта техника позволяет вычислить  $r(X)$  за  $n$  итераций, на каждой из которых выполняются только целочисленные операции небольшого размера.

В заключение, приведем другие способы разрешения проблемы вычисления некорректной ИПХ:

*Способ 1* (редукция модулярного диапазона). Если ограничить диапазон возможных значений чисел так, чтобы гарантировать, что  $\overline{X/M}$  вычисляется корректно (не происходит переполнения вследствие цикличности диапазона, обусловленной редукцией по модулю 1), то проверка корректности ИПХ (равенства  $r_{\text{low}}(X)$  и  $r_{\text{upp}}(X)$ ) может быть исключена. Это позволит получить корректный ре-

зультат при вычислении ИПХ даже для очень малых чисел в СОК, избежав дополнительных накладных затрат.

*Способ 2* (использование избыточного модуля). Может быть использован один избыточный модуль  $m_{n+1}$  небольшого размера. Избыточный вычет  $x_{n+1}$  должен обрабатываться также как и все остальные вычеты. Тогда, если  $r_{\text{low}}(X) \neq r_{\text{upp}}(X)$ , то необходимо вычислить смещенную ИПХ  $I(X/E)$ , характеризующую величину числа  $X$  в расширенном наборе модулей  $\{m_1, m_2, \dots, m_{n+1}\}$  с диапазоном  $E = \prod_{i=1}^{n+1} m_i$ . Если для  $I(X/E)$  равенство  $r_{\text{low}}(X) = r_{\text{upp}}(X)$  по-прежнему не выполняется, то  $X$  – маленькое число, локализованное вблизи нуля, то есть, некорректно вычислена нижняя граница  $X/M$ . Если вышеуказанное равенство выполняется, то либо  $X$  располагается вблизи  $M$ , либо,  $X$  – маленькое число, но за счет меньшей погрешности  $I(X/E)$  вычислена корректно. В любом из двух последних случаев искомая корректная ИПХ  $I(X/M)$  вычисляется из  $I(X/E)$  делением границ на избыточный модуль.

### Выводы

Все рассмотренные варианты вычисления интервально-позиционной характеристики чисел, представленных в СОК, требуют выполнения только целочисленных операций по модулям  $m_i$  и операций с плавающей точкой фиксированной разрядности. Они могут быть легко реализованы на устройствах, поддерживающих стандартную двоичную арифметику с плавающей точкой, как программным способом, так и аппаратно.

При работе в больших динамических диапазонах предпочтительными являются пошаговые алгоритмы, так как они, в отличие от прямых, позволяют получить результат с заданной точностью вне зависимости от величины входных данных. Если числа распределены равномерно в диапазоне СОК, то выполнение уточняющих итераций потребуется лишь в редких случаях, поэтому в среднем быстродействие пошаговых алгоритмов сравнимо с быстродействием прямых алгоритмов. Полностью параллельная реализация пошаговой техники на  $n \times g$  потоках даже при максимальном числе уточняющих итераций обладает сложностью  $O(\log_2 n)$ , что на порядок меньше по сравнению с традиционными методами оценки величины в СОК, например, МРС. Полностью параллельную реализацию целесообразно применять на вычислительных архитектурах, обладающих большими возможностями параллельной обработки, таких как современные GPU и FPGA.

Рассмотрены различные варианты разрешения неоднозначных ситуаций, которые могут возникнуть при вычислении ИПХ. Для большинства практических случаев, по крайней мере, при равномерном распределении модулярных чисел в динамическом диапазоне, вычисленная ИПХ будет корректной (равенство  $r_{\text{low}}(X) = r_{\text{upp}}(X)$  будет выполняться) и ее корректировка не потребует. Поэтому общий вариант, основанный на вычислении функции ранга модулярного числа, характеризующийся сложностью  $O(n)$ , кажется вполне приемлемым. Он не накладывает ограничений на диапазон СОК и не требует использования избыточных модулей.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-60003 мол\_а\_дк.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. Машинная арифметика в остаточных классах. М.: Сов. радио, 1968.
2. Szabo N.S., Tanaka R.I. Residue Arithmetic and its Application to Computer Technology. New York: McGraw-Hill, 1967.
3. Parhami B. Computer Arithmetic: Algorithms and Hardware Designs. New York: Oxford Univ. Press, 2000.
4. Albicocco P., Cardarilli G.C., Nannarelli A., Re M. Twenty years of research on RNS for DSP: Lessons learned and future perspectives // Proceedings of the 2014 International Symposium on Integrated Circuits (ISIC). Singapore, 2014. P. 436–439.
5. Esmaeildoust M., Schinianakis D., Javashi H., Stouraitis T., Navi K. Efficient RNS implementation of elliptic curve point multiplication over  $GF(p)$  // IEEE Trans. VLSI Syst. 2013. Vol. 21. № 8. P. 1545–1549.
6. Goh V.T., Siddiqi M.U. Multiple error detection and correction based on redundant residue number systems // IEEE Trans. Commun. 2008. Vol. 56. № 3. P. 325–330.

7. Червяков Н.И., Нагорнов Н.Н. Коррекция ошибок при передаче и обработке информации, представленной в СОК, методом синдромного декодирования // Наука. Инновации. Технологии. 2015. № 2. С. 15–40.
8. Dimauro G., Impedovo S., Pirlo G. A new technique for fast number comparison in the residue number system // IEEE Trans. Comput. 1993. Vol. 42. № 5. P. 608–612.
9. Yang J.-H., Chang C.-C., Chen C.-Y. A high-speed division algorithm in residue number system using parity-checking technique // International Journal of Computer Mathematics. 2004. Vol. 81. №6. P. 775–780.
10. Князьков В.С., Исупов К.С. Немодульные вычисления в системах остаточных классов с интервально-позиционными характеристиками / ВятГУ. Киров, 2015. 92 с. Библиогр. 54 назв. Деп. в ВИНТИ РАН 26.03.2015, № 61-B2015.
11. Hung C.Y., Parhami B. An approximate sign detection method for residue numbers and its application to RNS division // Computers & Mathematics with Applications. 1994. Vol. 27. № 4. P. 23–35.
12. Muller J.-M., Brisebarre N., de Dinechin F., Jeannerod C.-P., Lefèvre V., Melquiond G., Revol N., Stehlé D., Torres S. Handbook of Floating-Point Arithmetic. Boston: Birkhäuser, 2010.
13. Goldberg D. What Every Computer Scientist Should Know About Floating-Point Arithmetic // ACM Computing Surveys. 1991. Vol. 23. №. 1. P. 5–48.
14. Higham N.J. The accuracy of floating point summation // SIAM Journal on Scientific Computing. 1993. Vol. 14. № 4. P. 783–799.

УДК 621.395.7

Лавровская Т.В. [Lavrovskaya T.V.],  
Рассомахин С.Г. [Rassomakhin S.G.],  
Малофей А.О. [Malofeyev A.O.]

## АНАЛИЗ МЕТОДА ЛИНЕЙНОГО ЦЕЛОЧИСЛЕННОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ КОДОВ\*

### Methods of analysis of linear integer decoding pseudo-random codes

Научно-технический и социально-экономический прогресс в корне изменили жизнь миллионов людей, предоставив безграничные возможности для получения и обмена информацией. Однако в связи с этим из года в год возрастает количество технических средств обработки и передачи информации, которые работают в сетях беспроводной связи. Эта проблема приводит к необходимости разработки технологий для рационального использования радиочастотного ресурса. На сегодняшний день псевдослучайное кодирование является практически единственным способом для обеспечения требуемого уровня помехозащищенности конфиденциальной информации, циркулирующей в сети со случайными и умышленными угрозами. Теоретической основой, подтверждающей корректность данного тезиса, является работа К. Шеннона. Приведены преимущества использования псевдослучайных кодов, которые позволяют существенно снизить канальные затраты на передачу, но позволяют существенно повысить скорость. Однако на сегодняшний день эта технология не применяется, так как декодирование таких кодов, связано с использованием правила максимального правдоподобия, которое для блоков длиной 20–30 канальных символов является вычислительно нереализуемым. В статье предложен метод декодирования псевдослучайных кодов на основе применения метода ветвей и границ.

Scientific and technical and social and economic progress changed life of millions of people, it has given boundless opportunities for receiving and information exchange. However, in this regard the number of technical means of processing and information transfer increases from year to year. This problem results in need of development of technologies for rational using of radio-frequency resource. Today pseudorandom coding is almost only way for support of required level of noise protection of confidential information. Advantages of use of pseudorandom codes which will allow to lower channel costs of transmission, but will allow to increase speed significantly are given. But today this technology isn't applied because decoding of such codes is connected to use of the rule of maximum likelihood. For blocks 20–30 channel characters is computationally infeasible. The method of decoding of pseudorandom codes on the basis of application of a method of branches and boundaries is offered.

**Ключевые слова:** псевдослучайные коды, линейный конгруэнтный генератор, евклидово пространство кода, метод ветвей и границ, системы передачи информации.

**Key words:** pseudorandom codes, linear congruent generator, Euclidean space of a code, method of branches and borders, systems of information transfer.

\* Работа подготовлена в рамках II Международной конференции «Параллельная компьютерная алгебра и ее приложения в новых инфокоммуникационных системах».

**Введение**

В эпоху, когда информация становится ценным товаром, а её стоимость существенно превышает системы, в которых она обрабатывается, появляется необходимость в методах помехоустойчивого кодирования, которые смогут обеспечить требуемый уровень помехозащищённости. На сегодняшний день псевдослучайное кодирование является практически единственным способом для обеспечения требуемого уровня помехозащищённости конфиденциальной информации, циркулирующей в сети со случайными и умышленными угрозами [1]. Теоретической основой, подтверждающей корректность данного тезиса, является работа К. Шеннона [2], в которой было доказано, что использование псевдослучайного кодирования в канале с помехами позволит достичь произвольно малой вероятности ошибки при увеличении длины блока кода.

Практическое доказательство данного тезиса выполнено в работах [3] – [4]. Построение ПСК на основе кодовых слов, которые выбираются равномерно и случайно из заданного диапазона, благодаря свойству асимптотической равно-вероятности показали, что практически любой случайный код является достаточно «хорошим». Объем полезно используемого для размещения кодовых точек евклидова пространства кода и средние взаимные расстояния с увеличением длины блока стремятся к наилучшим значениям [5]. Такие коды обеспечивают одновременно частотную и энергетическую эффективность и могут успешно применяться при использовании многопозиционных методов амплитудно-фазовой модуляции, находящих все более широкое распространение в современных стандартах, цифровых СПИ.

Статистическое моделирование процессов построения и декодирования ПСК выявляет необходимость использования блоковых кодов с достаточно существенной длиной блоков канальных символов  $n$ . Однако существенным препятствием применения таких кодов является тот факт, что декодирование по правилу максимального правдоподобия (МП) до настоящего времени было возможно только с применением переборных алгоритмов. Сложность таких алгоритмов возрастает экспоненциально, с увеличением длины блока кода и при практически требуемых значениях  $n$  становится вычислительно нереализуемым.

**Цель работы:**

разработка конструктивного вычислительно реализуемого математического метода декодирования псевдослучайных кодов (ПСК) для безопасной передачи данных в компьютерных сетях и перспективных системах мобильной связи на основе использования модифицированного метода ветвей и границ.

**Основная часть**

В рамках данной работы для генерации псевдослучайных чисел использовался линейный конгруэнтный генератор (ЛКГ).

При построении блоков кода генерируемые каналные символы (числа, соответствующие значениям информативного параметра сигнала-переносчика) распределялись равномерно случайно в заданном диапазоне  $2^n$ , где  $n$  – длина блока кодового слова. Кодовый блок ПСК  $X = \{x_0, x_0, \dots, x_{n-1}\}$  определяется порождающим числом последовательности  $x_0$ , которое, по сути, является лексикографическим номером кодируемого сообщения. На основе  $x_0$  формируется еще  $(n - 1)$  символов по рекуррентному правилу:

$$x_i = \text{mod}((a \cdot x_{i-1} + b), m), \text{ где } i \in [1, n-1], \quad (1)$$

где числа  $a, b, m$  – целые положительные константы, удовлетворяющие условиям:  $m \geq 2^n$ ,  $b$  и  $m$  – взаимно простые числа, величина  $(a - 1)$  – кратна любому простому числу, которое меньше  $m$  и является его делителем.

Однако, как видно из (1), алгоритм генерации последовательности является нелинейным, что не дает возможности реализовать линейные алгебраические методы декодирования с приемлемой вычислительной сложностью.

Для достижения поставленной цели была осуществлена линеаризация задачи декодирования путем введения дополнительного параметра  $y$ :

$$x_{i+1} = a \cdot x + b - y_i m, \quad i \in [0, 1, \dots, n-2]. \quad (2)$$

Данное выражение является правилом алгебраической линеаризации нелинейной операции вычисления по модулю при генерации очередного  $(i + 1)$  символа. Данное выражение справедливо только в случае выполнения двустороннего ограничения:

$$0 \leq y_i \leq \left\lfloor \frac{(m-1)a + b}{m} \right\rfloor \quad (3)$$

где  $y_i$  – целые числа,  $i \in [0, n-2]$ .

Для декодирования блока ПСК доступным является наблюдение искаженного в канале произвольного  $j$ -го кодового слова  $Z_j = \{z_0^j, z_0^j, \dots, z_{n-1}^j\}$ ,  $Z_j = X_j + H$ , где  $H = \{\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_{n-1}\}$  – вектор помехи. При этом производятся формулировка и формализация канонической задачи линейного целочисленного программирования. Целый ряд формальных

признаков получаемой целочисленной задачи факторизации порождающего числа  $x_0$  определяют целесообразность применения для ее решения метода ветвей и границ, обладающего вычислительной сложностью не выше полиномиальной от параметра  $n$ .

Для решения линеаризованной задачи декодирования предложено применение табличного алгоритма симплекс метода последовательного поиска оптимальных опорных планов задачи в узлах ветвления дерева решений. При этом потребовалась некоторая модификация стандартного метода поиска ближайшего к наблюдаемому кодового слова ПСК, суть которой кратко характеризуется следующими действиями. Для корректной оценки возможного искажения каждого символа полученного кодового слова  $Z_j$  вводятся переменные двусторонней оценки отклонения числа  $w_i$ , где  $i \in [1, 2n]$ . Это позволяет заменить нелинейный метод поиска минимального взаимного евклидова расстояния между кодовыми словами приближенным линейным методом поиска минимальной суммы проекций разностного вектора  $Z_j - X_i, j \in [0, m - 1]$ . При этом вводимые компенсационные переменные объединяются в пары  $(w_1, w_2), \dots, (w_{1n-1}, w_{2n})$ , причем переменные с нечетными и четными номерами используются в уравнениях-ограничениях задачи с противоположными знаками, характеризуя тем самым возможные двусторонние отклонения символов (чисел) кодового слова. В полной записи формализованной задачи фигурирует  $3n - 1$  уравнений-ограничений, содержащих  $5n - 1$  неизвестных. Таким образом, как минимум,  $2n$  переменных в начале решения задачи имеют статус свободных.

Сформулированная выше цель работы достигается за счет того, что поиск минимума осуществляется для линейной целевой функции вида:

$$L = \sum_{i=1}^{2n} w_i = w_1 + w_{i+1} + \dots + w_{2n} \quad (4)$$

Статистические исследования предложенного метода декодирования доказывают достижение поставленной цели – обеспечение вычислительной сложности процесса декодирования ПСК не выше полиномиальной (рис. 1, 2).

#### Выводы.

Рассмотренный метод декодирования псевдослучайных кодов незначительно проигрывает по объективности методам, основанным на ПМП, однако имеет возможность компенсировать данный недостаток путем увеличения длины блока до практически требуемых значений. Применение ПСК в сочетании с разработанным методом декодирования позволяет практически использовать псевдослучайные коды в современных высокоскоростных системах передачи информации.

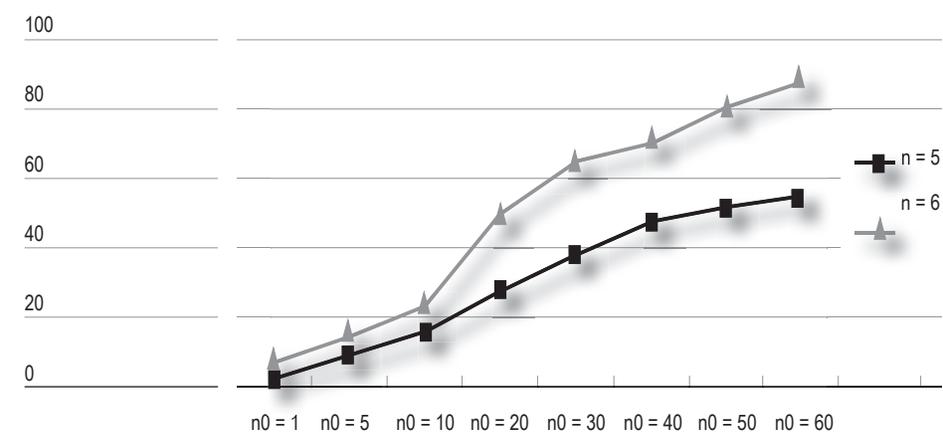


Рис. 1. Вычислительная сложность декодирования в зависимости от длины блока и спектральной плотности АБГШ.

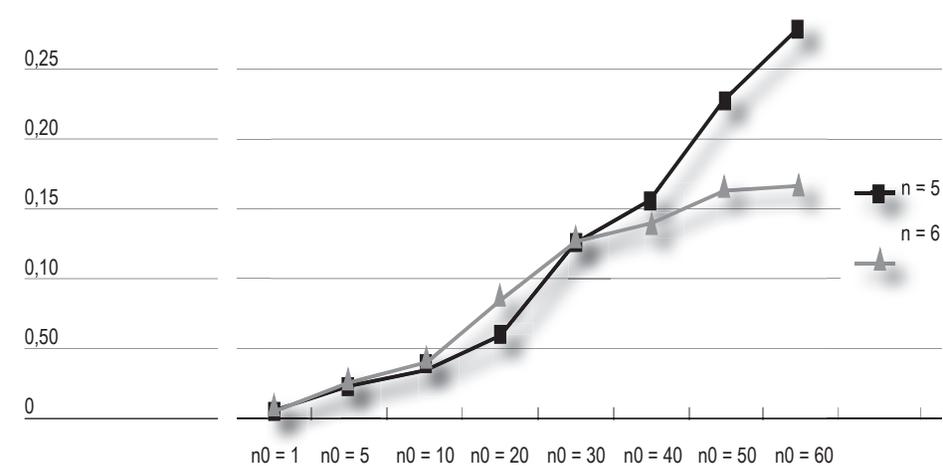


Рис. 2. Вероятность декодирования с ошибкой в зависимости от длины блока и спектральной плотности АБГШ.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ  
СПИСОК**

1. Пашинцев В.П. Применение метода вращений для оценки помехоустойчивости разнесенного приема сигналов / В.П. Пашинцев, А.Ф. Чипига, М.А. Лапина, О.В. Малсугенов, И.Е. Хохлов // Наука. Инновации. Технологии. 2013. №2. С. 93–98.
2. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. М.: Изд. «ИЛ», 1963. 830 с.
3. Лавровская Т.В. Анализ применения правила простого округления для получения вычислительно реализуемых методов декодирования / С.Г. Рассомахин, Т.В. Лавровская // Системи обробки інформації. 2015. Вип. 5 (151). С. 115–117.
4. Лавровская Т.В. Оценка эффективности псевдослучайных кодов, сгенерированных с помощью LFSR / С.Г. Рассомахин, Т.В. Лавровская, О.И. Вотяков // Прикладная радиоэлектроника. 2016. Т. 14. Вып. 4. (в печати).
5. Рассомахин С.Г. Линейное целочисленное декодирование псевдослучайных кодов на основе метода отсечений Гоморим / С.Г. Рассомахин // Системи обробки інформації. 2011. Вип. 5 (95). С. 93–98.

**ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ, № 4, 2016

УДК.621.342.572

**Малофей А.О. [Malofey A.O.],  
Харечкина Ю.О. [Kharechkina J.O.]****ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ  
ФАЗО-ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ  
СИГНАЛОВ С ДВУХКРАТНОЙ  
ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ****Interference of parallel phase-frequency-modulated  
signals with double phase-shift manipulation**

Проведено исследование явления интерференции параллельных фазо-частотно-модулированных сигналов вида  $Lf - 2\varphi$  с целью оптимизации расчета энергетического спектра этих сигналов. Получены функции энергетических спектров для такого типа сигналов. При исследовании явления интерференции для параллельных фазо-частотно-модулированных сигналов различных типов показан порядок определения комплексного спектра параллельных фазо-частотно-модулированных сигналов с двухкратной фазовой манипуляцией с выделением порядка интерференционных составляющих.

The investigation of the phenomenon of interference of parallel phase-frequency-modulated types of signals  $Lf - 2\varphi$  in order to optimize the calculation of the energy spectrum of these signals. There were obtained functions of the energy spectra for this type of signal. In the investigation of interference phenomena for parallel phase-frequency-modulated various types of signals, was set the procedure for determining the complex spectrum of parallel phase-frequency-modulated signals with double phase-shift manipulation with the release of the order of interference components

**Ключевые слова:** интерференция, фазовая манипуляция, спектр сигнала, частота.

**Key words:** interference, phase shift keying, spectrum signal, frequency.

В параллельных фазо-частотно-модулированных (ПФЧМ) сигналах представляет интерес изучение явления интерференции. Рассмотрим ПФЧМ сигналы вида  $Lf - 2\varphi$  с двухкратной фазовой манипуляцией, где  $L$  – количество используемых частот,  $2$  – количество углов манипуляции по фазе [3]. Простейшей реализацией такого составного сигнала является модель двухчастотного ПФЧМ сигнала  $Lf - 2\varphi$ .

Представим реализацию двухчастотного ПФЧМ сигнала в виде

$$S(t) = \sin\left[\left(\omega_0 - \frac{\pi}{2T}\right) \cdot t\right] + \sin\left[\left(\omega_0 + \frac{\pi}{2T}\right) \cdot t\right] = v(t) \cdot \sin(\omega_0 t)$$

где  $v(t) = 2 \cos\left(\frac{\pi}{2T} \cdot t\right)$  – комплексная огибающая;  
 $\omega_0$  – центральная частота в спектре.

Используя преобразование Фурье, определяем энергетический спектр комплексных огибающих для ПФЧМ сигналов вида  $Lf - 2\varphi$  [1, 2]:

\* Работа подготовлена в рамках II Международной конференции «Параллельная компьютерная алгебра и ее приложения в новых инфокоммуникационных системах».

$$|G(j\omega)|^2 = \frac{1}{\pi^2} \left\{ \frac{\sin^2 \left[ \left( \omega - \frac{\pi}{2T} \right) \cdot \frac{T}{2} \right]}{\left( \omega - \frac{\pi}{2T} \right)^2} + \frac{\sin^2 \left[ \left( \omega + \frac{\pi}{2T} \right) \cdot \frac{T}{2} \right]}{\left( \omega + \frac{\pi}{2T} \right)^2} \right\} =$$

$$= G_{\Pi} \left( \frac{\pi}{2T} \right) + G_{\Pi} \left( -\frac{\pi}{2T} \right), \quad (2)$$

где  $G_{\Pi}$  – энергетический спектр прямоугольной огибающей.

Для четырехчастотного ПФЧМ сигнала вида  $Lf - 2\varphi$  энергетический спектр имеет вид:

$$|G(j\omega)|^2 = \frac{1}{\pi^2} \left\{ \frac{\sin^2 \left[ \left( \omega - \frac{3\pi}{2T} \right) \cdot \frac{T}{2} \right]}{\left( \omega - \frac{3\pi}{2T} \right)^2} + \frac{\sin^2 \left[ \left( \omega - \frac{\pi}{2T} \right) \cdot \frac{T}{2} \right]}{\left( \omega - \frac{\pi}{2T} \right)^2} + \right.$$

$$+ \frac{\sin^2 \left[ \left( \omega - \frac{\pi}{2T} \right) \cdot \frac{T}{2} \right]}{\left( \omega - \frac{\pi}{2T} \right)^2} + \frac{\sin^2 \left[ \left( \omega + \frac{\pi}{2T} \right) \cdot \frac{T}{2} \right]}{\left( \omega + \frac{\pi}{2T} \right)^2} +$$

$$\left. \frac{2 \cos^2 \left[ \left( \omega - \frac{\pi}{2T} \right) \cdot \frac{T}{2} \right]}{\left( \omega - \frac{3\pi}{2T} \right) \left( \omega + \frac{\pi}{2T} \right)} + \frac{2 \cos^2 \left[ \left( \omega + \frac{\pi}{2T} \right) \cdot \frac{T}{2} \right]}{\left( \omega + \frac{3\pi}{2T} \right) \left( \omega - \frac{\pi}{2T} \right)} \right\} =$$

$$= G_{\Pi} \left( \frac{3\pi}{2T} \right) + G_{\Pi} \left( -\frac{3\pi}{2T} \right) + G_{\Pi} \left( \frac{\pi}{2T} \right) + G_{\Pi} \left( -\frac{\pi}{2T} \right) +$$

$$+ G_{\text{И}}^1 \left( \frac{3\pi}{2T}; -\frac{\pi}{2T} \right) + G_{\text{И}}^1 \left( -\frac{3\pi}{2T}; \frac{\pi}{2T} \right), \quad (3)$$

где  $G_{\text{И}}^1(\Delta\omega_i, \Delta\omega_1)$  интерференционная составляющая первого порядка, аргументы  $\Delta\omega_i, \Delta\omega_1$  которой определяют смещение от средней частоты последующих частот параллельного сигнала, взаимодействие которых порождает интерференцию.

Интерференционная функция 1-го порядка порождается воздействием поднесущих частот, отстоящих друг от друга на величину  $\Delta\omega = 2\pi/T$ .

Для восьмичастотного ПФЧМ сигнала вида  $8f - 2\varphi$  энергетический спектр имеет вид

$$|G(j\omega)|^2 = G_{\Pi} \left( \frac{7\pi}{2T} \right) + G_{\Pi} \left( -\frac{7\pi}{2T} \right) + G_{\Pi} \left( \frac{5\pi}{2T} \right) + G_{\Pi} \left( -\frac{5\pi}{2T} \right) +$$

$$+ G_{\Pi} \left( \frac{3\pi}{2T} \right) + G_{\Pi} \left( -\frac{3\pi}{2T} \right) + G_{\Pi} \left( \frac{\pi}{2T} \right) + G_{\Pi} \left( -\frac{\pi}{2T} \right) + G_{\text{И}}^1 \left( \frac{7\pi}{2T}; \frac{3\pi}{2T} \right) +$$

$$+ G_{\text{И}}^1 \left( -\frac{7\pi}{2T}; -\frac{3\pi}{2T} \right) + G_{\text{И}}^1 \left( \frac{5\pi}{2T}; \frac{\pi}{2T} \right) + G_{\text{И}}^1 \left( -\frac{5\pi}{2T}; -\frac{\pi}{2T} \right) +$$

$$+ G_{\text{И}}^1 \left( \frac{3\pi}{2T}; -\frac{\pi}{2T} \right) + G_{\text{И}}^1 \left( -\frac{3\pi}{2T}; \frac{\pi}{2T} \right) + G_{\text{И}}^2 \left( \frac{7\pi}{2T}; -\frac{\pi}{2T} \right) +$$

$$+ G_{\text{И}}^2 \left( -\frac{7\pi}{2T}; \frac{\pi}{2T} \right) + G_{\text{И}}^2 \left( \frac{5\pi}{2T}; -\frac{3\pi}{2T} \right) + G_{\text{И}}^2 \left( -\frac{5\pi}{2T}; \frac{3\pi}{2T} \right) +$$

$$+ G_{\text{И}}^3 \left( \frac{7\pi}{2T}; -\frac{5\pi}{2T} \right) + G_{\text{И}}^3 \left( -\frac{7\pi}{2T}; \frac{5\pi}{2T} \right), \quad (4)$$

где  $G_{\text{И}}^1(\Delta\omega_i, \Delta\omega_1), G_{\text{И}}^2(\Delta\omega_i, \Delta\omega_1), G_{\text{И}}^3(\Delta\omega_i, \Delta\omega_1)$  – интерференционные составляющие 1-го, 2-го и 3-го порядков, аргументы  $\Delta\omega_i, \Delta\omega_1$  которых характеризуют величину смещения взаимодействующих поднесущих частот от центральной частоты в спектре ПФЧМ сигнала.

Суммарный спектр любого ПФЧМ сигнала с двукратной фазовой манипуляцией  $Lf - 2\varphi$  имеет вид

$$|G(j\omega)|^2 = \sum_{i=0}^{L/2-1} \left\{ \frac{\sin^2 \left[ \left( \omega - \frac{(2i+1)\pi}{2T} \right) \cdot \frac{T}{2} \right]}{\left( \omega - \frac{(2i+1)\pi}{2T} \right)^2} + \frac{\sin^2 \left[ \left( \omega + \frac{(2i+1)\pi}{2T} \right) \cdot \frac{T}{2} \right]}{\left( \omega + \frac{(2i+1)\pi}{2T} \right)^2} \right\} +$$

$$+ \sum_{n=1}^{L/2-1} \sum_{i=n}^{L/2-1} \left\{ \frac{2 \cos \Delta\phi \cos^2 \left[ \left( \omega - \frac{(2i-2n+1)\pi}{2T} \right) \cdot \frac{T}{2} - \frac{\pi}{2} \cos^2 \frac{\pi n}{2} \right]}{\left( \omega - \frac{(2i+1)\pi}{2T} \right) \left( \omega - \frac{(2i-n+1)\pi}{2T} \right)} + \right.$$

$$\left. \frac{2 \cos \Delta\phi \cos^2 \left[ \left( \omega - \frac{(2i-2n+1)\pi}{2T} \right) \cdot \frac{T}{2} - \frac{\pi}{2} \cos^2 \frac{\pi n}{2} \right]}{\left( \omega + \frac{(2i+1)\pi}{2T} \right) \left( \omega - \frac{(2i+n+1)\pi}{2T} \right)} \right\}, \quad (5)$$

где  $n$  – порядок интерференционной функции;  
 $\Delta\phi$  – угол фазового сдвига между плоскостями  $k$ -й и  $j$ -й частотных составляющих.

**Выводы**

1. В энергетическом спектре двухчастотного, двухфазного ПФЧМ сигнала вида  $Lf - 2\varphi$  явление интерференции не возникает.
2. Порядок интерференции для ПФЧМ сигнала вида  $8f - 2\varphi$  в выражении (4) определяется величиной  $(\Delta\omega_1 - \Delta\omega_2)/(2\pi/T)$  и характеризует расстояние по оси частот между взаимодействующими поднесущими.
3. Для определения комплексного спектра ПФЧМ сигнала с двукратной фазовой манипуляцией  $Lf - 2\varphi$  необходимо взять сумму спектров сигналов с прямоугольными огибающими на поднесущих частотах  $G_n^m(\omega_i), m=1...L$  и интерференционных составляющих  $G_{in}$ .

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Макаров С.Б., Цикин И.А. Передача дискретных сообщений по радиоканалам с ограниченной полосой пропускания. М.: Радио и связь, 1988. 110 с.
2. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Назаров М.В., Финк Л.М. Теория передачи сигналов. М.: Радио и связь, 1986. 304 с.
3. Малофеев О.П., Малофеев А.О. Использование полунепрерывных сигналов для наращивания частотноэнергетического ресурса каналов передачи данных в АСУ // Международная научнотехническая конференция. Уфимский государственный нефтяной технический университет: Сборник трудов «Современные технологии в нефтегазовом деле». Уфа, 2014. С. 241–246.
4. Рассомахин С. Г., Малофеев А.О., Малофеев О.П. Нахождение оптимальных энергетических параметров передачи позиционных кодов в автоматизированных системах управления // Наука. Инновации. Технологии. Ставрополь: 2014. № 1. С. 74–80.
5. Малофеев А.О., Малофеев О.П., Рассомахин С. Г. Вероятностное описание явления центробежной ошибки при передаче безизбыточных числовых кодов по гауссовым каналам // Инфокоммуникационные технологии. Т. 12. № 4. Самара, 2014. С. 9–16.
6. Рассомахин С.Г., Малофеев О.П., Малофеев А.О. Оптимизация алгоритма передачи числовых позиционных кодов для дискретных каналов с флуктуационным шумом // Наука. Инновации. Технологии. Ставрополь, 2015. № 1. С. 51–59.

**ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ, № 4, 2016

УДК621.37:621.391

Рассомахин С.Г. [Rassomakhin S.G.],  
Веклич С.Г. [Veklich S.G.],  
Малофеев О.П. [Malofey O.P.]

**БИБЛИОТЕКА ЭТАЛОННЫХ МОДЕЛЕЙ СИГНАЛОВ ФИЗИЧЕСКОГО УРОВНЯ\*****The library of reference models of the physical layer signals**

Беспроводная связь очень широко используется в системах передачи информации. Беспроводные сети отличаются от кабельных сетей на физическом и частично на канальном уровнях взаимодействия OSI использованием разных способов модуляции. Представлена библиотека эталонных моделей сигналов физического уровня, предназначенная для построения математических моделей телекоммуникационных протоколов в системах беспроводной связи. Построение таких моделей обусловлено необходимостью исследования методов цифровой обработки сигналов. Главная особенность данных моделей заключается в использовании алгебраического метода обработки сложных сигнальных конструкций, которая позволяет уйти от использования метода быстрого преобразования Фурье. Библиотека содержит обобщенные модели сигналов m-PSK с абсолютной и относительной фазовой манипуляцией и модель OFDM сигнала. Реализована возможность представления сигнала в виде дискретных выборок, а также записи и считывания с файла.

The wireless communication is very widely used information transmission systems. Wireless networks differ from cable networks on physical and partially on data link layer OSI in use of different methods of modulation. The library of reference models of signals of the physical layer intended for creation of mathematical models of telecommunication protocols in wireless systems is provided. Creation of such models is caused by need of a research of methods of digital signal processing. The principal feature of these models consists in use of an algebraic method of processing of difficult signal constructions which allows to avoid use of a method of fast Fourier transform. The library contains the generalized models of signals m-PSK with absolute and relative phase-shift keying and the signal OFDM model. The possibility of representation of a signal in the form of the discrete samples, and also record and reading from the file is realized.

**Ключевые слова:** Модуляция, сигнал, физический уровень, беспроводные сети, межсимвольная интерференция.

**Key words:** Modulation, signal, physical layer, wireless networks, intersymbol interference.

**Введение.**

Эффективность процессов передачи информации в мобильных системах напрямую зависит от совершенства алгоритмов цифрового формирования и обработки сигналов. Существующие алгоритмы со-

\* Работа подготовлена в рамках II Международной конференции «Параллельная компьютерная алгебра и ее приложения в новых инфокоммуникационных системах».

ставляют целые классы протоколов по цифровой обработке сигналов и используются в стандартах связи. Одним из таких стандартов является беспроводная связь (Wi-Fi). Wi-Fi – это семейство протоколов беспроводной передачи данных IEEE 802.11x (802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n и т.д.). Стандарт беспроводной сети 802.11x, который является составной частью стандартов локальных сетей IEEE802.11x, охватывает только два нижних уровня семиуровневой модели OSI – физический и канальный, в наибольшей степени отражающие специфику локальных сетей. Беспроводные сети отличаются от кабельных сетей на физическом (Phy) и частично на канальном (MAC) – уровнях модели взаимодействия OSI [1].

Физический уровень IEEE 802.11x – радиоканал. Этот уровень характеризует параметры физической среды передачи данных. Стандарт IEEE 802.11x обеспечивает передачу сигнала, несущего информацию, одним из методов: прямой последовательности и частотных скачков. Эти методы отличаются способом модуляции, но используют одинаковую технологию расширения спектра [2].

Для исследования методов цифровой обработки сигналов стандарта IEEE 802.11x возникает необходимость создания библиотеки эталонных моделей сигналов физического уровня беспроводной связи. Эта библиотека включает модели сигналов фазовой манипуляции (PSK) и ее разновидностей: двоичная фазовая манипуляция (BPSK), квадратурная фазовая манипуляция (QPSK) и модель сигнала ортогонального частотного разделения каналов с мультиплексированием (OFDM).

### Целью статьи

является разработка программной библиотеки эталонных моделей сигналов физического уровня беспроводной связи в математическом программном пакете MathCAD.

### Основная часть.

В статье представлены основные модели сигналов, которые используются в стандартах беспроводной связи, а именно: модели сигналов абсолютной и относительной фазовой манипуляции и модель сигнала ортогонального частотного разделения с мультиплексированием (OFDM).

#### 1. Обобщенная модель сигналов m-PSK

Фазовая манипуляция – один из видов дискретной модуляции, при которой фаза несущего колебания меняется скачкообразно. Количество возможных градаций фазовых углов принадлежит конечному счетному множеству

$$\varphi_v \in \Psi = \{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_{m-1}\}, \quad (1)$$

где  $m$ , как правило, определяется  $m = 2^n$ ,

$n$  – целое, имеющее физический смысл количества двоичных символов, передаваемых одним сигналом.

Величина  $m$ , таким образом, определяет мощность канального алфавита. Модель обобщенного сигнала  $m$ -PSK имеет следующий вид:

$$S(t) = \sin[2\pi(t - iT)Fn + \varphi_v], \quad (2)$$

где  $i = 0, 1, \dots, N - 1$ ;  
 $N$  – количество передаваемых символов в сообщении;  
 $T = 1/V$  – продолжительность интервала манипуляции;  
 $\varphi_v, v = 0, 1, \dots, m - 1$  – текущая фаза сигнала;  
 $V$  – скорость модуляции;  
 $Fn$  – несущая частота.

В фазовой манипуляции при каждой смене фазы передается  $n$  бит. Количество передаваемых бит при каждой смене фазы определяет разновидности ФМ сигналов:  $m = 2$  – BPSK,  $m = 4$  – QPSK,  $m = 8$  – 8-PSK и так далее.

Для повышения помехоустойчивости при построении моделей используется код Грея, определяющий биективное отображение последовательностей значений бит в последовательности фазовых углов квадратурной или многопозиционной манипуляции.

Главная особенность кода Грея заключается в том, что соседние комбинации различаются друг от друга на один бит. Размер вектора кода Грея зависит от кратности фазовой манипуляции  $n$ . Число возможных фазовых углов и кодовых комбинаций определяется как  $m = 2^n$ .

Процесс определения текущего фазового угла передаваемой комбинации заключается в переводе передаваемой  $n$ -битовой комбинации в десятичное число, определяющее порядковый номер фазового угла в лексикографически упорядоченной последовательности (1), с последующим умножением данного числа на величину  $\pi/m$ , которая соответствует минимальной разнице между соседними градациями манипуляционных углов:

$$\varphi_v = \frac{\pi}{2^n}(2d_v - 1), \quad (3)$$

где  $d$  – вектор кода Грея.

Таким образом, универсальная модель  $m$ -PSK полностью задается выражениями (1) – (3), определяющими процесс формирования сигналов.

Приведем пример моделей сигналов BPSK и QPSK.

Если  $m = 2$ , то модель представляет простейший сигнал бинарной фазовой манипуляции BPSK. Вектор фазовых углов  $\varphi_v$  содержит следующие

щие элементы  $\varphi_i = [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ , а математическая модель данного сигнала представлена выражением (1). При  $m = 4$  модель представляет квадратурную фазовую манипуляцию QPSK. Вектор фазовых углов  $\varphi_v$  состоит из следующих элементов  $\varphi_i = [-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}]$ . Математическая модель данного сигнала представлена выражением (1).

Для обработки цифровых сигналов в рассматриваемой модели используется метод алгебраической обработки сложных сигнальных конструкций. Суть данного метода заключается в алгебраической демодуляции сигнала по дискретным измерениям путем решения матричного уравнения вида:

$$A \cdot X = B, \quad (4)$$

где  $A$  – матрица амплитудквadrатурных компонент на интервале модуляции;  
 $B$  – вектор значений сигнала в цифровом представлении в каждом отсчете интервала модуляции;  
 $X$  – вектор искомых значений амплитуд для заданного интервала модуляции.

Матрица является переопределенной и содержит значения амплитуд квадратурных компонент синусов и косинусов для каждого интервала модуляции.

Переопределение матрицы вызвано необходимостью уменьшения влияния естественных погрешностей, вызванных шумом квантования (ошибками измерений) и погрешностями вычислений. Степень переопределения системы характеризуется коэффициентом  $\mu = W/2$  и описывает асимметрию размеров матрицы  $W \times 2$ . Здесь  $w = \lfloor \frac{Fd}{V} \rfloor$ , где  $Fd$  – частота дискретизации сигнала;  $V$  – скорость модуляции; знак  $\lfloor \cdot \rfloor$  – означает округление к ближайшему меньшему целому числу; число 2 означает количество используемых квадратурных компонент, с помощью которых задается сигнал, а, следовательно, количество искомых неизвестных.

Решение алгебраической системы вида (4) предполагает наличие квадратной матрицы  $A$ , так как в данном методе матрица  $A$  является переопределенной, то в этом случае правая и левая часть системы (4) умножаются на транспонированную матрицу  $A^T$ . Это преобразование системы (4) позволяет уменьшить влияние шумов квантования путем усреднения ошибки и будет иметь следующий вид:

$$A^T \cdot A \cdot X = A^T \cdot B \quad (5)$$

Матрица содержит значения коэффициентов при неизвестных амплитудах квадратурных компонент и имеет вид:

$$A = \|a_{i,j}\|; \quad a_{i,j} = \begin{cases} \sin(2\pi F_n (td_q - i \cdot T)), & j = 0; \\ \cos(2\pi F_n (td_q - i \cdot T)), & j = 1; \end{cases} \quad (6)$$

где  $i = 0, 1, \dots, N - 1$ ;  $q = 0, 1, \dots, N \cdot W - 1$ ;

Вектор  $B$  (размерностью  $W$  элементов) содержит значения огибающей сигнала в каждой точке отсчета и задается следующим образом:

$$B = \{b_0, \dots, b_{W-1}\}, \quad (7)$$

Решение уравнения вида (5) дает возможность вычислить элементы вектора фаз гармонических колебаний  $\Phi = \{\phi_0, \dots, \phi_{N-1}\}$  на несущей частоте:

$$\phi_i = \text{mod} \left( \left[ \frac{180}{\pi} \text{Atan}(x_0, x_1) + 360 \right], 360 \right), \quad i = 0, \dots, N - 1, \quad (8)$$

где функция  $\text{mod}(a, b)$  – вычисляет значения числа  $a$  по модулю  $b$ ; функция  $\text{Atan}(z, y)$  для вычисления значения угла в градусах на интервале  $[-\pi, \pi]$ .

Процесс вычисления (5) и (8) является абсолютной фазовой демодуляцией сигнала по дискретным измерениям на интервале  $T$ . Далее вычисляется номер строки вектора кода Грея и определяется передаваемая кодовая комбинация.

Таким образом, представленный метод алгебраической обработки сложных сигнальных конструкций позволяет производить демодуляцию сигналов PSK, без применения метода быстрого преобразования Фурье, который используется в стандартах беспроводной связи.

## 2. Обобщенная модель сигналов m-PSK с относительной фазовой манипуляцией

Одним из недостатков фазовой манипуляции является определение абсолютного значения фазы сигнала при декодировании, так как в фазовой манипуляции информация кодируется именно абсолютным значением фазы сигнала. Для борьбы с этим недостатком необходимо, чтобы приемник имел информацию об «эталонном» синфазном сигнале передатчика. Тогда путем сравнения принимаемого сигнала с эталонным можно определять абсолютный сдвиг фазы. Следовательно, необходимо каким-то способом синхронизировать сигнал передатчика с эталонным сигналом приемника. Реализация синхронной передачи достаточно сложна, поэтому более широкое распространение получила разновидность фазовой модуляции, называемая относительной фазовой модуляцией.

ей (Differential Phase Shift Keying, DPSK). При относительной фазовой модуляции кодирование информации происходит за счет сдвига фазы по отношению к фазе сигнала на предыдущем интервале модуляции. То есть информация кодируется изменением фазы. Во всем остальном DPSK-модуляция не отличается от PSK-модуляции [3].

Математическая модель сигнала относительной фазовой манипуляции имеет такой вид, как и абсолютная фазовая манипуляция, а отличается только формированием матрицы фазовых углов. Находится начальная фаза

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{2^n}(2d_0 - 1), \quad (9)$$

которая складывается со следующим фазовым углом и так далее:

$$\varphi_v = \text{mod} \left( \varphi_{v-1} + \frac{\pi}{2^n}(2d_v - 1), 2\pi \right), \quad (10)$$

где  $v = 1, 2, \dots, m - 1$ ;  
 $n$  – кратность ФМ;  
 $d$  – вектор кода Грея.

Таким образом, каждый последующий фазовый угол определяется суммой с предыдущим, вычисленной по модулю  $2\pi$ .

Фазовая модуляция сигнала в стандартах связи может обеспечить скорость передачи до 11 Мбит/с. Для увеличения скорости передачи, был разработан метод деления широкополосного канала на ортогональные частотные подканалы, который получил название ортогональное частотное разделение с мультиплексированием (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM).

### 3. Модель OFDM сигнала

При OFDM последовательный цифровой поток передаваемых данных распределяется по множеству частотных подканалов, и передача ведётся параллельно на всех этих подканалах. При этом высокая скорость передачи достигается именно за счёт одновременной передачи данных по всем каналам, а скорость передачи в отдельном подканале может быть и не высокой.

При частотном разделении каналов необходимо, чтобы ширина полосы частот отдельного канала была, с одной стороны, достаточно узкой для минимизации искажения сигнала в пределах отдельного канала, а с другой – достаточно широкой для обеспечения требуемой скорости передачи. Кроме того, для экономного использования всей полосы канала, разделяемого на подканалы, желательно как можно более плотно расположить частотные подканалы, но при этом избежать межканальной интерференции, чтобы обеспечить полную независимость каналов друг от дру-

га. Частотные каналы, удовлетворяющие перечисленным требованиям, называются ортогональными. Несущие сигналы всех частотных подканалов ортогональны друг другу. Ортогональность несущих сигналов гарантирует частотную независимость каналов друг от друга, а, следовательно, отсутствие межканальной интерференции. Ортогональность подканалов означает, что произведение функций, которые их описывают, усреднённое на некотором интервале, должно быть равно нулю:

$$\int_0^T \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \cdot \sin(2\pi f_j t + \varphi_j) dt = 0, i \neq j, \quad (11)$$

где  $T$  – период длительности символа;  
 $f_i, f_j$  – несущие частоты каналов  $i, j$ . Очевидно, что требование (11) выполняется при любых значениях  $\varphi_i, \varphi_j$ , если

$$f_i - f_j = \frac{z}{T}, \quad (12)$$

где  $z$  – целое. Тогда выражение (11) принимает следующий вид:

$$\int_0^T \sin(2\pi \frac{i}{T} t + \varphi_i) \cdot \sin(2\pi \frac{j}{T} t + \varphi_j) dt \equiv 0, i \neq j \quad (13)$$

Одним из главных преимуществ метода OFDM является его устойчивость к эффекту многолучевого распространения. Эффект вызывается тем, что излученный сигнал, отражаясь от препятствий, приходит к приемной антенне разными путями, вызывая межсимвольные искажения. Для того чтобы избежать межсимвольных искажений, перед каждым OFDM-символом вводится защитный интервал, называемый циклическим префиксом. Циклический префикс представляет собой повторение фрагмента полезного сигнала, что гарантирует сохранение ортогональности поднесущих [4].

В каждом частотном подканале для кодирования информации используется либо двоичная, либо квадратурная фазовые модуляции BPSK и QPSK. Модуляция BPSK используется для передачи данных на скоростях 6 и 9 Мбит/с, а модуляция QPSK – на скоростях 12 и 18 Мбит/с.

OFDM сигнал формируется путем алгебраического суммирования нескольких гармонических колебаний одинаковой амплитуды. При использовании кодирования фаз (ФМ) и единичном значении амплитуды поднесущих колебаний математическая модель сигнала может быть представлена в виде следующего ряда на основе гармонических функций [5]:

$$S_i(t) = \sum_{j=0}^{NF-1} \sin \left[ 2\pi \left( f_0 + \frac{j}{T} \right) \left( t - T_p \left[ \frac{t}{T_p} \right] \right) + \varphi_{i,j} \right], \quad (14)$$

где  $t$  – текущее время;  
 $f_0$  – низшая поднесущая частота в спектре сигнала;  
 $T = 1/\Delta f$  – величина, обратная минимальному разнесу (интервалу ортогональности по частоте  $\Delta f$ ) поднесущих частот;  
 $NF$  – число используемых поднесущих;  
 $\varphi_{ij}$  – значение манипуляционного угла  $i$  – того поднесущего колебания на  $j$  – том интервале модуляции, которое может принимать одно из  $m$  значений в зависимости от содержания информационной последовательности и используемого манипуляционного кода;  
 знак  $[\cdot]$  – означает округление к ближайшему меньшему целому числу;  
 $T_p$  – продолжительность интервала модуляции с учетом префиксных дополнений.

Использование операции округления позволяет организовать эффективный в вычислительном плане переход от непрерывного времени к его дискретному представлению на интервалах модуляции.

Временные параметры интервала модуляции, использованные в модели (14), связаны между собой соотношением:

$$T_p = T + \Delta T = \frac{1}{\Delta f} + \Delta T, \quad (15)$$

где  $\Delta T$  – длительность префиксной части сигнала.

Префиксная часть является повторяющейся (с точностью до знака) начальной частью сигнала, добавляемой в конце интервала модуляции  $T_p$ . Это вызвано тем, что на практике выделение тактовой частоты в условиях ее дрейфа, замираний, переотражений и наличия эффекта Доплера на подвижных объектах накладывает серьезные ограничения на параметры OFDM сигналов. В частности, разнос частот должен быть значительно больше ожидаемого ухода частоты по любым причинам, включая и эффект Доплера. Переотражения и нестабильность амплитудно-фазовых характеристик общего канала искажают моменты начала смены символов, затрудняя или делая невозможной тактовую синхронизацию. При возникновении рассинхронизации OFDM сигнал может быть правильно принят и демодулирован по любому отрезку длительностью  $T$ , лежащему внутри полного интервала модуляции  $T_p$  [6].

Процесс дискретизации и квантования сигнала аналогичен модели ФМ сигнала. Единственное различие между этими моделями в процессе оцифровки сигнала заключается в выборе частоты дискретизации. Значение частоты дискретизации должно быть больше в 2 раза от максимальной частоты подканала:

$$Fd \geq 2f_{\max}, \quad (16)$$

где  $f_{\max}$  – максимальная частота подканала сигнала OFDM.

Модель сигнала OFDM используется в стандарте Wi-Fi имеют всего 64 поднесущих канала, что ограничивает скорость передачи до 30 Мбит/с.

#### 4. Представление реализаций моделей сигналов в виде дискретных выборок

Для реализации моделей процессов обработки сигналов полезно иметь возможность сохранения отрезков реализаций цифровых сигналов в виде массивов последовательных измерений, необходимо произвести его дискретизацию по времени и квантование по уровню.

Дискретизация сигнала с заданной частотой задается выражением:

$$s_q = S \left( q \frac{1}{Fd} \right), \quad (17)$$

где  $q = 0, 1, \dots, NW - 1$ ;  
 $N$ ; – число интервалов модуляции;  
 $Fd$  – частота дискретизации.

Квантование сигнала моделируется путем умножения фактического измерения сигнала на уменьшенное в 2 раза количество уровней квантования. При этом учитываются только положительные измерения:

$$Sd_q = \left[ s_q \cdot 2^{k-1} \right], \quad (18)$$

где  $N$ ; – число интервалов модуляции;  
 $Fd$  – частота дискретизации;  
 $V$  – скорость модуляции;  
 $k$  – разрядность измерения;  
 знак  $[\square]$  – означает округление к ближайшему целому числу.  
 $s_q$  – предварительно нормируется на диапазон возможных значений  $[-1, 1]$ .

В состав рассматриваемой библиотеки включена программная процедура формирования файлов данных цифровых выборок, реализованная в соответствии с (17), (18).

**Выводы.**

Представленная библиотека математических моделей позволяет достаточно просто производить формирование и обработку сложных сигнальных конструкций как в режиме реального времени, так и в режиме постобработки сигналов. Главная особенность заключается в применении метода алгебраической обработки сложных сигнальных конструкций в процессе демодуляции сигналов, что позволяет значительно упростить вычисление вектора фазовых углов. Рассмотренные математические модели сигналов можно использовать для обработки сигналов стандартов беспроводной связи. Данная библиотека математических моделей разработана в программном пакете MathCAD.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Пролетарский А. В., Баскаков И. В., Чирков Д. Н. Беспроводные сети Wi-Fi. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007.
2. Столлингс В. Современные компьютерные сети. СПб.: Питер, 2003.
3. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.
4. Жиляков Е.Г., Белов С.П., Медведева А.А., Курлов А.В., Лихолоб П.Г. Об одном алгоритме определения информационных частотных интервалов // Наука. Инновации. Технологии. 2016. №3. С. 23–30.
5. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983.
6. Вишневский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005.

**ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ, № 4, 2016

УДК 629 :  
511+519.719.2**Самойленко Д.В. [Samoylenko D.V],  
Финько О.А. [Finko O.A.]****ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЦЕЛОСТНОСТИ  
ИНФОРМАЦИИ В АВТОНОМНОЙ  
ГРУППЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ  
АППАРАТОВ МЕТОДАМИ МОДУЛЯРНОЙ  
АРИФМЕТИКИ\*****Ensuring the integrity of information  
in an autonomous group of unmanned aerial  
vehicles by methods of modular arithmetic**

Рассматривается автономная группа беспилотных летательных аппаратов, а также варианты структуры возможной организации их взаимодействия (централизованной и децентрализованной). При выполнении специальных задач автономная группа беспилотных летательных аппаратов образует пространственно-распределенную масштабируемую систему обработки информации с непредсказуемо и динамически изменяющейся структурой, в которой выполнение основной «целевой» функции по обработке информации находится в зависимости от коммуникационной среды. Несостоятельность каналов радиосвязи допускает возможность деструктивных воздействий, в частности непреднамеренных и организованных преднамеренных помех целью которых является нарушение качественных характеристик информации, определяющих ее пригодность в решении целевых функций автономной группы беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Ключевым требованием по обеспечению качественных характеристик, предъявляемым к информации, является обеспечение ее целостности на всех этапах жизненного цикла. Применяемые классические методы обеспечения целостности, эффективно обеспечивают и контролируют целостность информации на микроуровне в рамках одного БЛА, но в то же время не решают этой задачи для группы в целом. Предлагается для таких условий функционирования задачу обеспечения и контроля целостности информации осуществлять следующим образом: совокупность запоминающих устройств, размещенных на борту различных, но объединенных единой целью функционирования БЛА, рассматривать как единую систему запоминающих устройств, предусматривающую введение избыточности в сохраняемую информацию. Для избыточного хранения информации на бортах БЛА используются избыточные модулярные полиномиальные коды. Предложенный метод предусматривает возможность восстановления целостности информации, подвергнутой деструктивному воздействию, при этом и физическая утрата некоторой заранее установленной предельной численности БЛА не приводит к частичной или полной ее потере.

We consider an autonomous group of unmanned aerial vehicles, as well as options for the structure of the possible organization of their interaction (centralized and decentralized). When performing special tasks autonomous group drones form a spatially distributed and scalable data processing system with unpredictable and dynamically changeable structure in which the execution of the main "target" function to process information depends on the communication environment. The failure of the radio channel is subject to destructive influences, in particular, unintentional and intentional interference of organized purpose is a violation of the qualitative characteristics of information that determine its suitability in dealing with the target group functions autonomous unmanned aerial vehicles (UAVs). A key requirement to ensure the qualitative characteristics of the requirements for information is to ensure its integrity at all stages of the life cycle.

\* Работа подготовлена в рамках II Международной конференции «Параллельная компьютерная алгебра и ее приложения в новых инфокоммуникационных системах».

Classical techniques used to ensure the integrity, and efficiently provide control data integrity at the micro level within a UAV, but at the same time do not solve this problem for the whole group. It is proposed for such conditions of functioning of the task of ensuring and monitoring the integrity of information as follows: a set of storage devices, placed on board a different, but united by a common purpose of the operation of UAVs, considered as a single storage system for the introduction of redundancy in information stored. For redundant data storage on board the UAV uses redundant modular polynomial codes. The proposed method provides the ability to restore the integrity of the data subjected to the destructive influence, and thus the physical loss of a predetermined maximum number of UAV does not lead to a partial or complete loss of it.

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты, китайская теорема об остатках, криптография, модулярная арифметика, полиномиальные классы вычетов, помехоустойчивое кодирование в классах вычетов, система остаточных классов, целостность информации.

**Key words:** unmanned aerial vehicles, the Chinese remainder theorem, cryptography, modular arithmetic, polynomial residue classes, noiseless coding in residue classes, the system of residual classes, the integrity of the information.

### Введение

На сегодняшний день комплексы с БЛА находят все большее применение для решения различных специальных задач (воздушная разведка, получение высокоточной геопространственной информации о местности, топогеодезическое и навигационное обеспечение) в интересах силовых структур. Как известно, БЛА можно классифицировать – в зависимости от типа управления на дистанционно-пилотируемые и автономные, к последним из которых проявляется все больший интерес, обусловленный возможностью их группового применения [1].

### Постановка задачи и обоснование метода исследования

Привлекательность автономной группы БЛА определяется многими факторами. Во-первых, многообразие решаемых задач, где их количество, сложность и приоритет динамически изменяются, как и среда функционирования. Во-вторых, такая система постоянно оценивает и в случае необходимости перераспределяет ресурсы, тем самым адаптируясь для преодоления возникших изменений среды функционирования [2].

На рисунках 1–3 представлены варианты структуры возможной организации взаимодействия (централизованной и децентрализованной) автономной группы БЛА.

Представленная на рисунке 1 схема взаимодействия автономной группы БЛА образующая централизованную сеть, где центральный узел (наземный пункт управления), осуществляет координацию всех компонентов сети. Такая топология позволяет организовать взаимодействие комплексов группы исключительно через наземный пункт управления (НПУ), что в свою очередь, создает некоторую задержку в информационном обмене между БЛА. Более того радиус действия таких систем ограничивается реализуемой мощностью сигнала радиопередающего устройства. При этом НПУ является «ядром» сети, деструктивное воздействие злоумышленника на которое может ее разрушить.

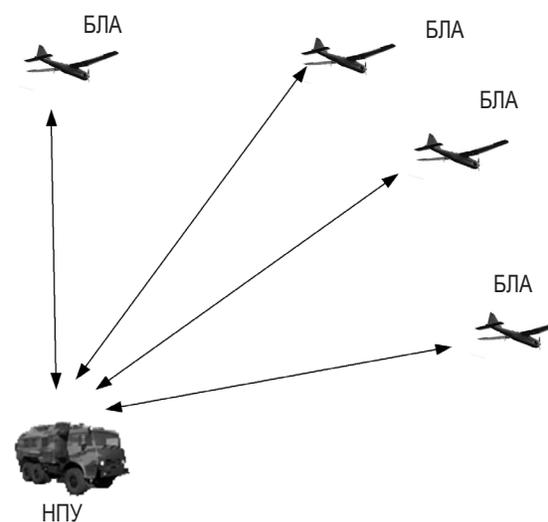


Рис. 1. Пример использования стандартного канала радиосвязи группы БЛА с наземным пунктом управления.

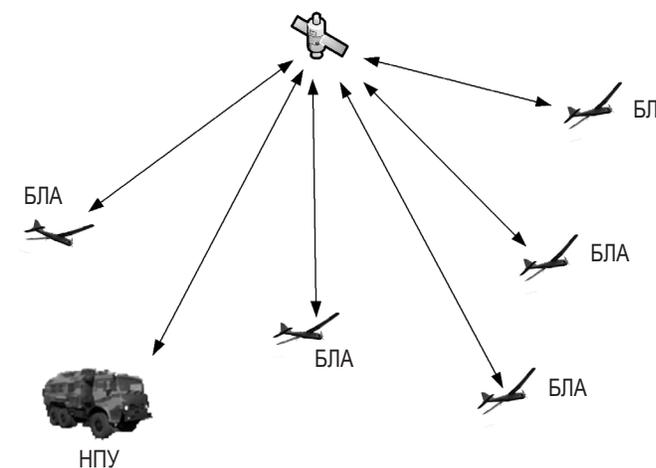


Рис. 2. Пример использования спутникового канала связи группы БЛА.

Организация взаимодействия БЛА с НПУ посредством спутниковых каналов связи (рис. 2) значительно расширяет радиус действия БЛА за счет зоны покрытия спутника, но в то же время значительное расстояние между спутником и БЛА, а также возможные препятствия для информационного сигнала снижают интенсивность информационного обмена [3].

На рисунке 3 представлена структура специальной децентрализованной самоорганизующейся радиосети автономной группы БЛА (типа когнитивной радиосети, MANET, FANET), лишенная вышеуказанных недостатков, где каждый БЛА основываясь на «равноправии», обеспечивает передачу данных для НПУ через другие БЛА в сети. Учитывая ограниченный диапазон беспроводной связи и мобильности автономной группы БЛА определение того, какому БЛА пересылать данные, производится динамически, на основании связности радиосети в некоторый момент времени  $t$  (рис. 4).

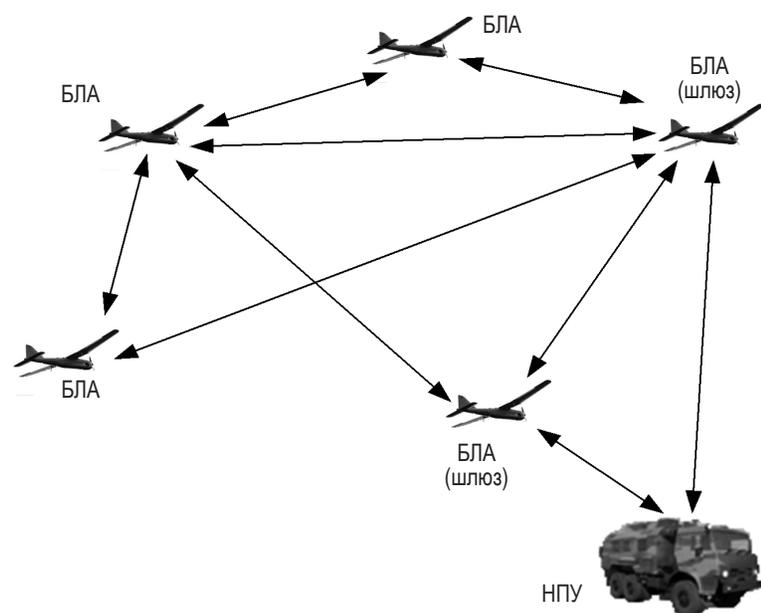


Рис. 3. Структура специальной децентрализованной самоорганизующейся сети автономной группы БЛА.

Рассматриваемая структура радиосети автономной группы БЛА в традиционном понимании по ряду признаков и выполняемых функций (сбор, хранение, обработка и распространение информации) может быть интерпретирована как информационная система обработки информации. Опираясь сформулированный в трудах А.А. Богданова «Тектология» системный закон «наиболее слабого звена» в соответствии, с которым эффективность системы определяется наименее «развитой» подсистемой, то можно говорить, что эффективность функционирования (выполнения специальных заданий) автономной группой БЛА во многом определяется и от устойчивого функционирования подсистемы сбора, хранения и обработки информации. При этом необходимо учитывать характерную особенность таких систем, выражающуюся в существенной зависимости от коммуникационных возможностей.

Иными словами, коммуникационная среда (канал радиосвязи) подвержена(ы) влиянию деструктивных воздействий, в частности непреднамеренных и преднамеренных помех. Причинами возникновения непреднамеренных (случайных) помех являются: тепловой шум, атмосферные, космические помехи и др. Возникновение преднамеренных помех обусловлено несостоятельностью канала связи по противодействию различным атакам злоумышленника. Так, злоумышленник может осуществлять пассивное наблюдение, или активные действия, направленные

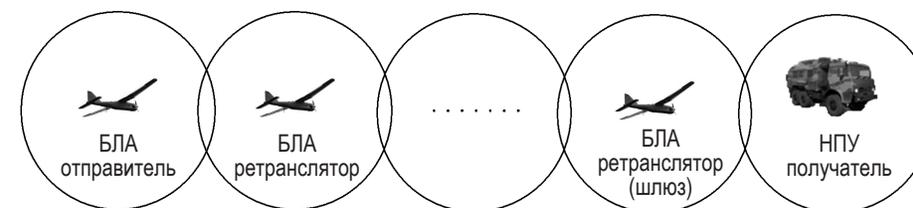


Рис. 4. Схема связности сети автономной группы БЛА в момент времени  $t$ .

на задержку сообщений, их повторную передачу или внесение искажений, заданной структуры, в том числе с сохранением конфигурации передаваемых информационных пакетов [4–5].

Под устойчивым функционированием информационной системы, в общем виде, понимается такое состояние системы, при котором обеспечивается возможность выполнения (реализации) функций по обработке информации. Под обработкой информации будем понимать совокупность операций сбора, накопления, ввода, вывода, приема, передачи, записи, хранения, регистрации, уничтожения, преобразования, отображения информации [6].

Нарушение качественных характеристик информации, определяющих ее пригодность в решении целевых функций автономной группы БЛА, может нанести неприемлемый ущерб субъектам информационного взаимодействия. В условиях непреднамеренных и преднамеренных помех при решении критически значимых задач вероятность получения ущерба значительно увеличивается.

Одним из ключевых требований по обеспечению качественных характеристик, предъявляемым к информации, является обеспечение ее *целостности* на всех этапах жизненного цикла.

Под *целостностью информации* понимается, состояние информации, при котором отсутствует любое ее изменение либо изменение осуществляется только преднамеренно субъектами, имеющими на него право [7].

Основываясь на положениях теории отказоустойчивости, целостность информации может быть обеспечена резервированием, дублированием или избыточным кодированием [8, 9]. Характерным недостатком присущим методам обеспечения отказоустойчивости и как следствие целостности является достаточно высокая избыточность контрольной информации. Вместе с тем известны и другие методы контроля и обеспечения целостности информации так называемые хэш-функции, отображающие входные данные произвольной длины в выходное значение фиксированного размера [10]. В свою очередь, хэш-функции можно классифицировать как криптографические и не криптографические, например, на основе контрольной суммы.

В соответствии с [11] для контроля целостности информации циркулирующей между БЛА и НПУ определено использование хэш-функций на основе контрольной суммы, базирующейся на методах помехоустойчивого кодирования, в частности циклического избыточного кода (Cyclic Redundancy Code CRC).

В большинстве случаев указанные способы эффективно обеспечивают и контролируют целостность информации на микроуровне для одного БЛА. Однако автономная группа БЛА, взаимодействие которой образует пространственно-распределенную масштабируемую систему обработки информации с непредсказуемо и динамически изменяющейся структурой, формирует макроуровень, в рамках которого задача обеспечения и контроля целостности информации не определена.

Рассмотрим автономную группу БЛА, состоящую из  $k$  комплексов и представляющую собой гомогенную радиосеть (например, когнитивная). При этом выход из строя отдельных БЛА, обусловленных отказами, непреднамеренными и преднамеренными помехами могут вызвать сбой при передаче (доставке) сообщений для НПУ. Так, в момент времени  $t$  в условиях воздействия помех структура радиосети автономной группы БЛА может быть представлена в виде графа  $G(S, U)$ , где ребра  $(S_i, S_j) \in U$  (являются смежными), когда  $S_i$  и  $S_j$  БЛА функционируют в пределах сети (обеспечивается дальность передачи) и отсутствуют препятствия обусловленные воздействиями помех (рис. 5).

Влияние непреднамеренных и преднамеренных помех на  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) БЛА или каналы радиосвязи, могут носить временный характер, соответственно вышедший из состава радиосети БЛА, может возобновить свое функционирование, но передача или прием информации будет существенно задержана. В то же время физическая утрата (потеря) БЛА (деградация автономной группы БЛА) приведет к частичной потере или полной утрате информации и как следствие к снижению эффективности функционирования (нарушению целевой функции) автономной группы БЛА. В таких условиях обеспечение и контроль целостности информации для автономной группы БЛА может быть осуществлен следующим образом: совокупность запоминающих устройств, размещенных на борту различных, но объединенных единой целью функционирования БЛА, рассматривается как единая система запоминающих устройств, предусматривающая введение избыточности в сохраняемую информацию.

Для организации системы избыточного хранения информации на бортах БЛА воспользуемся избыточными модулярными кодами, интерес к которым обусловлен рядом преимуществ, в частности: код является максимальным, т. е. при заданной длине и размерности обладает наибольшим кодовым расстоянием  $\max \{d_{\min}\}$  [12–14]; обеспечивает единый способ представления данных на борту БЛА и в радиосети; обеспечивает устойчивость к различным видам воздействия [5].

Математический аппарат модулярных полиномиальных кодов основывается на фундаментальных положениях Китайской теоремы об остатках для многочленов [12].

**Решение задачи.** Пусть  $m_1(z), m_2(z), \dots, m_k(z) \in F[z]$  неприводимые полиномы, упорядоченные по возрастанию степеней, т. е.  $\deg m_1(z) \leq \deg m_2(z) \leq \dots \leq \deg m_k(z)$ , где  $\deg m_i(z)$  – степень полинома. Причем  $\gcd(m_i(z), m_j(z)) = 1, i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, k$ .

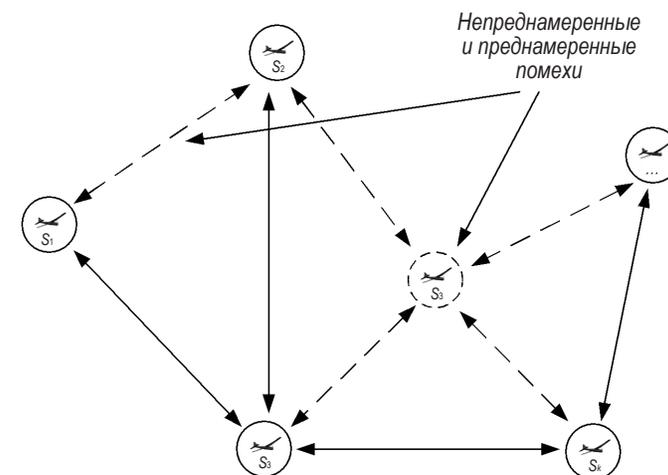


Рис. 5. Структура сети автономной группы БЛА в момент времени  $t$  в условиях непреднамеренных и преднамеренных помех.

$$\text{Положим } P(z) = \prod_{i=1}^k m_i(z).$$

Тогда отображение  $\varphi$  устанавливает взаимно-однозначное соответствие между полиномами  $a(z)$ , не превосходящими по степени  $P(z)$  ( $\deg a(z) < \deg P(z)$ ) и наборами остатков по приведенной выше системе оснований полиномов (модулей):

$$\varphi: F[z]/(P(z)) \rightarrow F[z]/(m_1(z)) \times \dots \times F[z]/(m_k(z)):$$

$$a(z) \mapsto \varphi(a(z)) := (\varphi_1(a(z)), \varphi_2(a(z)), \dots, \varphi_k(a(z))),$$

$$\text{где, } \varphi_i(a(z)) := a(z) \bmod m_i(z) \quad (i = 1, 2, \dots, k).$$

В соответствии с Китайской теоремой об остатках для многочленов существует обратное преобразование  $\varphi^{-1}$ , позволяющее переводит набор остатков по системе оснований полиномов к позиционному представлению [12]:

$$\varphi^{-1}: F[z]/(m_1(z)) \times \dots \times F[z]/(m_k(z)) \rightarrow F[z]/(P(z)):$$

$$(c_1(z), c_2(z), \dots, c_k(z)) \mapsto a(z) = \sum_{i=1}^k c_i(z) B_i(z) - r(z) P(z) \quad (1)$$

где  $B_i(z) = k_i(z) P_i(z)$  – полиномиальные ортогональные базисы,

$$k_i(z) = P_i^{-1}(z) \bmod m_i(z),$$

$$P_i(z) = \frac{P(z)}{m_i(z)}, \quad r(z) - \text{ранг } a(z) \quad (i = 1, 2, \dots, k).$$

Введем, вдобавок к имеющимся  $k$ , еще  $r$  избыточных оснований  $m_{k+1}(z), m_{k+2}(z), \dots, m_{k+r}(z)$ , полиномов с соблюдением условия упорядоченности:

$$\deg m_1(z), \dots, \deg m_k(z) \leq \dots \leq \deg m_{k+r}(z), \quad (2)$$

тогда получим *расширенный модулярный полиномиальный код (МПК)* – множество вида:

$$C := \{(c_1(z), \dots, c_k(z), c_{k+1}(z), \dots, c_n(z))\} : c_i(z) \equiv a(z) \pmod{m_i(z)}, \quad (3)$$

где  $n = k + r$ ,  $c_i(z) \equiv a(z) \pmod{m_i(z)}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $a(z) \in F[z]/(P(z))$ .

Элементы кода  $c_i(z)$  назовем символами, каждый из которых суть полиномы из фактор-кольца многочленов по модулю  $m_i(z)$ :  $F[z]/(m_i(z))$ . Назовем  $P(z) = \prod m_i(z)$  – рабочим диапазоном системы,  $N(z) = \prod m_i(z)$  – полным диапазоном системы. При этом если  $a(z) \notin F[z]/(P(z))$ , то считается, что данная комбинация содержит ошибку. Следовательно, местоположение полинома  $a(z)$  позволяет определить: является ли кодовая комбинация  $a(z) = (c_1(z), \dots, c_k(z), c_{k+1}(z), \dots, c_n(z))$  разрешенной или она содержит ошибочные символы.

Введем метрику. *Весом кодового слова* расширенного МПК является количество ненулевых символов (вычетов)  $c_i(z)$ ,  $1 \leq i \leq n$ , обозначается, как  $w(C)$ .

*Кодовое расстояние* между  $C$  и  $D$  определяется как вес их разности. *Минимальное кодовое расстояние* – наименьшее расстояние между двумя любыми кодовыми векторами по Хэммингу с учетом данного определения веса

$$d_{\min} = \min\{d(\{C\}, \{D\}) : \{C\}, \{D\} \in \zeta, \{C\} \neq \{D\}\},$$

где  $\zeta$  – кодовое пространство.

Минимальное кодовое расстояние  $d_{\min}$  связано с корректирующими способностями расширенного МПК. Так как два кодовых слова отличаются, по крайней мере, в  $d_{\min}$  вычетах, то невозможно изменить одно кодовое слово на другое путем замены  $d_{\min} - 1$  или меньшего количества вычетов. Таким образом, расширенный МПК может гарантированно обнаружить любые  $d_{\min} - 1$  ошибочных вычетов. Если  $b$  наибольшее целое число, меньшее или равное  $\lfloor \frac{d_{\min} - 1}{2} \rfloor$ , то для  $b$  или меньшего числа ошибочных вычетов, результирующее кодовое слово остается ближе к исходному, что позволяет расширенному МПК гарантированно исправлять  $b$  ошибочных вычетов. Пусть  $S_i$  БЛА формирует набор данных  $W$ , представленный в полиномиальной форме:

$$W(z) = \sum_{i=0}^{s-1} w_j z^j = w_{s-1} z^{s-1} + w_{s-2} z^{s-2} + \dots + w_0,$$

$$w_j \in \{0, 1\} \quad (j = s - 1, s - 2, \dots, 0).$$

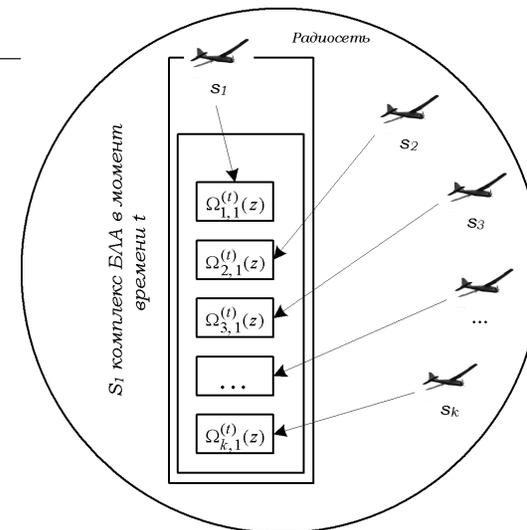


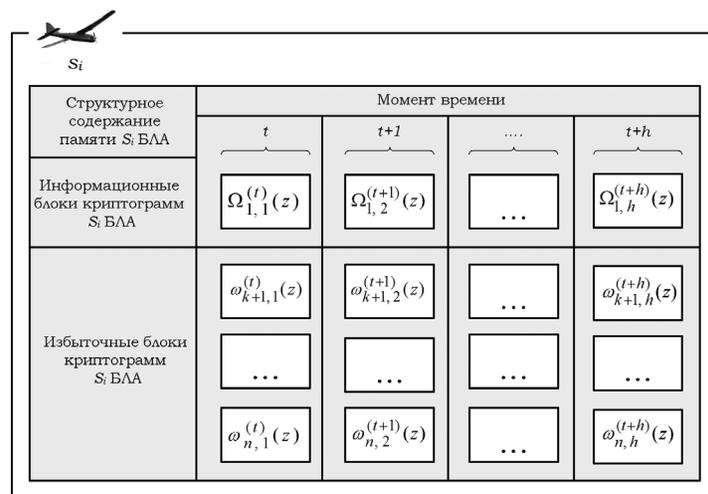
Рис. 6. Структурная схема, поясняющая принцип формирования информационных блоков криптограмм  $S_i$  БЛА (принимающего).

С целью обеспечения необходимого уровня конфиденциальности\* информации сформированный набор данных  $W(z)$   $S_i$  БЛА подлежит процедуре зашифрования, для чего разбивается на блоки фиксированной длины  $W(z) = W_1(z) | W_2(z) | \dots | W_k(z)$ , где  $|$  – операция конкатенации. Причем длина блока данных определяется используемым алгоритмом шифрования.

Далее,  $S_i$  БЛА (передающий) на основании связности радиосети в момент времени  $t$  осуществляет передачу блоков криптограмм между другими (доступными) комплексами БЛА, т. е.  $S_i$  БЛА (принимающий) принимает и сохраняет совокупность блоков криптограмм  $\Omega_i(z)$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) от других комплексов автономной группы БЛА в подсистеме хранения информации. Полученную совокупность информационных блоков криптограмм  $\Omega_i(z)$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ )  $S_i$  БЛА представим в виде наименьших неотрицательных вычетов по основаниям полиномам  $m_j(z)$ , где  $i \neq j$ ;  $i, j = 1, 2, \dots, k$ . Причем  $\deg \Omega_i(z) < \deg m_j(z)$ . Структурная схема, поясняющая принцип формирования совокупности информационных блоков криптограмм на борту  $S_i$  БЛА (принимающего) представлена на рисунке 6.

Далее, в подсистеме кодирования информации  $S_i$  БЛА в соответствии с выражением (3) по дополнительно введенным  $r$  избыточным основаниям полиномам  $m_{k+1}(z), m_{k+2}(z), \dots, m_n(z)$ , удовлетворяющим условию (2) таким, что  $\gcd(m_i(z), m_j(z)) = 1$ , для  $i \neq j$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, n$  вырабатываются избыточные вычеты, которые обозначим как  $\omega_j(z)$  ( $j = k + 1, k + 2, \dots, n$ ). Полученная совокупность информационных и избыточных блоков криптограмм образует расширенный МПК:  $\{\Omega_1(z), \dots, \Omega_k(z), \omega_{k+1}(z), \dots, \omega_n\}$  МПК.

\* Использование программного обеспечения SkyGrabber иракскими повстанцами позволило осуществить перехват потока данных передаваемых по спутниковым каналам связи с комплекса БЛА MQ-1 Predator, что позволяло прогнозировать районы предполагаемых ударов. Отсутствие криптографической защиты информации было обусловлено повышением производительности комплекса.

Рис. 7. Схема содержания памяти  $S_i$  БЛА.

После вычисления избыточных элементов МПК принятая совокупность информационных блоков криптограмм от других БЛА удаляется для снижения общего объема данных. Вычисленные избыточные блоки криптограмм  $\omega_{k+1}(z)$ ,  $\omega_{k+2}(z)$ , ...,  $\omega_n(z)$  поступают в подсистему хранения информации.

Структура формируемых данных в памяти  $S_i$  БЛА представлена на рисунке 7.

Отсутствие фиксированной инфраструктуры и централизованного управления, обусловленное динамически самоорганизующейся топологией построения сети радиосвязи, гомогенностью автономной группы БЛА, позволяет совокупность запоминающих устройств (памяти), размещенных на борту различных БЛА, рассматривать как единую систему памяти, а ее содержимое представить в виде информационной матрицы:

$$A = \begin{vmatrix} \Omega_{1,1}^{(t)}(z) & \Omega_{1,2}^{(t+1)}(z) & \Omega_{1,3}^{(t+2)}(z) & \dots & \Omega_{1,h}^{(t+h)}(z) \\ \Omega_{2,1}^{(t)}(z) & \Omega_{2,2}^{(t+1)}(z) & \Omega_{2,3}^{(t+2)}(z) & \dots & \Omega_{2,h}^{(t+h)}(z) \\ \Omega_{3,1}^{(t)}(z) & \Omega_{3,2}^{(t+1)}(z) & \Omega_{3,3}^{(t+2)}(z) & \dots & \Omega_{3,h}^{(t+h)}(z) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \Omega_{k,1}^{(t)}(z) & \Omega_{k,2}^{(t+1)}(z) & \Omega_{k,3}^{(t+2)}(z) & \dots & \Omega_{k,h}^{(t+h)}(z) \end{vmatrix}$$

С учетом вычисленных избыточных блоков криптограмм  $S_i$  БЛА информационная матрица  $A$  примет «расширенный» вид (табл. 1).

Табл. 1.

Блоки криптограмм	Момент времени				
	$t$	$t+1$	$t+2$	...	$t+h$
Информационные блоки криптограмм в памяти $S_i$ БЛА	$\Omega_{1,1}^{(t)}(z)$	$\Omega_{1,2}^{(t+1)}(z)$	$\Omega_{1,3}^{(t+2)}(z)$	...	$\Omega_{1,h}^{(t+h)}(z)$
Информационные блоки криптограмм в памяти других БЛА группы	$\Omega_{2,1}^{(t)}(z)$	$\Omega_{2,2}^{(t+1)}(z)$	$\Omega_{2,3}^{(t+2)}(z)$	...	$\Omega_{2,h}^{(t+h)}(z)$
	$\Omega_{3,1}^{(t)}(z)$	$\Omega_{3,2}^{(t+1)}(z)$	$\Omega_{3,3}^{(t+2)}(z)$	...	$\Omega_{3,h}^{(t+h)}(z)$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$\Omega_{k,1}^{(t)}(z)$	$\Omega_{k,2}^{(t+1)}(z)$	$\Omega_{k,3}^{(t+2)}(z)$	...	$\Omega_{k,h}^{(t+h)}(z)$
Избыточные блоки криптограмм в памяти $S_i$ БЛА	$\omega_{k+1,1}^{(t)}(z)$	$\omega_{k+1,2}^{(t+1)}(z)$	$\omega_{k+1,3}^{(t+2)}(z)$	...	$\omega_{k+1,h}^{(t+h)}(z)$
	$\omega_{n,1}^{(t)}(z)$	$\omega_{n,2}^{(t+1)}(z)$	$\omega_{n,3}^{(t+2)}(z)$	...	$\omega_{n,h}^{(t+h)}(z)$

Тогда целостность информации автономной группы БЛА определяется системой функций от переменных  $c_{ij}(z)$  (блоков криптограмм) расширенной матрицы  $A$ :

$$\begin{cases} f_t(\Omega_{1,1}^{(t)}(z), \Omega_{2,1}^{(t)}(z), \dots, \Omega_{k,1}^{(t)}(z), \omega_{k+1,1}^{(t)}(z), \omega_{n,1}^{(t)}(z)) = a_t(z), \\ f_{t+1}(\Omega_{1,2}^{(t+1)}(z), \Omega_{2,2}^{(t+1)}(z), \dots, \Omega_{k,2}^{(t+1)}(z), \omega_{k+1,2}^{(t+1)}(z), \omega_{n,2}^{(t+1)}(z)) = a_{t+1}(z), \\ f_{t+2}(\Omega_{1,3}^{(t+2)}(z), \Omega_{2,3}^{(t+2)}(z), \dots, \Omega_{k,3}^{(t+2)}(z), \omega_{k+1,3}^{(t+2)}(z), \omega_{n,3}^{(t+2)}(z)) = a_{t+2}(z), \\ \dots \\ f_{t+h}(\Omega_{1,h}^{(t+h)}(z), \Omega_{2,h}^{(t+h)}(z), \dots, \Omega_{k,h}^{(t+h)}(z), \omega_{k+1,h}^{(t+h)}(z), \omega_{n,h}^{(t+h)}(z)) = a_{t+h}(z). \end{cases}$$

Для нахождения значения полиномов  $a_i(z)$  через значения координат функций  $f_i$  воспользуемся выражением (1). Элементы кодового слова  $\Omega_{1,j}^{(i)*}(z), \dots, \Omega_{k,j}^{(i)*}(z), \dots, \omega_{k+1,j}^{(i)*}(z), \dots, \omega_{n,j}^{(i)*}(z)$  ( $i = t, t+1, \dots, t+h$ ;  $j = 1, 2, \dots, h$ ) из совокупности запоминающих устройств и, соответственно, блоки открытых данных  $W_1^*(z), W_2^*(z), \dots, W_k^*(z)$  могут содержать ис-

кажения. Критерием отсутствия обнаруживаемых ошибок является выполнение условия  $a_i^*(z) \in F[z]/(P(z))$ . Критерием существования обнаруживаемой ошибки – выполнение условия:  $a_i^*(z) \notin F[z]/(P(z))$ , где символ «\*» указывает на наличие возможных искажений в кодовом слове. В случае физической утраты некоторой предельной численности БЛА совокупность запоминающих устройств, представленная в виде расширенной матрицы  $A$  примет вид (табл. 2).

С учетом заранее введенной избыточности в сохраняемую информацию физическая утрата БЛА не приводит к полной или частичной потере информации и позволяет выполнить процедуру восстановления потерянной или искаженной информации, путем вычисления наименьших вычетов или любым другим известным методом декодирования избыточных МПК [15]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega_{1,1}^{(t)**}(z) \equiv a_t^*(z) \pmod{m_1(z)}, \\ \Omega_{2,1}^{(t)**}(z) \equiv a_t^*(z) \pmod{m_2(z)}, \\ \dots \\ \Omega_{k,1}^{(t)**}(z) \equiv a_t^*(z) \pmod{m_k(z)}, \\ \Omega_{1,2}^{(t+1)**}(z) \equiv a_{t+1}^*(z) \pmod{m_1(z)}, \\ \Omega_{2,2}^{(t+1)**}(z) \equiv a_{t+1}^*(z) \pmod{m_2(z)}, \\ \dots \\ \Omega_{k,2}^{(t+1)**}(z) \equiv a_{t+1}^*(z) \pmod{m_k(z)}, \\ \dots \\ \Omega_{1,h}^{(t+h)**}(z) \equiv a_{t+h}^*(z) \pmod{m_1(z)}, \\ \Omega_{2,h}^{(t+h)**}(z) \equiv a_{t+h}^*(z) \pmod{m_2(z)}, \\ \dots \\ \Omega_{k,h}^{(t+h)**}(z) \equiv a_{t+h}^*(z) \pmod{m_k(z)}. \end{array} \right.$$

где символы «\*\*» указывают на вероятностный характер восстановления.

### Выводы

Таким образом, представленный метод обеспечения целостности информации в автономной группе БЛА, основанный на положениях модулярной арифметики, позволяет получить важные преимущества, направленные на обеспечение безопасности циркулирующей информации и как следствие, повышает эффективность функционирования (решение целевой функции) автономной группы БЛА.

Табл. 2.

Блоки криптограмм	Момент времени				
	$t$	$t+1$	$t+2$	...	$t+h$
Информационные блоки криптограмм в памяти S, БЛА	$\Omega_{1,1}^{(t)}(z)$	$\Omega_{1,2}^{(t+1)}(z)$	$\Omega_{1,3}^{(t+2)}(z)$	...	$\Omega_{1,h}^{(t+h)}(z)$
Информационные блоки криптограмм в памяти других БЛА группы	$\Omega_{2,1}^{(t)}(z)$	$\Omega_{2,2}^{(t+1)}(z)$	$\Omega_{2,3}^{(t+2)}(z)$	...	$\Omega_{2,h}^{(t+h)}(z)$
	0	0	0	...	0
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$\Omega_{k,1}^{(t)}(z)$	$\Omega_{k,2}^{(t+1)}(z)$	$\Omega_{k,3}^{(t+2)}(z)$	...	$\Omega_{k,h}^{(t+h)}(z)$
Избыточные блоки криптограмм в памяти S, БЛА	$\omega_{k+1,1}^{(t)}(z)$	$\omega_{k+1,2}^{(t+1)}(z)$	$\omega_{k+1,3}^{(t+2)}(z)$	...	$\omega_{k+1,h}^{(t+h)}(z)$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	$\omega_{n,1}^{(t)}(z)$	$\omega_{n,2}^{(t+1)}(z)$	$\omega_{n,3}^{(t+2)}(z)$	...	$\omega_{n,h}^{(t+h)}(z)$

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Unmanned Aircraft Systems (UAS) Roadmap, 2005–2030. [Электронный ресурс]. URL: [https://fas.org/irp/program/collect/uav\\_roadmap2005.pdf](https://fas.org/irp/program/collect/uav_roadmap2005.pdf) (дата обращения 6.09.2016).
2. Timofeev A.V. Neural Multi-Agent Control of Robotic Systems // Proceedings of International Conference on Informatics and Control. St. Petersburg. 1997.V.2. №3. P. 537–542.
3. Jun Li, Yifeng Zhou, and Louise Lamont. Communication Architectures and Protocols for Networking Unmanned Aerial Vehicles. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/269304589\\_Communication\\_architectures\\_and\\_protocols\\_for\\_networking\\_unmanned\\_aerial\\_vehicles.pdf](https://www.researchgate.net/publication/269304589_Communication_architectures_and_protocols_for_networking_unmanned_aerial_vehicles.pdf) (дата обращения 7.09.2016).
4. Кловский Д.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. М.: Радио и связь, 1982.

5. Самойленко Д.В., Финько О.А. Имитоустойчивая передача данных в защищенных системах однонаправленной связи на основе полиномиальных классов вычетов // Нелинейный мир. 2013. Т.11. № 9. С. 647–659.
6. ГОСТ Р 51275-2006. Защита информации. Факторы воздействующие на информацию. Общие положения. М.: Стандартинформ. 2007.
7. Рекомендации по стандартизации Р 50.1.053-2005. Основные термины и определения в области технической защиты информации. М.: Стандартинформ. 2006.
8. Хетагуров Я.А., Руднев Ю.П. Повышение надежности цифровых устройств методами избыточного кодирования. М.: Энергия, 1974.
9. Verdel, Thomas. Duplication-based concurrent error detection in asynchronous circuits // DFT 2002. Proceedings. 17 th IEEE International Symp. 2002. P. 345–353.
10. Ван Тилборг Х.К.А Основы криптологии. Профессиональное руководство и интерактивный учебник. М.: Мир, 2006.
11. Standardization Agreement (STANAG) 7023/AEDP-9 NATO Primary Image Format. [Электронный ресурс]. URL: [www.nato.int/structur/AC/224/standart/7023/7023.html](http://www.nato.int/structur/AC/224/standart/7023/7023.html) (дата обрац. 7.09.2016).
12. Mandelbaum D.M. On Efficient Burst Correcting Residue Polynomial Codes // Information and control. 1970. p. 319–330.
13. Акушский И.Я., Юдицкий Д.М. Машинная арифметика в остаточных классах. М.: Советское радио, 1968.
14. Mandelbaum D.M. A method of coding for multiple errors // IEEE Trans. On Information Theory. 1968. 14(3). p. 518–521.
15. Червяков Н.И., Нагорнов Н.Н. Коррекция ошибок при передаче и обработке информации, представленной в СОК, методом синдромного декодирования // Наука. Инновации. Технологии. 2015. № 2. С. 15–41.

УДК 621.391

Цимбал В.А. [Tsimbal V.A.],  
Сорокин О.И. [Sorokin O.I.],  
Лягин М.А. [Lyagin M.A.],  
Бережной А.А. [Berezhnoy A.A.],  
Крючков Н.В. [Kruchkov N.V.],  
Хоптар В.В. [Hoptar V.V.]

## ПРАВИЛА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА КОНЕЧНОЙ МАРКОВСКОЙ ЦЕПИ, ОПИСЫВАЮЩЕЙ ДОВЕДЕНИЕ МНОГОПАКЕТНОГО СООБЩЕНИЯ В СОЕДИНЕНИИ «ТОЧКА-ТОЧКА»\*

**Rules of the automated synthesis final markovskoy a chain describing finishing of the multipack-age message in connection “point-point”**

В статье рассматривается применение объектно-временных графов для корректного отображения процесса гарантированного доведения кадра при различном количестве повторов и различном количестве пакетов (кадров) в многопакетном сообщении в логических соединениях «точка-точка», информационный обмен в которых осуществляется по протоколу канального уровня типа X.25. Разработаны правила для автоматизированного синтеза матрицы переходных вероятностей и матрицы шагов переходов, необходимых для исследования оперативности (по вероятностно – временным характеристикам) доставки многопакетных сообщений в системах передачи данных с различными параметрами. Разработанный научно-методический аппарат является основой для дальнейшего исследования зависимости вероятности оперативного доведения многопакетных сообщений в системах передачи данных с различными параметрами: количество источников, квитанций, получателей, а также при разной длине пакета, квитанции, скорости передачи информации.

In article application of objective-time counts for correct display of process of finishing of a shot is considered at various quantity of repetitions and various quantity of packages (shots) in the multipackage message in logic connections “point-point” the information exchange in which is carried out under the report of channel level of type X.25. Rules are developed for the automated synthesis of a matrix of transitive probabilities and a matrix of steps of the transitions necessary for research of efficiency (under is likelihood-time characteristics) deliveries of multipackage messages in systems of data transmission with various parametres. Developed scientific and methodological apparatus is the basis for further study of the dependence of the probability of prompt delivery of multipackage messages in data transmission systems with different parameters: the number of sources, receipts, recipient, and also at different length of the package, the receipt, the transfer rate of information.

**Ключевые слова:** поглощающая конечная марковская цепь, многопакетное сообщение, система передачи данных, вероятностно-временные характеристики, радиоканал, объектно-временной граф.

**Key words:** absorbing final markovskoy a chain, the multipackage message, data transmission system, is likelihood-time characteristics, a radio channel, the object-time count.

\* Работа подготовлена в рамках II Международной конференции «Параллельная компьютерная алгебра и ее приложения в новых инфокоммуникационных системах».

**1. Введение.** Формирование информационного пространства между рассредоточенными объектами на значительных территориях, как правило, реализуется с помощью соответствующих радиоканалов, в качестве которых выступают либо радиоканалы декаметрового диапазона, либо метрового диапазона. Отличительной особенностью таких каналов является то, что скорости передачи в них невысоки и находятся в пределах от 0,3 до 36 кбит/с, при этом качество канала связи, определяемое вероятностью битовой ошибки, невысокое: она в таких каналах лежит в пределах  $10^{-2} - 10^{-4}$  [1, 2].

**2. Теоретический анализ.** Формирование логического соединения типа «точка – точка» в системах передачи данных (СПД), реализованных на таких каналах, как правило, осуществляется с помощью протокола X.25, который сравнительно давно стандартизирован и широко применяется на практике. Особенностью этого протокола является использование решающей обратной связи для обеспечения требуемой достоверности доставки сообщений, что реализуется в СПД способом квитирования переданного кадра (кадров) [3].

На практике по указанным каналам приходится доставлять значительные объемы информации, что требует передачи такой информации в виде многопакетных сообщений (МПС). Вопросам оценки характеристик доставки однопакетных сообщений по протоколу X.25 уделено достаточное внимание в различных работах [4]. Однако вопросы оценки оперативности передачи МПС в данном протоколе рассмотрены недостаточно полно.

**3. Методы исследований.** При анализе передачи МПС по протоколу X.25 возникает задача корректного описания данного процесса в виде адекватной математической модели с целью нахождения вероятностно-временных и временных характеристик (ВВХ, ВХ) оперативности доставки МПС. Наиболее приемлемым математическим аппаратом для получения соответствующих моделей является теория поглощающих конечных марковских цепей (ПКМЦ) [5]. При использовании теории ПКМЦ основным этапом является синтез матрицы переходных вероятностей (МПВ), которая входит в уравнение Колмогорова-Чепмена (УКЧ), и, в свою очередь, базируется на синтезе графа состояний и переходов (ГСП) [5, 6].

Традиционно доставка однопакетного сообщения по протоколу X.25 моделируется ПКМЦ, ГСП которой представлен на рисунке 1.

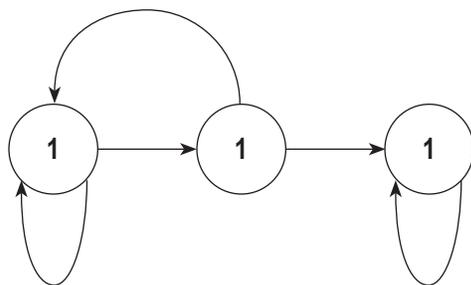


Рис. 1. ГСП доставки однопакетного сообщения по протоколу X.25.

Семантика представленного ГСП такова:

- 1 – звено передачи данных (ЗПД) – отправитель выдало очередной повтор кадра (пакета), но кадр на ЗПД-получателе не принят;
- 2 – ЗПД-получатель принял повтор кадра и выдало в ответ квитанцию;
- 3 – ЗПД-отправитель квитанцию получило.

Недостатком такого подхода является то, что в этом графе выделяется только одно поглощающее состояние, соответствующее доставке сообщения. Из физики процесса доставки следует, что поглощающих состояний в ПКМЦ должно быть два: одно – «сообщение доставлено», другое – «сообщение не доставлено». Кроме того, при передаче МПС в реальной системе связи всегда имеется конечное число возможных передач пакетов (кадров) от источника.

ГСП ПКМЦ, описывающие доведение многопакетного сообщения в логическом соединении «точка-точка», содержащие два поглощающих состояния и учитывающие конечное заданное число повторов каждого пакета при передаче МПС, были названы объектно-ориентированными графами [4].

Рассмотрим процесс доставки МПС с двумя пакетами, каждый из которых допускает два повтора. ГСП ПКМЦ такого процесса будет иметь следующий вид [4]:

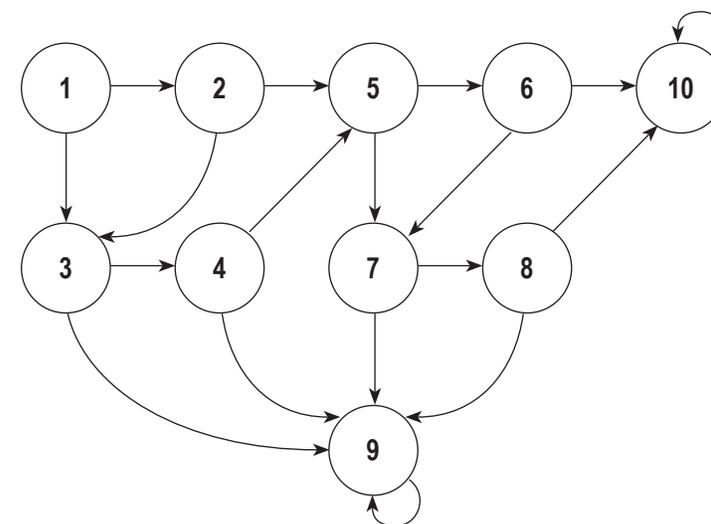


Рис. 2. ГСП доставки двухпакетного МПС по протоколу X.25.

Семантика ГСП ПКМЦ, представленного на рисунке, 2 такова:

- 1 – ЗПД-отправитель выдало первый повтор первого кадра (пакета), но кадр на ЗПД-получателе не принят;

- 2 – ЗПД-получатель принял повтор первого кадра и выдало в ответ квитанцию;
- 3 – после первого повтора первый кадр на ЗПД-получателе не принят, ЗПД – отправитель выдало второй повтор первого кадра, но кадр на ЗПД-получателе не принят;
- 4 – ЗПД-получатель принял повтор первого кадра и выдало в ответ квитанцию;
- 5 – ЗПД-отправитель получило квитанцию о доставке первого кадра и выдало второй кадр;
- 6 – ЗПД-получатель принял повтор второго кадра и выдало в ответ квитанцию;
- 7 – после первого повтора второй кадр на ЗПД-получателе не принят, ЗПД – отправитель выдало второй повтор кадра, но кадр на ЗПД-получателе не принят;
- 8 – ЗПД-получатель принял повтор второго кадра и выдало в ответ квитанцию;
- 9 – после второго повтора кадр или квитанция о доставке кадра на ЗПД-получателе не приняты;
- 10 – ЗПД-отправитель квитанцию получило.

Анализ этого ГСП показывает, что с увеличением числа пакетов в МПС и количества допустимых повторов передачи одного пакета такой граф существенно усложняется. Однако в нем имеются некие инварианты – сегменты графа, которые неизменны (ядро) (на рисунке 2 ядро – это совокупность взаимосвязанных состояний 1-2-3 или 5-6-7). Этот факт в потенциале позволяет создать некий алгоритм автоматического синтеза таких МПВ, а соответственно, и УКЧ, которое описывает искомый информационный обмен и позволяет найти ВВХ. Данные правила были составлены на базе метода математической индукции при анализе обобщенного ГСП, описывающего доставку МПС.

На рисунке 3 представлен обобщенный вид ГСП для такой ПКМЦ. Семантика его состояний соответствует семантике ГСП на рисунке 2.

В обобщенном ГСП выделяются уровни и блоки. Под уровнем понимается совокупность состояний ПКМЦ, находящихся на одной линии графа. Под блоком понимается совокупность ядер, структурированных в вертикальную конструкцию.

Номера состояний графа и их взаимосвязи отображаются переходными вероятностями, а последние, в свою очередь, определяются своими индексами. Исходя из изложенного, задача нахождения (синтеза) элементов МПВ выливается в задачу нахождения соответствующих им индексов.

Обозначим  $p_k$ ,  $p_{kb}$ ,  $q_k$ ,  $q_{kb}$  – вероятности доведения за один повтор кадра и квитанции соответственно, а также недоедания за один повтор кадра и квитанции соответственно. При этом

$$p_k = (1 - p_0)^{L_k}; \quad (1)$$

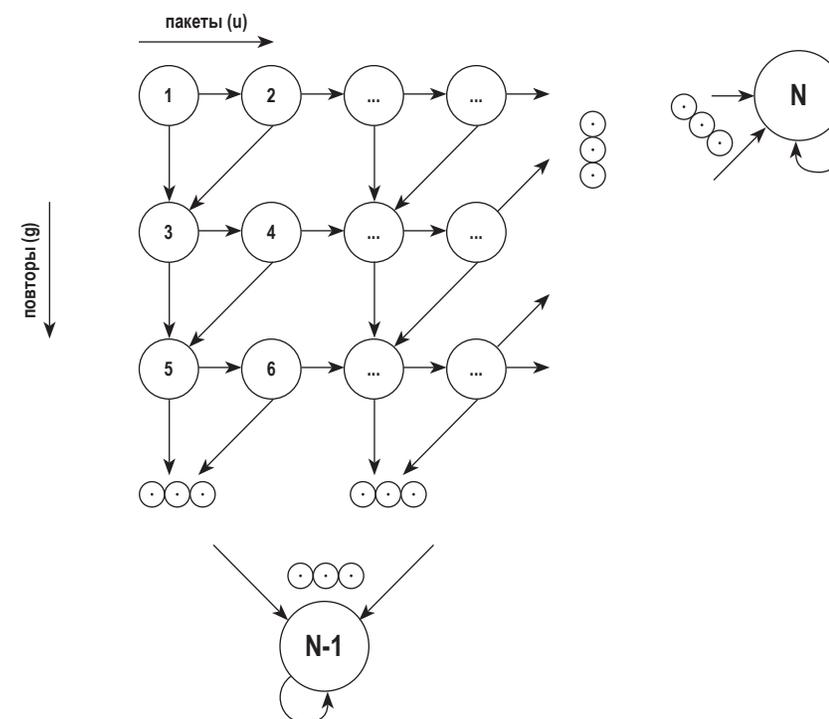


Рис. 3. Обобщенный вид ГСП для ПКМЦ, описывающей доведение МПС в соединении «точка-точка».

$$p_{kb} = (1 - p_0)^{L_{kb}}; \quad (2)$$

$$q_k = 1 - p_k; \quad (3)$$

$$q_{kb} = 1 - p_{kb}; \quad (4)$$

где  $L_k$  – длина передаваемого кадра в битах,  
 $L_{kb}$  – длина передаваемой квитанции в битах,  
 $p_0$  – вероятность битовой ошибки в каналах связи СПД.

#### 4. Правила для автоматизированного синтеза МПВ и МШП

Учитывая возможность СПД осуществлять передачу  $u$  пакетов с  $g$  повторами каждого пакета, количество состояний графа переходов будет равно

$$N = 2(ug + 1); \quad (5)$$

При этом нумерацию состояний графа будем вести с цифры 1. Тогда номер предпоследнего поглощающего состояния равен  $[2(ug + 1) - 1]$ .

**Правило 1.** Состояния процесса ГСП ПКМЦ нумеруются «слева-направо» и «сверху-вниз» по вертикальным блокам, описывающим заданное количество повторов для одного пакета с оставлением последнего номера за поглощающим состоянием «сообщение доставлено», занимающим крайнее правое место на 1-м уровне. Предпоследний номер ГСП ПКМЦ присваивается поглощающему состоянию, соответствующему состоянию «сообщение не доставлено», находящемуся на самом нижнем уровне. При этом количество блоков определяется количеством пакетов в МПС, а количество горизонтальных уровней определяется количеством повторов одного пакета, предусмотренных протоколом X.25 в конкретной СПД.

Для заполнения МПВ введем параметры  $i$  и  $j$ . Параметр  $i$  показывает номер строки МПВ, а параметр  $j$  показывает номер столбца.

Алгоритм этого синтеза следующий: пусть  $g$  – число повторов передачи одного пакета, а  $u$  – количество передаваемых пакетов, тогда:

**Правило 2.**  $p_{i+2,j+2} = p_k$  при  $1 \leq i \leq N-3$ ,  $2 \leq j \leq N-2$ ;

**Правило 3.**  $p_{i+2,j+2} = q_k$  при  $1 \leq i \leq N-3$ ,  
 $3 \leq j \leq 2(uq+1)-1$ , при  $1 \leq q \leq g$ ;

**Правило 4.**  $p_{i+2,j} = p_{kv}$  при  $1 \leq i \leq N-3$ ,  
 $2(uq+1) \leq j \leq 2(uq+1)-1$ , при  $1 \leq q \leq g$ ;

**Правило 5.**  $p_{i+2,j+2} = q_{kv}$  при  $2 \leq i \leq N-2$ ,  
 $3 \leq j \leq 2(uq+1)-1$ , при  $1 \leq q \leq g$ ;

**Правило 6.**  $p_{i,j} = 1$  при  $i = j = N-1$ ;

**Правило 7.**  $p_{i,j} = 1$  при  $i = j = N$ .

Остальные элементы матрицы равны нулю.

Стоит заметить, что при увеличении количества повторов в СПД увеличивается размерность МПВ и, соответственно, количество ненулевых элементов в ней.

Общее число ненулевых элементов МПВ равно

$$G_0 = 2(gu + 1) + 2ug. \quad (6)$$

Для решения задачи определения ВВХ по КМЦ при произвольной длине шага переходов с привязкой к реальному времени согласно методу «среднего шага переходов» ПКМЦ [5] строится матрица шагов переходов (МШП). Для автоматизации синтеза МШП будем использовать вышеперечисленные правила 1–7, при этом будем учитывать соответствие между вероятностями и шагами переходов:  $p_k \rightarrow \tau_k$ ,  $q_k \rightarrow \tau_k$ ,  $p_{kv} = q_{kv} \rightarrow \tau_{kv}$ , где знак  $\rightarrow$

есть символ соответствия. Ненулевой элемент предпоследней строки, обозначающий состояние неуспеха, а также ненулевой элемент последней строки – состояние успеха будут равны длительности тайм-аута, т.е.  $z = \tau_k + \tau_{kv}$  [5].

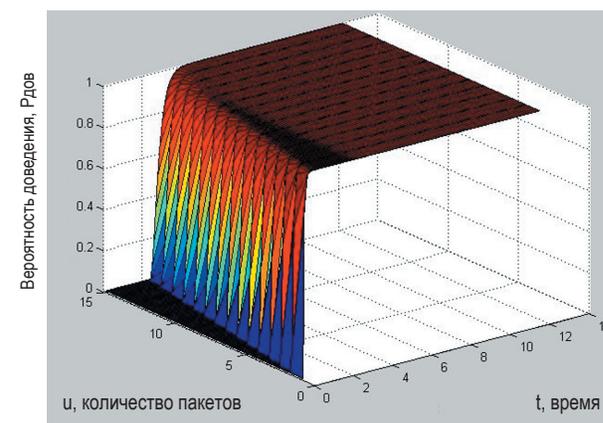
При этом  $\tau_k = L_k / V_{\text{ПИ}}$ ; (7)

$\tau_{kv} = L_{kv} / V_{\text{ПИ}}$ ; (8)

где  $V_{\text{ПИ}}$  – скорость передачи информации в СПД.

## 5. Результаты исследований

На базе указанных правил исследовалась оперативность (по ВВХ) доставки МПС в СПД со следующими параметрами: длина кадра  $L_{kv} = 128$  бит, длина квитанции  $L_k = 56$  бит, скорость передачи информации как в прямом так и в обратном каналах равна  $V_{\text{ПИ}} = 1200$  бит/с, вероятность ошибки  $p_0 = 10^{-3}$ . МПС содержит от 1 до 15 пакетов, максимально допустимое число повторов на каждый пакет равно 5. Отметим, что под ВВХ доставки МПС понимается вероятность его доведения (доставки) от времени. Трехмерные графики ВВХ представлены на рисунке 4.



**Рис. 4.** График зависимости ВВХ доставки МПС от ёмкости МПС и времени.

## 6. Заключение

Из графика рисунка 4 можно сделать следующие выводы.

1. График подтверждает физику процесса доведения МПС:
  - с течением времени вероятность доведения МПС увеличивается;
  - чем больше ёмкость МПС, тем больше количество времени требуется для достижения той же вероятности доведения.

2. Вероятность доведения не превышает значения, равного 1. Таким образом, сформированные правила автоматизированного синтеза конечной марковской цепи, описывающей доведение МПС в соединении «точка-точка» являются конструктивными и представляют собой научно-методический аппарат анализа ВВХ доставки МПС в СПД различного назначения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Основы сетей передачи данных. М.: ИНТУИТ.РУ «Интернет-университет информационных технологий», 2003.
2. Малофей О.П., Малофей А.О., Рассомахин С.Г. Нахождение оптимальных параметров передачи позиционных кодов в автоматизированных системах управления [Текст] // Наука. Инновации. Технологии: научный журнал Северо-Кавказского федерального университета. Ставрополь, 2014. № 1. С. 74-80.
3. ГОСТ Р 34.950-92 (ИСО 8208-87) Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Передача данных. Протокол пакетного уровня X.25 для оконечного оборудования данных. М.: «Ордена «Знак почета» Издательство стандартов», 1993.
4. Сорокин О.И., Лягин М.А., Бережной А.А., Хоптар В.В., Иванов С.Н. Особенности построения объектно-ориентированных графов поглощающих конечных марковских цепей, адекватно описывающих процесс доведения многопакетных сообщений на канальном уровне с протоколом типа X.25 при фиксированном числе повторов [Текст] // Междун. конф. «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (REDS-2016); Доклады; Серия: науч. конф. посвящ. Дню радио. Рос. науч.-техн. общ. радиотехн., электрон. и связи им. А.С. Попова. М.: БРИС-М, 2016. Вып. LXXI. С. 497-501.
5. Цимбал В.А. Информационный обмен в сетях передачи данных. Марковский подход: Монография. М.: Вузовская книга, 2014.
6. Кемени Джон Дж., Снелл Дж. Ларк. Конечные цепи Маркова / пер. с англ. М.: Наука, 1970.

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ, № 4, 2016

Червяков Н.И. [Chervyakov N.I.],  
Ляхов П.А. [Lyakhov P.A.],  
Валуева М.В. [Valueva M.V.],  
Криволапова О.В. [Krivolapova O.V.]

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СУММАТОРОВ НА FPGA\*

Comparative analysis of adders hardware  
implementation on FPGA

В данной работе рассмотрены два вида сумматоров, реализующие сложение двух двоичных чисел: с последовательным переносом и параллельно-префиксный. В статье произведено моделирование обеих архитектур на FPGA и их сравнительный анализ. Результаты моделирования для 4, 8, 16 и 32-разрядных устройств показали, что использование параллельно-префиксной архитектуры дает выигрыш в скорости до 41% по сравнению с последовательной архитектурой за счет увеличения аппаратных затрат до 71%. Сумматоры с параллельно-префиксной архитектурой стоит использовать для тех приложений, в которых главной задачей является достижение максимального быстродействия. С другой стороны, если требуется снижение аппаратных затрат и энергопотребления, то в этих случаях лучше использовать сумматор с последовательной архитектурой.

In this work we considered two types of adders for addition of two binary numbers implementation: carry propagate adders and parallel-prefix adders. In this article simulation on FPGA for both architectures and their comparative analysis is made. Simulation results for 4, 8, 16 and 32-bits circuits showed that parallel-prefix architecture using gives the gain in speed up to 41% compared to sequential architecture through increasing the hardware costs up to 71%. Parallel-prefix adders should use the for those applications, in which the maximization of speed is the main objective. On the other hand, carry propagate adder is better for hardware costs and power consumption decrease.

**Ключевые слова:** цифровое устройство, сумматор с последовательным переносом, параллельно-префиксный сумматор.

**Key words:** digital circuit, carry propagate adder, parallel-prefix adder.

#### Введение

В цифровой схемотехнике большое внимание уделяется скорости работы устройства. Одним из способов сокращения временных затрат является переход к параллельной архитектуре.

Сумматор – это базовое устройство, выполняющее операцию сложения двоичных чисел [1, 2]. Сумматоры входят в состав более сложных цифровых устройств, например, умножителей двоичных чисел [3]. В данной работе рассмотрены два вида сумматоров, реализующие сложение двух двоичных чисел: с последовательным переносом и параллельно-префиксный [4, 5]. Параллельно-префиксные сумматоры применяются в модулярной арифметике [6–10].

В работе проведено моделирование этих архитектур на FPGA и выполнен их сравнительный анализ.

\* Работа подготовлена в рамках II Международной конференции «Параллельная компьютерная алгебра и ее приложения в новых инфокоммуникационных системах».

**Сумматор с последовательным переносом**

Предположим,

что  $A = \overline{A_{n-1}}A_{n-2}\dots A_0$  и  $B = \overline{B_{n-1}}B_{n-2}\dots B_0$  – слагаемые,

а  $S = \overline{S_{n-1}}S_{n-1}\dots S_0$  является их суммой. Последовательное сложение может быть представлено схемой, изображенной на рисунке 1, оно осуществляется побитно с учетом бита переноса  $C_{in}$  с помощью алгоритма 1 [1, 11].

Алгоритм 1.

**СУММАТОР С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ПЕРЕНОСОМ**

Входные данные:  $A = \overline{A_{n-1}}A_{n-1}\dots A_0, B = \overline{B_{n-1}}B_{n-1}\dots B_0$

Переменные:  $C_{in}, C_{out}$

Вычисления:  $C_{in} = 0;$   
for  $i = 0, n-1$  do  
     $S_i = A_i \oplus B_i \oplus C_{in}$   
     $C_{out} = (A_i \wedge B_i) \vee (A_i \wedge C_{in}) \vee (B_i \wedge C_{in});$   
     $C_{in} = C_{out};$   
end for;  
 $S_n = C_{out};$

Выходные данные:  $S = \overline{S_{n-1}}S_{n-1}\dots S_0$

Каждый шаг цикла вычисляет бит суммы  $S_i$  и бит переноса  $C_{out}$  (рис. 2).

К достоинствам сумматора с последовательным переносом относится простота аппаратной реализации. Недостатком такого сумматора является большое время выполнения сложения, так как для вычисления каждого разряда необходимо знать результат вычислений предыдущего [2].

**Параллельный префиксный сумматор**

Параллельное сложение может быть представлено схемой, состоящей из трех стадий (рис. 3). На первой стадии осуществляется предварительное вычисление битов  $G_i$ , генерирующих перенос, битов  $P_i$ , передающих перенос, и полусумм  $H_i$ , для любого  $i, 0 \leq i \leq n-1$ :

$$G_i = A_i \vee B_i, P_i = A_i \vee B_i, H_i = A_i \oplus B_i \quad (1)$$

Вторая стадия сложения, называемая далее блоком вычисления переноса, вычисляет сигналы переноса  $C_i$ , для  $0 \leq i \leq n-1$ , используя  $G_i$  и  $P_i$ . На третьей стадии вычисляется сумма

$$S_i = H_i \oplus C_{i-1}. \quad (2)$$

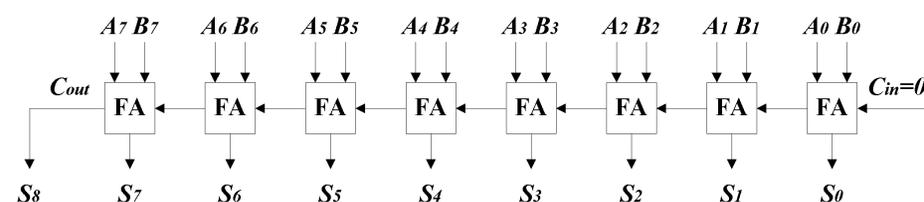


Рис. 1. Структура 8-битного сумматора с последовательным переносом.

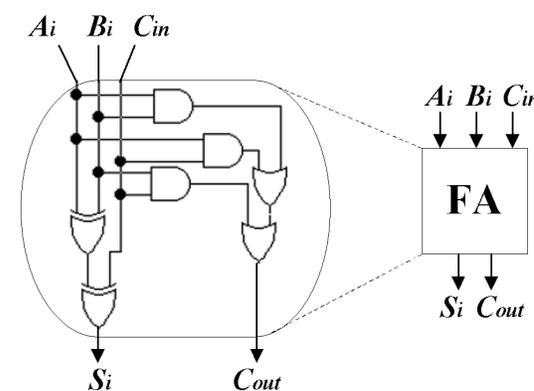


Рис. 2. Полный сумматор.

Блок вычисления переноса преобразуется в параллельно-префиксную форму с помощью оператора  $\circ$ , который связывает пары генерирующих и передающих бит и определен как

$$(G, P) \circ (G', P') = (G \vee (P \wedge G'), P \wedge P'). \quad (3)$$

Последовательное вычисление пар генерирующих и передающих бит  $(G, P)$  будем обозначать как  $(G_{k:j}, P_{k:j})$   $k > j$  где соответствующая пара вычислена на основе бит  $k, k-1, \dots, j$  следующим образом:

$$(G_{k:j}, P_{k:j}) = (G_k, P_k) \circ (G_{k-1}, P_{k-1}) \circ \dots \circ (G_j, P_j). \quad (4)$$

Так как перенос  $C_i = G_{1:0}$  для всех  $i > 0$ , то все переносы могут быть вычислены с использованием только оператора  $\circ$  [6].

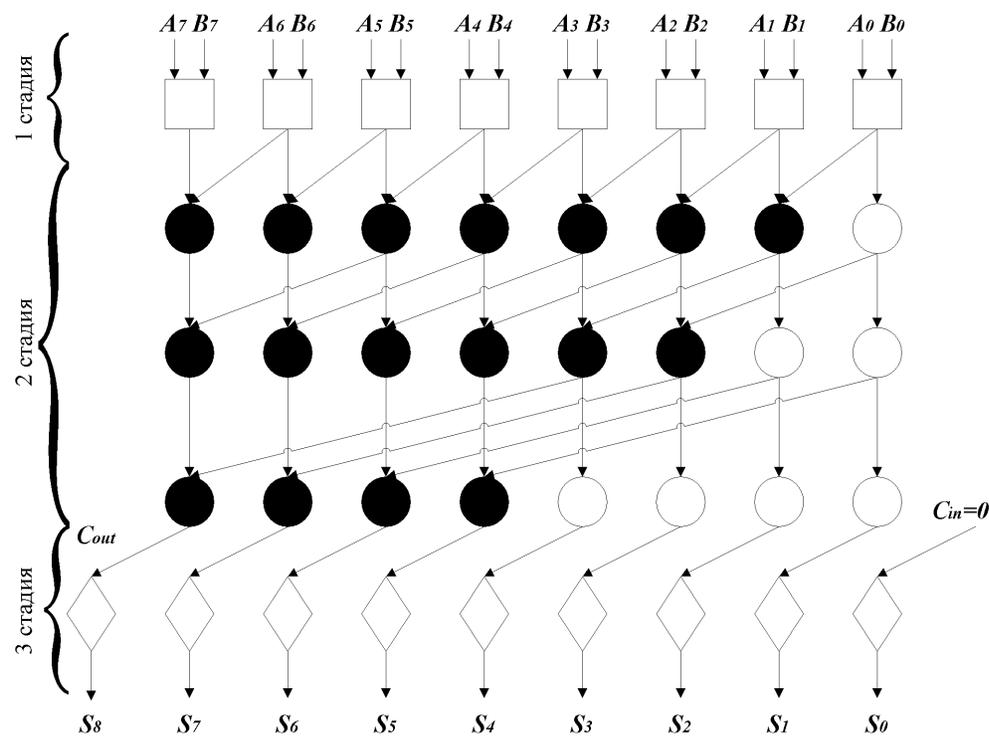


Рис. 3. Структура 8-битного параллельно-префиксного сумматора Когге-Стоуна для целочисленного сложения [6, 5].

На рис. 3 представлена схема 8-битного параллельно-префиксного сумматора, а на рисунке 4 – реализация его логических уровней.

Достоинством параллельно-префиксного сумматора является скорость его работы, так как вычисление всех разрядов происходит одновременно. К недостаткам такого сумматора относится использование большого числа логических элементов, что увеличивает площадь устройства [2].

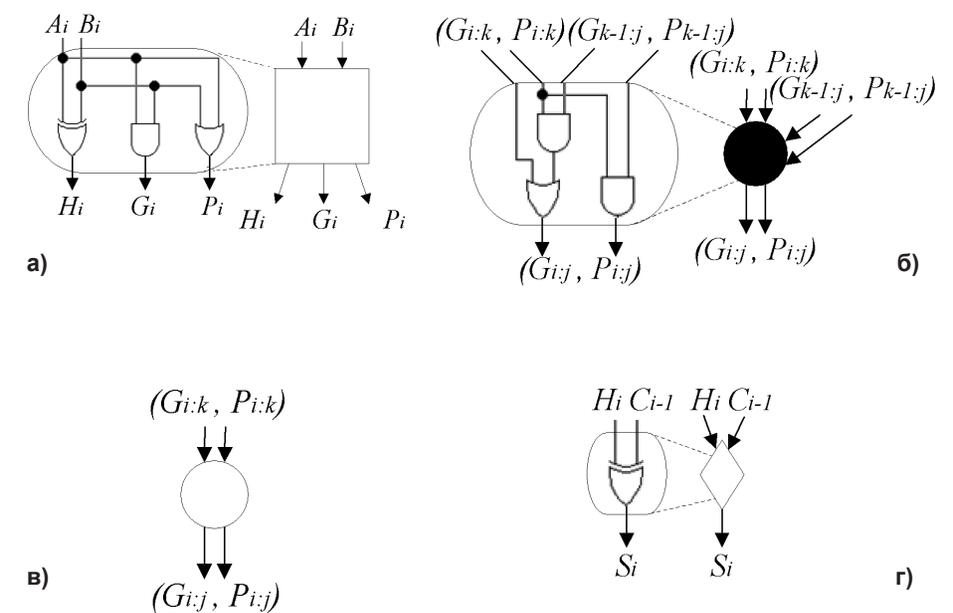


Рис. 4. Устройство блоков сложения параллельно-префиксного сумматора:  
а) блоки первой стадии; б), в) блоки второй стадии;  
г) блоки третьей стадии [6, 5]

### Теоретический анализ

Для вычисления времени работы устройства выбирается самый длинный путь, который проходит сигнал, и складывается время задержки всех логических элементов на этом пути. Пусть  $\tau_{AND}$  – время задержки логического элемента AND,  $\tau_{OR}$  – время задержки логического элемента OR,  $\tau_{XOR}$  – время задержки логического элемента XOR, а  $n$  – разрядность устройства. Расчет времени работы последовательного и параллельного сумматоров приведен в таблице 2.

Для расчета площади, занимаемой устройством, суммируются площади всех логических элементов. Пусть  $a_{AND}$  – площадь логического элемента AND,  $a_{OR}$  – площадь логического элемента OR,  $a_{XOR}$  – задержка логического элемента XOR. Расчет площади, занимаемой последовательным и параллельным сумматорами приведен в таблице 3.

Для количественной оценки времени работы устройства пусть  $\tau_{AND} = \tau_{OR} = 1$ ,  $\tau_{XOR} = 2$ . Тогда скорость 4, 8, 16 и 32-разрядных параллельных сумматоров больше на 33, 58, 75% и 85% соответственно, чем скорость сумматора с последовательным переносом.

Табл. 2. ВРЕМЯ ЗАДЕРЖКИ СУММАТОРОВ

n	Последовательный сумматор			Задержка	Параллельный сумматор			Задержка
	Количество элементов				Количество элементов			
	AND	OR	XOR		AND	OR	XOR	
4	4	8	—	$4\tau_{AND} + 8\tau_{OR}$	2	2	2	$2\tau_{AND} + 2\tau_{OR} + 2\tau_{XOR}$
8	8	16	—	$8\tau_{AND} + 16\tau_{OR}$	3	3	2	$2\tau_{AND} + 2\tau_{OR} + 2\tau_{XOR}$
16	16	32	—	$16\tau_{AND} + 32\tau_{OR}$	4	4	2	$2\tau_{AND} + 2\tau_{OR} + 2\tau_{XOR}$
32	32	64	—	$32\tau_{AND} + 64\tau_{OR}$	5	5	2	$2\tau_{AND} + 2\tau_{OR} + 2\tau_{XOR}$

Для оценки площади, занимаемой устройством, предположим что  $\alpha_{AND} = \alpha_{OR} = 1$ ,  $\alpha_{XOR} = 2$ . Тогда площадь 4-, 8-, 16- и 32-разрядных параллельных сумматоров больше на 8, 27, 41% и 50% соответственно, чем площадь сумматора с последовательным переносом.

Таким образом, видно, что параллельно-префиксный сумматор выигрывает в скорости у сумматора с последовательным переносом, но проигрывает по занимаемой площади.

Табл. 3. АППАРАТНЫЕ ЗАТРАТЫ СУММАТОРОВ

Вид	n	Количество элементов			Площадь
		AND	OR	XOR	
Последовательный сумматор	4	12	8	8	$12\alpha_{AND} + 8\alpha_{OR} + 8\alpha_{XOR}$
	8	24	16	16	$24\alpha_{AND} + 16\alpha_{OR} + 16\alpha_{XOR}$
	16	48	32	32	$48\alpha_{AND} + 32\alpha_{OR} + 32\alpha_{XOR}$
	32	96	64	64	$96\alpha_{AND} + 64\alpha_{OR} + 64\alpha_{XOR}$
Параллельный сумматор	4	14	9	8	$14\alpha_{AND} + 9\alpha_{OR} + 8\alpha_{XOR}$
	8	42	25	16	$42\alpha_{AND} + 25\alpha_{OR} + 16\alpha_{XOR}$
	16	114	65	32	$114\alpha_{AND} + 65\alpha_{OR} + 32\alpha_{XOR}$
	32	290	161	64	$290\alpha_{AND} + 161\alpha_{OR} + 64\alpha_{XOR}$

### Моделирование сумматоров на FPGA

Моделирование производилось в среде ISE Design Suite 14.7 [12]. Целевая плата – Kintex 7 XC7K70T. Параметры синтеза представлены в таблице 4. Свойство цель оптимизации (Optimization Goal) для последовательного сумматора принимает значение Area, а для параллельного – Speed.

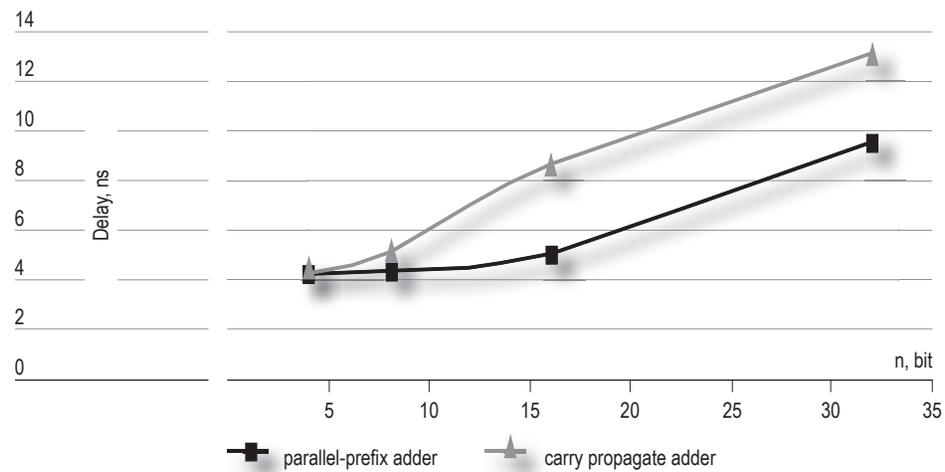
Табл. 4. ПАРАМЕТРЫ СИНТЕЗА

Свойство	Значение
Optimization Goal	Area/Speed
Optimization Effort	High
Global Optimization Goal	Maximum Delay
Case Implementation Style	Full-Parallel
RAM Extraction	No checked
ROM Extraction	No checked
Shift Register Extraction	No checked
Use DSP Block	No
Move First Flip-Flop Stage	No checked
Move Last Flip-Flop Stage	No checked
Pack I/O Registers into IOBs	No
LUT Combining	No
Reduce Control Set	No
Optimize Instantiated Primitives	No checked

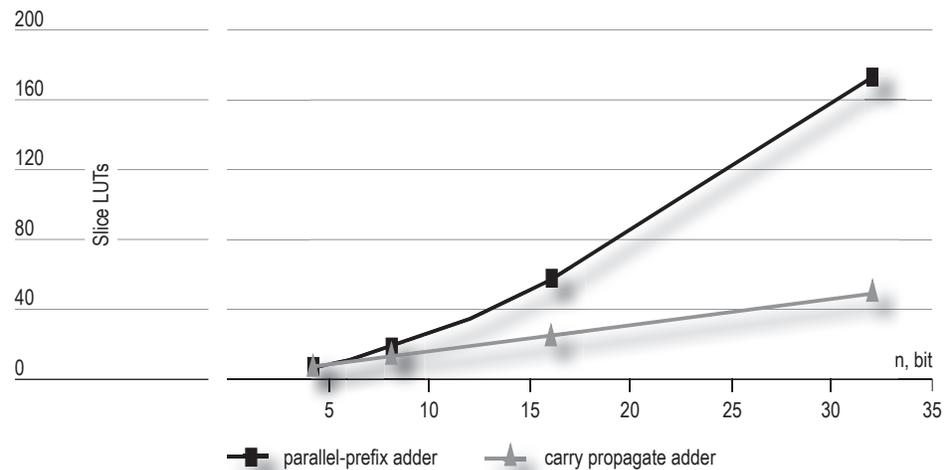
Результаты моделирования представлены в таблице 5. Выигрыш в скорости при параллельном сложении составляет 3, 15, 41% и 28% для 4-, 8-, 16- и 32-разрядного сумматоров соответственно (рис. 5). Такой результат достигается за счет увеличения аппаратных затрат на 28% для 8-разрядного сумматора, 53% для 16-разрядного сумматора и 71% для 32-разрядного сумматора. В случае 4-разрядного сумматора, кроме выигрыша в скорости так же происходит и сокращение аппаратных затрат на 22% (рис. 6 и 7).

Табл. 5. РЕЗУЛЬТАТЫ АППАРАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

n	Параллельный сумматор			Последовательный сумматор		
	Delay, ns	Slice LUTs	Occupied Slices	Delay, ns	Slice LUTs	Occupied Slices
4	4,203	5	2	4,346	6	3
8	4,384	18	7	5,145	12	6
16	5,106	57	25	8,682	24	15
32	9,538	173	94	13,154	48	28

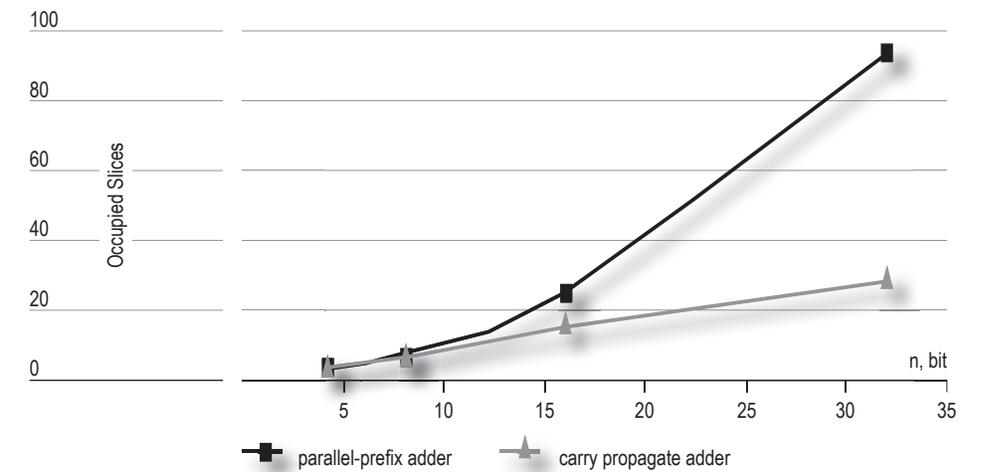


**Рис. 5.** График зависимости времени задержки схемы от количества разрядов.



**Рис. 6.** График зависимости количества Slice LUT схемы от количества разрядов.

Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод о том, что применение сумматоров с параллельно-префиксной архитектурой целесообразно для тех приложений, в которых главной задачей является достижение максимального быстродействия. С другой стороны, если требуется максимальное снижение аппаратных затрат и энергопотребления, то в этих случаях лучше использовать сумматор с последовательной архитектурой.



**Рис. 7.** График зависимости количества Occupied Slice схемы от количества разрядов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы два вида сумматоров: с последовательным переносом и параллельно-префиксные. Результаты моделирования показали, что использование параллельно-префиксной архитектуры дает выигрыш в скорости до 41% по сравнению с последовательной архитектурой. При этом увеличиваются аппаратные затраты параллельно-префиксного сумматора до 71%, причем чем больше разрядность, тем больше разница в аппаратных затратах по сравнению с сумматором с последовательным переносом.

Интересным направлением дальнейших исследований является исследование возможности применения параллельно-префиксных сумматоров для модулярной арифметики.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-5980.2016.9.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ  
СПИСОК**

1. Parhami, B. Computer Arithmetic: Algorithms and Hardware Designs / B. Parhami, Oxford University Press, Inc., 2000. 492 p.
2. Lynch, T.W. Binary adders / T.W. Lynch, The University of Texas at Austin, 1996. 135 p.
3. Уэйкерли, Д.Ф. Проектирование цифровых устройств / Д.Ф. Уэйкерли. Т. 1. М.: ПОСТМАРКЕТ, 2002. 1087 с.
4. Харрис, Д.М. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера / Д.М. Харрис, С.Л. Харрис, Elsevier, Inc., 2013. 1622 p.
5. Kogge, P.M. A Parallel Algorithm for the Efficient Solution of a General Class of Recurrence Equations / P.M. Kogge, H.S. Stone // IEEE Transaction on computers, Vol. C-22, N 8 1973. P. 786-793.
6. Vergos, H.T. On Modulo Adder Design, H.T. / Vergos, G. Dimitrakopoulos // IEEE Transactions on computers. Vol 61. No.2. 2012. P. 173–186.
7. Omondi, A. Residue Number Systems: Theory and Implementation / A. Omondi, B. Premkumar, Imperial College Press, 2007. 296 p.
8. Червяков, Н.И. Модулярные параллельные вычислительные структуры нейропроцессорных систем / Н.И. Червяков, П.А. Сахнюк, А.В. Шапошников, С.А. Ряднов; под ред. Н.И. Червякова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 288 с.
9. Коляда, А.А. Интервально-индексная технология синтеза параллельных алгоритмов модулярно-позиционного кодового преобразования с таблично-суммарной конфигурацией / А.А. Коляда, П.В. Кучинский, А.Ф. Чернявский // Наука. Инновации. Технологии. 2014. № 4. С. 52–60.
10. Червяков, Н.И. Применение корректирующих кодов СОК для диагностики работы модулярных процессоров / Н.И. Червяков, М.Г. Бабенко, Н.Н. Кучеров // Наука. Инновации. Технологии. 2014. № 3. С. 24–40.
11. Deschamps, J.P., Synthesis of arithmetic circuits: FPGA, ASIC and embedded systems / J.P. Deschamps, G.J.A. Bioul, G.D. Sutter, John Wiley & Sons, Inc., 2006. 556 p.
12. Бибило, П.Н. Основы языка VHDL / П.Н. Бибило. Изд. 3-е, доп. М.: Изд-во ЛКИ, 2007. 328 с.

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ**

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ, №4, 2016

УДК 581.9(470.6) Белоус В.Н. [Belous V.N.],  
Кухарук М.Ю. [Kukharuk M.J.]**РАСТИТЕЛЬНЫЕ СООБЩЕСТВА  
ОБНАЖЕНИЙ КОРЕННОЙ ПОРОДЫ  
СЕВЕРО-ЗАПАДНЫХ ПРЕДЕЛОВ  
СТАВРОПОЛЬСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ****Plant communities on bedrock outcrops  
in the north-western part of the Stavropol Upland**

В статье отражены результаты изучения петрофитных сообществ степных ландшафтов Ставропольской возвышенности. Обсуждается флористическая и экологическая структура фитоценозов на известняковых обнажениях материнской породы. В результате исследований, проведённых в период 2015–2016 гг., в современной флоре петрофитных степей выявлено 151 вид высших растений. Приведены описания 12 учётных площадок. Представлена фитоценотическая таблица, дана характеристика сообществ, описана их структура. Обилие видов, распределение по элементам рельефа и сообществам определяли экспертно на основе полевой информации. Выявлены особенности сообществ, факторы их пространственной дифференциации. Сделано предположение, что факторами, определяющими разнообразие петрофитной растительности в исследованном регионе, являются степень разрушения материнской породы и развития почвы, высокая инсоляция и слабое увлажнение экотопа. Петрофитные сообщества отличаются видовым богатством и представляют значительный природоохранный интерес; включают такие редкие и исчезающие виды, как *Medicago cancellata*, *Iris pumila*, *Orchis tridentata*, *Crocus reticulatus*, *Scabiosa isetensis*, *Thymus daghestanicus*, *Euphorbia glareosa*, *Gypsophila glomerata*, *Polygala sosnowskyi*, *Psephellus annae*, *Linum tauricum*, *Salvia nutans*, *Hedysarum Biebersteinii*, *Artemisia caucasica*, *Astragalus calycinus*, *A. pseudotataricus*, *A. bungeanus* и т. д. Показано, что каменистые степи важны для сохранения биологического разнообразия региона; местообитания редких видов имеют научное значение. Нашими изысканиями мы стремились подчеркнуть региональную специфику исследованных сообществ, обусловленную географическими, эколого-ценотическими и историческими особенностями.

The article reflects the results of studies on stony communities of Upland Stavropol's steppe landscapes. The floristical and ecological structure of the phytocoenoses on calcareous bedrock are discussed. As a result of the floristic studies in 2015-2016, we found out the modern stony steppes's flora consists of 151 higher plant species. We registered 12 distinctive sites. Also the phytocoenotic table and the characteristics of the communities are represented; their vegetation structure has been described. Species's abundance, distribution of relief elements and communities determined by the expert on the basis of field information. Both the peculiarities of communities and the factors of their spatial differentiation have been characterised. The main factors that influence the development of vegetations in question are abrasion and denudation processes. The petrophytic steppes are formed by limestone in the studied area. The plant communities occur on rocky slopes with poor integrity of bed-rock and development of soil cover, high insolation and low moistening of the ecotope. The petrophytic communities differ in the range of species, including rare and endangered ones such as: *Medicago cancellata*, *Iris pumila*, *Orchis tridentata*, *Crocus reticulatus*, *Scabiosa isetensis*, *Thymus daghestanicus*, *Euphorbia glareosa*, *Gypsophila glomerata*, *Polygala sosnowskyi*, *Psephellus annae*, *Linum tauricum*, *Salvia nutans*, *Hedysarum Biebersteinii*, *Artemisia caucasica*, *Astragalus calycinus*, *A. pseudotataricus*, *A. bungeanus* etc., which have significant value for nature protection purposes. Stony steppes's flora are an important object for biological diversity conservation and rare calcareous plants protection in the region. The habitats

of rare species have scientific value. In our research we sought to emphasise regional specificity of studied communities, due to the geographical, ecological and historical features of the coenotic.

**Ключевые слова:** каменистые степи, известняк, пространственная дифференциация, редкие виды растений, ядро флоры, Предкавказье  
**Key words:** petrophytic steppes, limestone, spatial differentiation, rare plant species; core of flora, Ciscaucasia.

### Введение

Ставропольская возвышенность расположена в центральной части Предкавказской равнины. Она полого спускается к Кумо-Манычской низменности на севере и круто, иногда уступами, обрывается к Кубано-Суркульской депрессии в предгорьях большого Кавказа на юге, на востоке – постепенно переходит в Терско-Кумскую низменность. Преобладают высоты от 300 до 600 метров. Высшая точка – гора Стрижамент (831 м). Возвышенность сложена преимущественно глинами, песчаниками и известняками, в восточной части – суглинками.

В ряде ландшафтов Ставропольской возвышенности на дневную поверхность выходят крупные массивы известняковых горных пород, в то время как на остальном пространстве они плохо обнажены или погребены под толщей более молодых отложений. На выходах известняка-ракушечника распространены оригинальные территориальные сообщества петрофитных степей – эдафических вариантов подзональных разнотравно-дерновиннозлаковых травяных фитоценозов на чернозёмных почвах. На реликтовый характер каменистой растительности, возникшей в результате горообразовательных процессов в странах Древнего Средиземья, указывал Е.М. Лавренко [1].

Наибольшее развитие петрофитные степи получили на Ставропольской горе, Прикалаусских высотах, хребте Недреманный, северных пределах Ставропольского поднятия.

Несмотря на уникальность указанных степных комплексов, их фитоценотическая изученность остаётся слабой. Данные о петрофитных растительных сообществах чрезвычайно скудны и не сопровождаются публикацией полных геоботанических описаний.

Немногочисленные работы по флоре и растительности степей Ставрополья носят общий или описательный характер [2, 3, 1, 4]. Зональные и вторичные бородачёвые степи описаны в монографии Д.С. Дзыбова и Н.Г. Лапенко [5]. Особенности флоры, в т.ч. редких видов растений меловых обнажений р. Полной отражены в работах Слугиновой И.С. [6], Траутвайн С.А., Друп В.Д. [7]. Наиболее подробные сведения по флоре и растительности каменистых местообитаний Ставропольской возвышенности приведены в наших работах [8, 9], в которых показаны различия в характере растительности в зависимости от разных стадий выветривания материнской породы.

Авторы поставили цель выявить состав, разнообразие и особенности петрофитных степных сообществ северо-западных пределов Ставропольской возвышенности.

### Природные условия района исследования

Северо-западные отроги Ставропольской возвышенности широкими долинами Егорлыка и его притоков, балками расчленены на платообразные массивы и гряды. Эти междолинные останцовые поверхности сложены породами среднего сармата (известняк, песок, глина), могут достигать 500 м, понижаясь к северу до 250 м, и ограничиваются там уступом древнего Понтийского моря [10].

Пространственное размещение элементов растительности по территории определяется спектром климатических, почвенных, гидротермических, орографических условий, вызванных сложностью и расчленённостью рельефа. Краткая климатическая характеристика района исследования представлена в таблице 1.

На исследуемой территории преобладают карбонатные чернозёмы, на склонах – смытые чернозёмы.

Травяная растительность характеризуется чередованием участков разнотравно-дерновиннозлаковой и каменистой степи на маломощных чернозёмных почвах. Естественные фитоценозы на большей части территории практически полностью распаханы, оставшиеся сохранились преимущественно по склонам речных долин и балок.

Петрофитные сообщества широко представлены на платообразных поверхностях, бронированных плитой известняка, в верховьях и на крутых каменистых склонах речных долин Ташлы, Тугулука, Кугульты. В составе этих сообществ немало реликтовых, эндемичных и других раритетных видов, что позволяет рассматривать исследуемые ландшафты как природные памятники Ставрополья.

Табл. 1. ОСНОВНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ\*

Показатели климата	Величины
Климат	Умеренно-континентальный
Среднегодовая температура, °С	+8.5...+10.0
Средняя температура воздуха января, °С	-3...-4.5
Средняя температура воздуха июля, °С	+21...+23
Сумма температур выше +10 °С	3000-3400
Продолжительность безморозного периода, дни	170-180
Среднегодовое количество осадков, мм	450...550
Коэффициент увлажнения	0.6...0.8

Примечание\* – климатические характеристики приводятся по «Атласу Ставропольского края» [11].

### Материал и методы исследования

Основным фактическим материалом для работы послужили данные, собранные авторами в ходе экспедиционных исследований на территории Ставропольской возвышенности в 2015–2016 годах. Цено-тические изыскания, сбор и обработка полевых материалов проведены по общепринятым геоботаническим методам [12, 13, 14]. Описываемые учётные площадки имели размер  $10 \times 10$  м.

В качестве информации об условиях местообитания в описания включены сведения об абсолютной высоте местности, экспозиции, крутизне склона. Также учтены общее проективное покрытие травостоя (ООП), покрытие поверхности почвы камнями (каменистость).

Для каждой учётной площадки в пределах ключевых участков указывались географические координаты (северная широта и восточная долгота) с использованием навигационной системы GPS. Абсолютная высота над уровнем моря определялась с помощью GPS-навигатора JJ-Connect NAVIGATOR 100, экспозиция – с помощью компаса, крутизну склона и проективное покрытие определяли визуально, в градусах и процентах (соответственно). Для оценки ООП при сложении фитоценозов использована равномерная шкала [15]. Экспозиция склона, на котором производились описания, обозначена: 0 – нулевая экспозиция (нет уклона), E – склоны восточного румба, W – склоны западного румба, S – склоны южного румба. Описания, произведённые на склонах промежуточных румбов, относились к обоим румбам.

Участие вида в растительном покрове оценивали по его обилию. Обилие-покрытие видов дано по семибальной комбинированной шкале J. Braun-Blanquet: r – вид на учётной площадке встречен в единичных экземплярах с незначительным покрытием; + – особи вида многочисленны, они покрывают менее 1 % площадки или особи довольно разрежены, но с такой же величиной покрытия; 1 – особи вида многочисленны, но они покрывают от 1 до 5 % площадки; 2 – число особей велико, они покрывают от 5 до 25 % площадки; 3 – число особей вида на площадке любое, проективное покрытие от 25 до 50 %; 4 – число особей на площадке любое, они покрывают от 50 до 75 %; 5 – проективное покрытие вида более 75 % площадки.

При составлении характеризующей таблицы использована шкала постоянства видов: «+» – 6-10 %; I – 11-20 %; II – 21-40 %; III – 41-60 %; IV – 61-80 %; V – 81-100 %. Классы постоянства «+», I и II характеризуют группу видов низкого постоянства, III и IV – группу видов среднего постоянства, V – группу видов высокого постоянства.

В основу работы положены двенадцать полных геоботанических описаний петрофитных сообществ на ключевых участках, которые вошли в характеризующую таблицу.

Маршрутные рекогносцировочные исследования касались выяснения основных закономерностей состава флоры, особенностей строения и распределения петрофитных сообществ. При анализе петрофитностепной

растительности были использованы данные геоботанических описаний двенадцати ключевых участков. Их описания проведены вдоль эдафических и экологических градиентов и были сопряжены с характером почвенно-растительного покрова.

Для сравнения флористического состава исследованных сообществ использован коэффициент Сьеренсена:

$$Ks = \frac{2c}{a + b}$$

где c – количество общих видов,  
a, b – количество видов в первом и втором синтаксонах.

Был проведен кластерный анализ, где за расстояния между точками мы принимали коэффициент сходства их флор (больше значение – ближе расстояние) и построена дендрограмма по невзвешенному центроидному методу (метод невзвешенного попарного центроидного усреднения – unweighted pair-group method using the centroid average [16]). В качестве расстояния между двумя кластерами в этом методе берется расстояние между их центрами тяжести.

$$\rho_{lm}(S_l, S_m) = \rho(\bar{x}_l, \bar{x}_m)$$

где  $\bar{x}_l, \bar{x}_m$  – векторы средних соответственно  $S_l$  и  $S_m$  кластеров.

Латинские названия растений приведены по сводке С.К. Черепанова [17]. Ряд названий растений приводится в соответствии с флористическими сводками [18, 19].

### Результаты и их обсуждение

Нашими изысканиями установлено, что петрофитные сообщества характеризуются разреженным или не полностью сомкнутым травостоем, а также выраженной экологической приуроченностью – предпочитают сухие, хорошо дренируемые и прогреваемые, инсолированные местообитания. Эколого-ценотически они связаны с гемипетрофитными и петрофитными вариантами разнотравно-дерновиннозлаковых степей на каменистых поверхностях. Условия обитания растений здесь определяются высокими температурами воздуха и почвы летом, их резкими колебаниями в течение сезона и суток.

Почвенный субстрат анализируемых петрофитных сообществ средне- (каменистость от 5 до 20 %), местами – сильно каменистый (обломки известняка составляют до 70–80 %). Участки с близким залеганием к поверхности известняка характеризуется значительным количеством кварца и повышенным содержанием карбонатов. Открытые обнажения материнской породы слабо затронуты процессами почвообразования, отличаются низкой гумусированностью, отсутствием заметного задерне-

ния. Незамкнутые кальцепетрофитные растительные группировки на них практически свободны от конкурентных отношений с соседними видами.

#### Локализация геоботанических описаний

№ 1 – Ставропольский край, Изобильненский район, окр. с. Московское, средняя часть склона, каменистые почвы, бородачье сообщество в комплексе с петрофитным вариантом разнотравно-дерновиннозлаковой степи; N 45°16'125"; E 41°56'385", h = 335 м над ур. м., 30.VI.2015. Автор описания В. Белоус.

№ 2 – Ставропольский край, Грачёвский район, правобережье р. Тулулук, плакорный участок, петрофитный вариант разнотравно-дерновиннозлаковой степи на относительно сформированных почвах, подстилаемых плитой известняка, щебневатость почв с поверхности может быть незначительной; N 45°21'125"; E 42°11'815", h = 307 м над ур. м., 16.VI.2016.

№ 3 – Ставропольский край, Труновский район, правобережье р. Тулулук, обширные известняковые обнажения плато, дерновиннозлаково-разнотравные растительные группировки из облигатных и факультативных видов разнотравья; N 45°21'350"; E 42°08'824", h = 303 м над ур. м., 16.VI.2016.

№ 4 – Ставропольский край, Грачёвский район, правый высокий берег р. Тулулук, верхний край уступа плато, сериальные растительные группировки с выраженной долей участия петрофитного степного разнотравья и дерновинных злаков (*Festuca + Stipa*) на обнажениях известняка; N 45°21'223"; E 42°08'634", h = 312 м над ур. м., 16.VI.2016.

№ 5 – Ставропольский край, Грачёвский район, правобережье р. Тулулук, плакорный участок, незамкнутые петрофитные растительные группировки с господством полыни кавказской (*Artemisia caucasica*) на обнажениях материнской породы; N 45°21'170"; E 42°08'710", h = 318 м над ур. м., 16.VI.2016.

№ 6 – Ставропольский край, Изобильненский район, окр. с. Московское, прирочная часть плато, известняковые обнажения и продукты их разрушения, незамкнутые группировки с высокой долей участия скабиозы исетской (*Scabiosa isetensis*) и других кальцепетрофитов в окружении бородачьевого сообщества; N 45°16'251"; E 41°56'092", h = 345 м над ур. м., 30.VI.2015. Автор описания В. Белоус.

№ 7 – Ставропольский край, Изобильненский район, верховья р. Малая Ташла, в 2-3 км к юго-востоку от пос. Рыздвяный, склон близ края плато, песчано-каменистые обнажения, 29.VI.2015. Автор описания В. Белоус.

№ 8 – Ставропольский край, Труновский район, правобережье р. Тулулук, окр. с. Донское, верхняя часть склона, петрофитный вариант разнотравно-дерновиннозлаковой степи; N 45°28'321"; E 41°59'729", h = 188 м над ур. м., 22.VI.2016.

№ 9 – Ставропольский край, Труновский район, правобережье р. Тулулук, окр. с. Донское, окраинная часть плато, петрофитный вариант разнотравно-дерновиннозлаковой степи на тощих почвах; N 45°28'328"; E 41°59'724", h = 191 м над ур. м., 22.VI.2016.

№ 10 – Ставропольский край, Труновский район, севернее с. Ключевское, правый берег р. Тулулук, окраинная часть плато близ обрывистого ступенчатого склона, бородачье сообщество, подстилаемая известняком-ракушечником; N 45°22'624"; E 42°07'107", h = 284 м над ур. м., 22.VI.2016.

№ 11 – Ставропольский край, Изобильненский район, верховья р. Малая Ташла, плакорный участок в 1,5-2,0 км к Ю-З от с. Московское, петрофитный вариант богаторазнотравно-злаковой степи в окружении низкорослых древесных насаждений; N 45°14'217"; E 41°52'772", h = 283 м над ур. м., 22.VI.2016.

№ 12 – Ставропольский край, Изобильненский район, окр. х. Спорный, плато, бородачье сообществом, песчано-каменистый субстрат; N 45°20'151"; E 41°45'274", h = 274 м над ур. м., 02.VI.2016. Автор описания В. Белоус.

Геоботаническое обследование ключевых участков с петрофитной степной растительностью позволило нам заключить, что флора исследуемых сообществ насчитывает не менее 151 вида высших растений. Флористическое разнообразие изученных сообществ, а также их ценоотические особенности представлены в таблице 2.

Из анализа данных таблицы 2 очевидно, что большинство растений каменистых ценозов – это теплолюбивые эуксерофиты, они увеличивают своё обилие на прогреваемых склонах южной (и близкой к ней) экспозиции. Проективное покрытие травостоя в петрофитно-степных сообществах сильно варьирует в зависимости от степени каменистости почвы и выходов материнской породы на поверхность (от 20 до 80 %). Численность видов на пробной площадке изменяется от 32 до 64, в среднем – 51.

В целом, число константных видов формации (класс постоянства V) составляет 10 таксонов, или 6,6 % общего списка ценофлоры; группа видов со средней константностью (классы IV и III) насчитывает 48 таксонов (31,8 %), низкого постоянства (классы II, I и +) – 93 таксона (61,6 %).

Группа видов высокого и среднего постоянства – *Festuca valesiaca*, *Botriochloa ischaetum*, *Cleistogenes bulgarica*, *Koeleria cristata*, *Medicago romanica*, *Arenaria serpyllifolia*, *Hieracium echioides*, *Euphorbia seguieriana*, *Thymus marschallianus*, *Campanula taurica* характеризуют дерновиннозлаковые сообщества настоящих подзональных степей. Петрофитный же вариант указанных степных сообществ диагностируют преимущественно виды среднего постоянства (*Allium albidum*, *Alyssum tortuosum*, *Kohlrauschia prolifera*, *Hypericum elegans*, *Astragalus demetrii*, *Dianthus pseudoarmeria*, *Asperula stevenii*, *Carex supina*, *Potentilla arenaria*, *P. astracanic*, *Hypericum elegans*, *Thymus daghestanicus*, *Veronica multifida*, *Gypsophila glomerata*, *Psephellus annae*, *Linum tenuifolium*, *L. tauricum*, *Cephalaria uralensis*, *Silene supina*, *Salvia nutans*), которые относятся как к факультативным, так и облигатным кальцепетрофитам. Последние представляют флористическое ядро каменистых степей Ставропольской возвышенности. Основное видовое разнообразие петрофитных сообществ связано со степной подзоной Предкавказья.

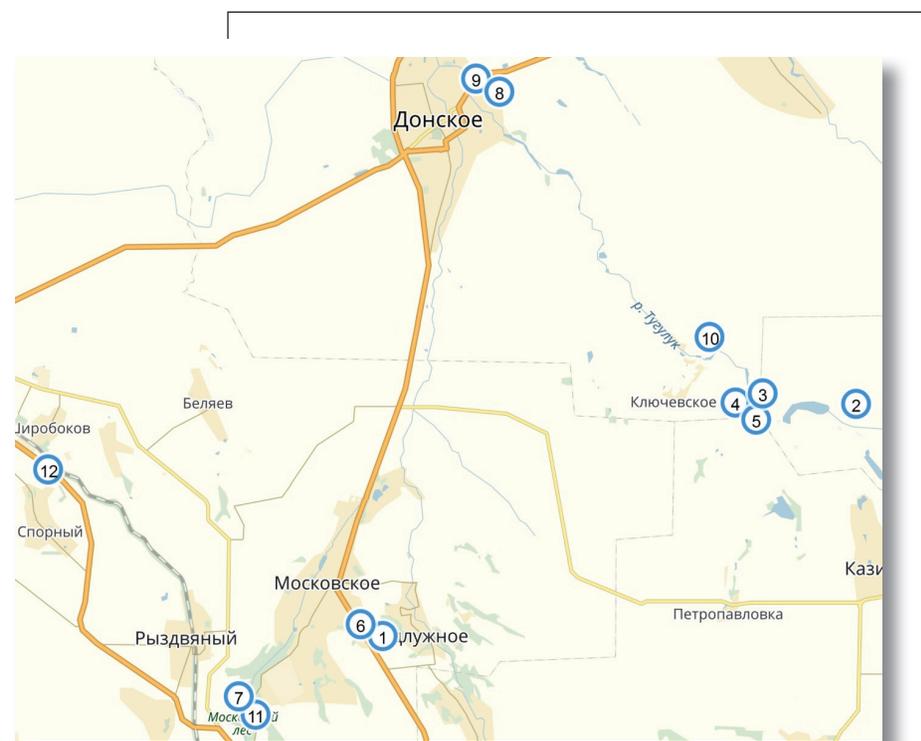


Рис. 1. Пункты геоботанических описаний.

Примечание. Номерами обозначены ключевые участки, на которых описаны сообщества.

В составе ценофлоры каменистых степей северо-западных предделов возвышенности присутствуют раритетные виды, занесённые в Красные книги Российской Федерации [20] и Ставропольского края [21]: *Medicago cancellata*, *Iris pumila*, *Orchis tridentata*, *Crocus reticulatus*, *Scabiosa isetensis*, *Thymus daghestanicus*, *Euphorbia glareosa*, *Gypsophila glomerata*, *Polygala sosnowskyi*, *Psephellus annae*, *Linum tauricum*, *Salvia nutans*, *Hedysarum biebersteinii*, *Artemisia caucasica*, *Stipa ucrainica*, *Stipa borysthenica*, *Astragalus calycinus*, *A. pseudotataricus*, *A. bungeanus* и др.

Отметим, что каменистые степи речных долин Ташлы, Тугулука и Кугульты отличаются значительным своеобразием и вносят заметный вклад в фиторазнообразие степных ландшафтов Предкавказья в целом и Ставропольской возвышенности в частности, и поэтому нуждаются в природоохранных мерах.

Табл. 2. ОБЩИЙ СПИСОК РАСТЕНИЙ, ВЫЯВЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ ОПИСАНИЯ КЛЮЧЕВЫХ УЧАСТКОВ

ОПП, %	40	80	20	30	20	20	30	40	80	80	40	60	Класс постоянства
Средняя высота травостоя, см	30	45	25	40	20	25	40	40	50	45	50	45	
Экспозиция склона	SW	S	0	W	0	SW	SE	SW	SW	S	0	0	
Крутизна склона, град.	30	5	0	10	0	20	30	20	5	10	0	0	
Каменистость, %	20	5	90	80	95	70	50	10	20	10	70	30	
Число видов	49	46	58	62	38	32	54	62	48	50	64	44	
Номер описания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	С
<b>Кустарники, кустарнички</b>													
<i>Rhamnus pallasii</i>	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	+	.	II
<i>Ephedra distachya</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	+
<b>Злаки, осоки</b>													
<i>Botriochloa ischaemum</i>	4	2	2	+	1	+	2	1	2	3	1	3	V
<i>Cleistogenes bulgarica</i>	1	г	+	+	+	+	.	1	+	1	+	1	V
<i>Koeleria cristata</i>	+	г	+	.	г	.	г	+	+	1	+	+	V
<i>Festuca valesiaca</i>	+	2	1	1	.	.	1	+	1	1	+	.	IV
<i>Carex supina</i>	1	.	.	.	+	1	1	.	.	1	1	.	III
<i>Poa bulbosa</i>	.	г	.	.	.	.	.	+	+	+	.	г	III
<i>P. compressa</i>	г	.	г	.	г	г	.	.	.	.	+	+	III
<i>Bromus squarrosus</i>	г	г	г	г	.	.	.	+	.	+	.	.	III
<i>Bromopsis riparia</i>	г	.	.	.	.	.	г	.	1	.	+	.	II
<i>Agropyron desertorum</i>	.	.	.	.	.	.	.	+	2	1	.	.	II
<i>Stipa borysthenica</i>	.	.	.	1	.	.	г	.	1	.	1	.	II
<i>Elytrigia trichophora</i>	.	.	.	1	.	.	.	.	.	1	.	.	I
<i>Stipa ucrainica</i>	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
<b>Бобовые</b>													
<i>Medicago romanica</i>	1	1	+	+	.	.	+	г	+	1	+	1	V
<i>Astragalus bungeanus</i>	.	.	1	1	+	1	+	2	1	1	.	2	IV
<i>Medicago minima</i>	.	1	+	.	.	.	.	г	г	г	.	.	III
<i>Trigonella monspeliaca</i>	.	.	1	+	.	.	.	г	г	.	.	.	II
<i>Astragalus calycinus</i>	.	.	1	+	.	.	.	1	1	.	.	.	II
<i>A. demetrii</i>	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	2	I
<i>A. austriacus</i>	.	.	г	.	.	.	.	.	+	.	.	.	I
<i>A. pseudotataricus</i>	.	.	.	.	.	.	.	+	1	.	.	.	I

<i>Glycyrrhiza glabra</i>	.	.	.	г	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	I
<i>Onobrychis vassilczenkoi</i>	.	.	.	.	.	.	.	+	+	.	.	.	.	.	I
<i>Vicia peregrinum</i>	.	г	г	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	I
<i>Astragalus onobrychis</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	+
<i>Securigera varia</i>	.	г	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
<i>Hedysarum biebersteinii</i>	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
<i>Medicago cancellata</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	г	.	.	.	.	+
<b>Разнотравье</b>															
<i>Arenaria serpyllifolia</i>	+	1	+	г	г	.	г	1	+	+	+	+	+	+	V
<i>Euphorbia seguieriana</i>	+	+	+	г	1	+	1	1	1	1	.	.	+	.	V
<i>Hypericum elegans</i>	+	г	+	+	г	.	+	.	+	+	+	г	.	.	V
<i>Thymus marschallianus</i>	+	1	г	г	.	.	1	1	1	+	+	г	.	.	V
<i>Asperula stevenii</i>	+	.	+	г	г	1	+	1	г	1	+	г	.	.	V
<i>Campanula taurica</i>	+	г	+	г	+	+	1	.	+	.	г	1	.	.	V
<i>Gypsophila glomerata</i>	.	.	1	г	+	1	1	1	1	.	1	2	.	.	IV
<i>Thesium arvense</i>	г	г	.	г	г	г	.	+	+	.	.	г	.	.	IV
<i>Eryngium campestre</i>	+	1	г	.	.	.	г	1	+	+	г	+	.	.	IV
<i>Kohlruschia prolifera</i>	.	+	г	г	г	г	г	.	.	+	г	.	.	.	IV
<i>Alyssum calycinum</i>	г	г	г	г	.	.	.	+	+	+	+	+	.	.	IV
<i>Thymelaea passerina</i>	г	г	г	г	.	г	.	1	+	+	г	.	.	.	IV
<i>Teucrium polium</i>	+	.	+	+	1	1	1	1	.	.	1	+	.	.	IV
<i>Acinos arvensis</i>	г	.	+	г	г	+	.	г	.	г	.	г	.	.	IV
<i>Euphrasia pectinata</i>	+	.	.	г	г	1	г	г	.	г	1	+	.	.	IV
<i>Hieracium echinoides</i>	+	+	+	г	.	.	г	.	г	+	1	+	.	.	IV
<i>Thymus daghestanicus</i>	+	.	г	.	г	1	1	.	.	.	.	.	.	.	III
<i>Dianthus pseudoarmeria</i>	.	.	г	г	г	г	.	+	.	+	+	.	.	.	III
<i>Allium rotundum</i>	+	1	.	+	.	.	.	.	.	.	г	+	.	.	III
<i>A. albidum</i>	.	.	.	г	г	.	г	.	.	+	г	.	.	.	III
<i>Linum austriacum</i>	.	.	+	+	.	.	г	+	+	.	.	г	.	.	III
<i>Gagea bulbifera</i>	г	.	.	.	.	г	.	г	.	г	г	.	.	.	III
<i>Holosteum umbellatum</i>	г	+	.	.	.	.	г	+	+	+	.	.	.	.	III
<i>Arabis recta</i>	.	г	.	г	.	г	.	г	.	.	г	.	.	.	III
<i>Alyssum tortuosum</i>	+	.	г	г	г	+	.	.	.	.	+	.	.	.	III
<i>Meniocus linifolius</i>	г	.	г	+	.	.	.	1	+	+	.	г	.	.	III
<i>Potentilla recta</i>	.	.	+	+	.	.	г	+	.	+	+	.	.	.	III

<i>P. astracana</i>	.	.	+	+	г	.	.	+	.	+	.	.	.	.	III
<i>P. arenaria</i>	+	.	.	.	.	.	1	2	.	.	.	.	+	+	III
<i>Poterium polygamum</i>	+	.	.	.	г	+	г	.	+	.	1	+	.	.	III
<i>Ajuga chia</i>	г	г	.	г	г	.	.	1	.	+	.	.	.	.	III
<i>Teucrium chamaedrys</i>	.	.	.	г	.	.	г	.	.	1	+	2	.	.	III
<i>Sideritis montana</i>	г	.	1	1	г	.	.	1	+	.	.	.	.	.	III
<i>Stachys atherocalyx</i>	.	.	г	г	+	.	г	.	.	.	1	+	.	.	III
<i>Salvia nutans</i>	1	.	.	1	+	.	.	1	1	.	.	.	+	.	III
<i>S. tesquicola</i>	.	1	+	.	.	.	.	+	+	+	.	.	г	.	III
<i>Linaria genistifolia</i>	.	г	г	г	г	г	.	г	+	г	.	.	.	.	III
<i>Veronica multifida</i>	г	.	г	г	+	.	г	.	.	.	.	+	.	.	III
<i>V. verna</i>	г	1	.	.	.	.	.	.	+	+	+	.	.	.	III
<i>Plantago lanceolata</i>	.	г	г	.	.	.	.	.	+	+	+	г	г	.	III
<i>Scabiosa ucrainica</i>	.	г	г	г	г	г	.	.	+	.	.	.	.	.	III
<i>Senecio vernalis</i>	.	г	г	г	г	.	.	.	г	г	.	.	.	.	III
<i>Xeranthemum annuum</i>	г	.	г	.	г	.	.	.	г	.	+	.	.	.	III
<i>Psephellus annae</i>	+	.	.	.	+	2	2	.	.	г	.	.	.	.	III
<i>Centaurea diffusa</i>	+	.	+	г	+	.	.	.	г	г	.	.	г	.	III
<i>Scorzonera stricta</i>	.	+	.	г	.	.	.	.	г	.	.	г	г	.	III
<i>Chondrilla juncea</i>	.	г	.	г	.	.	.	г	+	.	.	г	+	.	III
<i>Falcaria vulgaris</i>	.	1	г	.	.	.	.	.	.	г	.	г	.	.	II
<i>Salvia verticillata</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	г	+	II
<i>Crepis rhoeadifolia</i>	г	.	г	.	.	г	.	.	.	.	.	+	.	.	II
<i>Lagoseris sancta</i>	.	г	+	+	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	II
<i>Hieracium robustum</i>	г	.	.	.	.	.	.	г	.	.	.	г	+	.	II
<i>Crocus reticulatus</i>	г	.	.	.	.	.	г	.	.	.	г	.	.	.	II
<i>Sisymbrium altissimum</i>	.	.	г	г	.	.	.	.	г	г	.	.	.	.	II
<i>Alyssum hirsutum</i>	.	.	г	г	г	.	.	г	.	.	.	.	.	.	II
<i>Agrimonia eupatoria</i>	+	.	.	.	.	.	г	.	.	.	г	.	.	.	II
<i>Erodium ciconium</i>	.	.	+	г	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	II
<i>Linum tenuifolium</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	1	+	II
<i>L. tauricum</i>	+	.	.	.	.	.	.	+	2	.	.	.	2	.	II
<i>Polygala comosa</i>	г	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	г	+	.	II
<i>Euphorbia glareosa</i>	+	.	.	.	.	.	г	1	.	.	.	.	.	.	II
<i>Convolvulus lineatus</i>	.	.	г	.	.	.	.	.	1	1	.	.	.	.	II

<i>Verbascum lychnitis</i>	.	.	.	г	.	.	г	.	.	.	г	.	
<i>Veronica spicata</i>	.	.	.	.	.	.	г	.	.	+	+	.	
<i>Galium verum</i>	.	+	.	.	.	.	+	.	.	.	+	.	
<i>Cephalaria uralensis</i>	.	.	.	.	+	+	+	.	.	.	.	.	
<i>Artemisia austriaca</i>	.	г	.	.	.	.	.	г	+	.	.	.	
<i>Gagea taurica</i>	.	.	.	.	.	.	.	+	.	г	.	.	
<i>Inula aspera</i>	.	.	.	.	.	.	г	.	.	.	г	.	
<i>Marrubium praecox</i>	.	.	.	г	.	.	.	+	.	.	.	.	
<i>Scleranthus annuus</i>	.	.	1	.	.	.	.	.	.	+	.	.	
<i>Holosteum glutinosum</i>	.	+	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	
<i>Otites wolgensis</i>	.	г	.	г	.	.	.	.	.	.	.	.	
<i>Silene supina</i>	.	.	г	.	г	.	.	.	.	.	.	.	
<i>Pleconax subconica</i>	.	+	.	.	.	.	.	.	.	г	.	.	
<i>Dianthus pallens</i>	.	г	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	
<i>Adonis flammea</i>	.	.	.	.	.	.	г	.	г	.	.	.	
<i>Reseda lutea</i>	.	.	.	г	.	.	.	г	.	.	.	.	
<i>Potentilla argentea</i>	.	+	.	.	.	.	.	.	.	г	.	.	
<i>Filipendula vulgaris</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	1	.	
<i>Bilacunaria microcarpa</i>	.	.	.	.	.	.	г	.	.	.	1	.	
<i>Viola kitaibeliana</i>	.	.	.	г	.	.	.	+	.	.	.	.	
<i>Peucedanum ruthenicum</i>	.	.	.	.	.	.	г	.	.	.	г	.	
<i>Lycopsis orientalis</i>	.	.	г	.	.	.	.	+	.	.	.	.	
<i>Salvia aethiopsis</i>	.	.	г	г	.	.	.	.	.	.	.	.	
<i>Galium humifusum</i>	.	г	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	
<i>Crinitaria linosyris</i>	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	г	.	
<i>Filago arvensis</i>	г	.	.	.	.	.	.	г	.	.	.	.	
<i>Tanacetum achilleifolium</i>	.	.	+	г	.	.	.	.	.	.	.	.	
<i>Artemisia caucasica</i>	.	.	.	+	1	.	.	.	.	.	.	.	
<i>Jurinea arachnoidea</i>	.	.	.	.	.	.	г	.	+	.	.	.	
<i>Tragopogon dubius</i>	г	.	.	.	.	.	.	г	.	.	.	.	
<i>Vincetoxicum hirundinaria</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	г	г	
<i>Allium moschatum</i>	.	.	.	.	.	.	г	.	.	.	.	.	+
<i>Iris pumila</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+
<i>Orchis tridentata</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+
<i>Consolida paniculata</i>	.	.	.	.	.	.	г	.	.	.	.	.	+

<i>Ranunculus oxyspermus</i>	.	.	.	.	.	.	.	г	.	.	.	.	+
<i>R. illyricus</i>	.	г	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
<i>Papaver hybridum</i>	.	.	.	.	.	.	.	г	.	.	.	.	+
<i>Polygala sosnowskyi</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+
<i>Euphorbia falcata</i>	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
<i>Alcea rugosa</i>	.	.	.	г	.	.	.	.	.	.	.	.	+
<i>Hypericum perforatum</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	г	.	+
<i>Viola ambigua</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	г	.	+
<i>Trinia leiogona</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	г	+
<i>Echium vulgare</i>	.	.	г	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
<i>Anchusa azurea</i>	.	.	г	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
<i>Melampyrum arvense</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+
<i>Rhinanthus vernalis</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+
<i>Scabiosa isetensis</i>	.	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	+
<i>S. ochroleuca</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	г	+
<i>Aster bessarabicus</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+
<i>Helichrysum arenarium</i>	.	.	.	.	.	.	.	г	.	.	.	.	+
<i>Inula oculus-christi</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	+
<i>Anthemis dumetorum</i>	.	г	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
<i>Achillea micrantha</i>	.	.	.	.	.	.	г	.	.	.	.	.	+
<i>Artemisia scoparia</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	г	.	+
<i>Senecio jacobaea</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	г	.	+
<i>Jurinea multiflora</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	+
<i>Centaurea orientalis</i>	.	.	.	.	.	.	.	г	.	.	.	.	+

**Примечание.**

Кроме того, с постоянством менее 11 % встречены (в скобках указываются номер геоботанического описания и обилие-покрытие): *Allium moschatum* (6 г), *Iris pumila* (11 +), *Orchis tridentata* (11 +), *Consolida paniculata* (8 г), *Ranunculus oxyspermus* (8 г), *R. illyricus* (2 г), *Papaver hybridum* (8 г), *Polygala sosnowskyi* (12 +), *Euphorbia falcata* (2 +), *Alcea rugosa* (4 г), *Hypericum perforatum* (11 г), *Viola ambigua* (11 г), *Trinia leiogona* (12 г), *Echium vulgare* (3 г), *Anchusa azurea* (3 г), *Melampyrum arvense* (11 +), *Rhinanthus vernalis* (11 +), *Scabiosa isetensis* (6 2), *S. ochroleuca* (12 г), *Aster bessarabicus* (11 +), *Helichrysum arenarium* (7 г), *Inula oculus-christi* (11 +), *Anthemis dumetorum* (2 г), *Centaurea orientalis* (7 г), *Artemisia scoparia* (10 г), *Senecio jacobaea* (9 г), *Jurinea multiflora* (9 1), *Achillea micrantha* (6 г).

Табл. 3. РАССТОЯНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТЫ СХОДСТВА ФЛОР ТОЧЕК ОПИСАНИЯ

		Коэффициенты сходства флор по Сьеренсену											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Среднее значение		0.47	0.38	0.47	0.46	0.41	0.33	0.40	0.43	0.41	0.40	0.39	0.40
Расстояния в км	1	1.00	0.41	0.49	0.45	0.52	0.52	0.47	0.47	0.45	0.49	0.46	0.49
	2	22	1.00	0.46	0.44	0.26	0.19	0.33	0.44	0.50	0.44	0.36	0.38
	3	19	3.9	1.00	0.63	0.52	0.32	0.39	0.56	0.54	0.46	0.37	0.41
	4	18.5	4.1	0.3	1.00	0.53	0.31	0.41	0.56	0.46	0.41	0.43	0.43
	5	18.5	4	0.4	0.1	1.00	0.49	0.42	0.37	0.32	0.35	0.34	0.38
	6	0.5	22.2	22.5	18.9	18.9	1.00	0.34	0.26	0.21	0.31	0.34	0.32
	7	5.5	27.6	27.6	24	24	5.2	1.00	0.31	0.37	0.35	0.56	0.44
	8	23	20.5	17.6	17.8	17.8	23	26.6	1.00	0.57	0.48	0.29	0.40
	9	23	20.5	17.6	17.8	17.8	23	26.6	0.1	1.00	0.38	0.30	0.42
	10	18.4	6.7	6.7	3.2	3.2	18.5	18.6	14.4	14.4	1.00	0.36	0.33
	11	6	28	28.1	24.5	24.5	5.9	1.2	27.8	27.8	24.6	1.00	0.44
	12	16	34.8	34.4	30.2	30.2	15.8	13.7	24.2	24.2	28.9	14.6	1.00

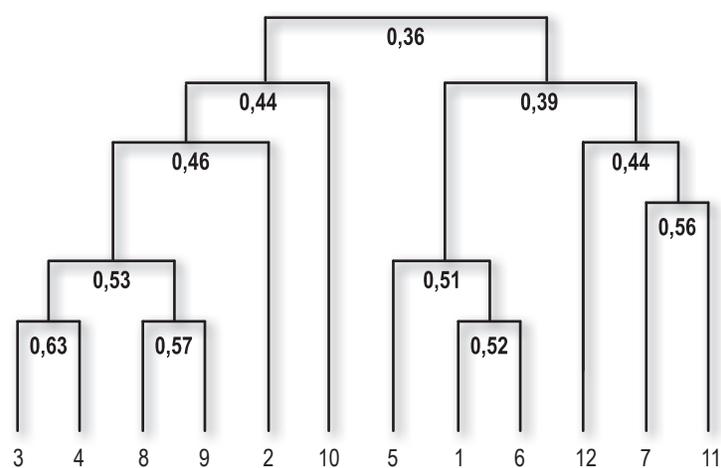


Рис. 2. Дендрограмма сходства флор точек описания.

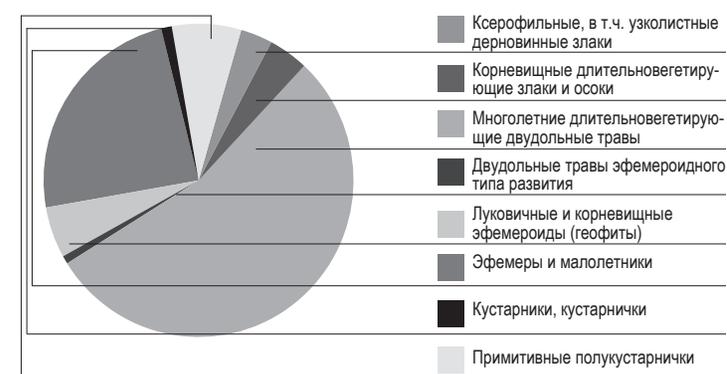


Рис. 3. Диаграмма «Жизненные формы растений петрофитных степей».

В качестве особенностей пространственно-временной организации изученных петрофитных сообществ следует указать на присутствие в них таких элементов, как мхи, лишайники и сине-зелёная водоросль *Nostoc commune*. Указанные консорты, выступающие в качестве индикаторов равновесного состояния почвенной экосистемы и естественной фитосреды, увеличивали своё обилие и частоту встречаемости на неэродированных почвах.

Сравнение флористических списков точек описания представлено в таблице 3.

Как показывают данные таблицы 3, относительно своеобразным составом петрофитной флоры выделяются ключевые участки 6, 2 и 11, находящиеся в крайних условиях произрастания и имеющие соответственно наиболее низкие показатели среднего значения коэффициента сходства – 0,33; 0,38 и 0,39.

Для удобства анализа сходства флор нами была составлена дендрограмма по «Невзвешенному центроидному методу» (рис. 2):

На общую положительную корреляционную связь между экологическими условиями (в т.ч. эдафическими) и флористическим составом описанных сообществ указывают высокие коэффициенты сходства ключевых участков 3, 4 и 5 – от 0,63 до 0,52. Сформированные в пределах одного урочища (плакорный участок высокого коренного берега р. Тугулук) они демонстрируют определяющую роль формы рельефа, состава почвообразующих пород и режима увлажнения в распределении растительности. Подобная закономерность проявляется и в точках 8 и 9 (фации одного урочища в окр. с. Донское) – коэффициент сходства 0,57. Аналогичная картина – в точках 7 и 11 (0,56), 6 и 1 (0,52).

Флора точки 1 наиболее близка к таковой в точках 10 и 12 (коэффициент сходства 0,49). Все они представляют ценотический вариант петрофитных сообществ – предкавказскую бородачевую степь.

Петрофитная степная растительность своеобразна как по флористическому составу, так и по набору жизненных форм (рис. 3). Анализ состава жизненных форм показал, что господствующую группу в петрофитных степях формирует многочисленное эуксерофильное степное разнотравье из числа многолетних длительновегетирующих двудольных трав, в т.ч. *Hieracium robustum*, *Linum austriacum*, *Salvia tesquicola*, *Galium verum*, *Jurinea arachnoidea*, *Chondrilla juncea*, *Crinitaria linosyris*, *Trinia leiogona*, *Thesium arvense*, *Potentilla recta*, *Linaria genistifolia*, *Poterium polygamum*, *Eryngium campestre*, *Phlomis pungens*, *Stachys atherocalyx* и др. Подчиненную им роль на участках с обширными обнажениями известняка выполняют полукустарнички, а в степных сообществах на щебнистых и каменистых почвах – плотно- (*Stipa borysthena*, *S. ucrainica*, *Festuca valesiaca*) и рыхлодерновинные (*Koeleria cristata*, *Agropyron desertorum*, *Cleistogenes bulgarica*) злаки. Синузия дерновинных злаков (и без того немногочисленных в видовом отношении) в петрофитных степях значительно теряет свое зональное доминирующее положение и обилие.

Синузия степных кустарников в петрофитных степях слабо выражена, кустарниковый ярус практически не развит. Помимо *Rhamnus pallasii* среди травостоя диффузно встречаются в угнетённом состоянии единичные особи *Rosa canina* (I), *Crataegus pentagyna* (+), *Swida alba* (+), *Amorpha fruticosa* (+), *Cotinus coggygria* (+).

### Заключение

1. Наши изыскания показали, что травяная растительность на каменистых обнажениях по сравнению с плакорной на развитых почвах занимает сравнительно небольшую площадь. К увеличению этой площади и обнажению материнской породы приводят как физические агенты (смыв почвы со склонов и присклоновых участков), так и разрыхление поверхности почвы, связанные с изреживанием травостоя и выводом из состава растительности многолетних компонентов в результате чрезмерной пастбищной нагрузки.

2. Местообитания петрофитных сообществ приурочены либо к дерновым мало мощным почвам с близким подстиланием коренных пород и выходами их на поверхность, либо скелетным, бесструктурным, рыхло связанным, слабо гумусированным почвенным субстратам. Они характеризуются значительным содержанием песчаной, пылеватой и каменистой фракций, что, наряду с поверхностным стоком, делают их предельно сухими.

3. Различия или сходство между фитоценозами обусловлены их положением в сопряжённом ряду месторасположений, приуроченных к определённому элементу рельефа (склон, плоская поверхность определённого уровня), каменистость и степень эродированности почвенного субстрата.

4. Нами был установлен видовой состав флоры петрофитно-степных сообществ северо-западных пределов Ставропольской возвышенности: на двенадцати ключевых участках зарегистрирован 151 вид высших растений. На наш взгляд, состав изученной флоры укладывается в рамки ксеропетрофитного варианта разнотравно-дерновиннозлаковой подзональной степи.

5. Специфику петрофитностепного варианта сообществ определяет спектр биоморф, в котором ведущими являются многолетние длительновегетирующие двудольные травы (54,3 %) и группа эфемерных и малолетних видов (23,8 %) при достаточном представителе ксерофильных полукустарничков. Отбору биоморф петрофитного комплекса способствовал самобытный субстрат на плакорных формах рельефа, а также весьма неустойчивые экологические условия (динамический гидротермический режим).

6. Основное видовое разнообразие петрофитных сообществ связано со степной подзоной Предкавказья. Наиболее интересен состав каменистых фитоценозов с участием ряда эндемиков и ксеротермических реликтов (не менее 19). Термофильную флору петрофитона изученной территории (как и всей Ставропольской возвышенности), по всей видимости, следует рассматривать как реликтовую флору времён ксеротермической фазы голоцена.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лавренко Е.М. Степи // Растительность европейской части СССР. Л.: Наука, 1980. С. 203–272.
2. Танфильев В.Г. Сухие и разнотравно-дерновиннозлаковые степи // Растительность природных сенокосов и пастбищ Ставропольского края. Ставрополь: СНИИСХ, 1977. С. 7–75.
3. Танфильев В.Г. Луговые и разнотравно-дерновиннозлаковые степи Ставропольской возвышенности // Степи и луга Ставропольского края. Ставрополь: СНИИСХ, 1980. С. 16–23.
4. Культиасов И.М. Растительность аридных областей СССР. Ч. 2. Растительность степей. М.: Изд-во МГУ, 1981.
5. Дзыбов Д.С., Лапенко Н.Г. Зональные и вторичные бородачьевые степи Ставрополья. Ставрополь: Краевая типография, 2003.
6. Слугинова И.С. Особенности флоры меловых обнажений бассейна р. Полной (Ростовская область) // Электронный журнал Исследовано в России, 068. С. 904–915, 2009. <http://earthpapers.net/ekologo-biologicheskij-analiz-flory-melovyhobnazheniy->

- basseyna-g-polnoy-rostovskaya-oblast-i-voprosy-eeohrany (Дата обращения: 29.02.16 г.).
7. Траутвайн С.А., Друп В.Д. Характеристика ценопопуляций охраняемых видов растений комплексного памятника природы областного значения «Меловые обнажения на р. Полной» (Ростовская область) // Наука. Инновации. Технологии. 2016. №2. С. 99–116.
  8. Белоус В.Н. Фито- и ценообразнообразие травяных ценозов Центрального Предкавказья (на примере степных экосистем северо-восточных отрогов Ставропольской возвышенности) // Степи Северной Евразии. Оренбург, 2012. С. 114–117.
  9. Белоус В.Н., Абрамова Т.И. Флора каменистых обнажений Ставропольской возвышенности // Вестник Ставропольского государственного университета, 1997. Естественные науки. № 12. С. 89–97.
  10. Шальнев В.А. Ландшафты Ставропольского края. Ставрополь: СтавГУ, 1995.
  11. Атлас Ставропольского края. М.: Изд-во геодезии и картографии, 1968.
  12. Корчагин А.А. Видовой (флористический) состав растительных сообществ и методы его изучения // Полевая геоботаника. Т. 3. М.; Л.: Наука, 1964. С. 39–58.
  13. Понятовская В.М. Учёт обилия и особенности размещения видов в естественных растительных сообществах // Полевая геоботаника. Т. 3. М.; Л.: Наука, 1964. С. 237–240.
  14. Юнатов А.А. Типы и содержание геоботанических исследований. Выбор пробных площадей и заложение экологических профилей // Полевая геоботаника. Т. 3. М.; Л.: Наука, 1964. С. 9–36.
  15. Миркин Б.М., Розенберг Г.С. Толковый словарь современной фитоценологии. М.: Наука, 1983.
  16. Peter H. A. Sneath, Robert R. Sokal. Numerical Taxonomy. The principles and practice of numerical classification. W.H. Freeman and Co, San Francisco, 1973.
  17. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств. С-Пб.: Мир и семья – 95, 1995.
  18. Флора Восточной Европы (тт. 9–11). Т. 9. С-Пб.: Наука, 1996; Т. 10. С-Пб.: Наука, 2001; Т. 11; М., С-Пб.: Наука, 2004.
  19. Флора европейской части СССР (тт. 1–8). Т. 1. Л.: Наука, 1974; Т. 2. Л.: Наука, 1976; Т. 3. Л.: Наука, 1978; Т. 4. Л.: Наука, 1979; Т. 5. Л.: Наука, 1981; Т. 6. Л.: Наука, 1987; Т. 7. С-Пб.: Наука, 1994; Т. 8. Л.: Наука, 1989.
  20. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008.
  21. Красная книга Ставропольского края. Ставрополь: ИП Андреев И. В., 2013. Т. 1. Растения.

УДК 50 502/504

Белоусов А.И. [Belousov A.I.],  
Близно Л.В. [Blizno L.V.]

## ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ АКТИВОВ В ЭКОЛОГО- ОРИЕНТИРОВАННЫХ УЧЕТНО- АНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

### Optimization of use of natural assets in environmental-oriented accounting and analytical systems

В статье показаны существенные особенности категории «природные активы» как с экологической, так и с антропоцентрических точек зрения, способы их отражения в системе учетно-аналитических координат. Она отражает возможности различных видов оценок природных активов с выявлением положительных и отрицательных аспектов рыночной, прямой нерыночной и косвенной нерыночной оценок процессов природопользования. Показана необходимость использования комплексного эколого-экономического учета процессов природопользования, позволяющего существенно улучшить исследования в рамках концепции устойчивого развития. В работе предложена блочная система эколого-экономического изучения взаимоотношений между элементами природной среды и экономики с использованием соответствующим образом агрегированного и дезагрегированного показателей.

The paper shows the essential features of the category «natural assets» with both ecological and anthropocentric points of view, including possibilities of their reflection in the accounting and analytical coordinates system. It reflects the possibilities in different types of natural assets assessments, identifying positive and negative aspects of market, non-market direct and indirect non-market valuations in nature processes. The necessity of using the integrated environmental-economic accounting in nature processes can greatly enhance research in the framework of the concept in sustainable development. It is proposed in article the environmental-economic study in relationship between the natural environment and economy elements using appropriately aggregated and disaggregated indicators.

**Ключевые слова:** природные активы, эколого-экономический учет, природопользование, ресурсы, устойчивое развитие.

**Key words:** natural assets, environmental-economic accounting, environmental management, resources, sustainable development.

### Введение

Улучшение экологической ситуации в России в целом и в ее отдельных регионах во многом зависит от адаптации процессов природопользования в общий механизм функционирования рыночного хозяйства. В условиях продолжающихся противоречий между целями устойчивого развития и рыночными финансово-экономическими стимулами нельзя говорить о гармонизации между природной средой и обществом, что приближает человечество к крупным потрясениям. Предпринятые в послед-

нее время попытки интеграции элементов устойчивого развития в систему рыночных отношений предполагает, в частности, использование категории природные активы, что должно существенно улучшить эту взаимосвязь. Однако, значительные сложности наблюдаются в подборе и практической адаптации конкретных инструментов и методов оценки и информационном обеспечении этой процедуры. Без решения этих вопросов невозможна оптимизация процессов природопользования на любом уровне.

### Постановка проблемы

В ряде работ отечественных ученых в области экологии и экономики раскрывается острота проблем взаимосвязи общества и природы. Необходимость практической реализации концепции устойчивого развития, базирующейся на гармонизации экологической и антропоцентрической точек зрения, приведена в работе С.Н. Бобылева [2] сложность их отражения в системах национальных счетов показаны в трудах Б.И. Башкатова [1], а необходимость учета пространственной ориентации и геоинформационного мониторинга – во взглядах, изложенных А.А. Лиховидом [4], В.С. Тикуновым, В.А. Белозеровым [8]. Существующий ныне порядок отражения природных активов должен иметь более подробную характеристику природных активов. Вместе с тем, эти активы не должны быть жестко ориентированы только на рыночные оценки, поскольку следует принимать во внимание экологические функции. Но оценка природных активов в натуральном выражении связана со множеством неопределенных моментов. В частности, четкая пространственная ориентация «взвешивание» показателей природопользования и т. д. [10].

Введение природных активов в систему учетно-статистических координат способствует сближению отечественных учетных процедур и оценок с международными стандартами финансовой отчетности [9]. Кроме этого, природные активы необходимо увязать с системой стратегического и управленческого учета. Основная цель данного исследования – выявить особенности трансформации процессов природопользования в единую систему эколого-экономического информационного обеспечения развитого регионального и общегосударственного хозяйствования.

### Методология и методы исследования

В качестве объектов данного исследования выступает категория природных активов, которые тесно связаны с региональным и биологическими особенностями. Раскрыты отличия отечественных и зарубежных методик оценки природных активов и их составной части биологических активов. Широко используются различные методические приемы оценки природных активов, в том числе с использованием категории «справедливая стоимость». Исследование опирается на материалы отечественных и международных стандартов учета, отчетности и национального счетоводства, показаны преимущества и недостатки различных моделей, отражающих взаимодействия между обществом и природной средой.

### Обсуждение результатов исследования

Основным перспективным ориентиром в современной экономике является концепция устойчивого развития. В соответствии с ней эксплуатация природных ресурсов в интересах промежуточного эффекта должна уступить место долгосрочной концепции сохранения биосферы как для потребностей общества, так и для нужды самой природы. Последнее должно быть принято во внимание при формировании комплексной системы экологического и экономического учета. Такая система должна быть результатом синтеза между экологической и антропоцентрической (экономической) точками зрения [2].

Следует признать, что до настоящего времени в учете и статистике взаимосвязь между природной средой и экономикой рассматривается только с экономической точки зрения. А сама оценка природных ресурсов связывается с рыночной стоимостью.

В процессе исчисления себестоимости в российской статистике использование показателей природной среды в экономических целях не учитывается, поэтому они не находят отражения в важнейших агрегированных показателях, даже в величине валового внутреннего продукта. Некоторые виды ее использования могут учитываться не как затраты, а как «другие изменения в активах», которые показывают изменения в рыночной стоимости соответствующего природного актива. Издержки, связанные с истощением природных ресурсов, включают только расходы по добыче. В то же время сокращение потенциальных возможностей получения дохода в процессе последующих производственных циклов не находит отражение на счетах производства СНС и также регистрируется только как «другие изменения в активах». В частности, если земля используется только как полигон для хранения отходов, то в СНС учитываются только расходы по перевозке отходов к месту их складирования [1]. Ухудшение же качества земли может найти отражение только в рамках «других изменений» стоимости, при условии, что рыночная стоимость земли также изменена. В системе же эколого-экономического учета такое использование окружающей среды рассматривается как часть издержек.

Большинство подходов к оценке неэкономических выгод и потерь в результате использования природной среды исследовались независимо от системы национальных счетов – как правило, в рамках анализа затрат и результатов при составлении и оценке проектов или программ, либо при общем пересмотре агрегированных макро-показателей, таких как национальный доход, или продукт. В своем большинстве эти оценки не показываются в концепциях национальных счетов, поскольку они не ориентированы на рыночную стоимость.

По нашему мнению, действующий ныне вариант национальных счетов должен иметь более подробную характеристику активов. К материальным активам следует отнести и некоторые части природной среды, такие как земля и недра, поскольку они приносят экономические выгоды их владельцу, чаще всего государственным структурам. Последнее пред-

полагает конкретно закрепленное право собственности, которое может регулироваться либо законодательством, либо наличием рыночных цен. Данные активы считаются экономическими по своему содержанию, хотя рыночная стоимость активов – не единственно возможная оценка. Природные активы могут иметь рыночную стоимость, существенно отличающуюся от их совокупной экономико-экологической стоимости, учитывающей не только экономические виды использования этих активов, но и большое число дополнительных экологических функций. Следовательно, система комплексного экологического и экономического учета должна не только включать рыночные аспекты национальных счетов, но и использовать широкую концепцию экономической оценки.

Основным преимуществом экономического подхода, применяемого в современном национальном счетоводстве, является наличие сопоставимых данных о рыночной стоимости. Это предполагает проведение учетных оценок по сбору и обработке стоимостных данных. Оценка же в натуральном выражении связана с множеством неопределенных моментов. Не используя физические данные, невозможно всесторонне описать взаимосвязь между природной средой и обществом, причем – во многих случаях такие данные подходят для эколого-экономических исследований больше, чем денежные показатели. Примером является оценка движения потоков материалов и питательных веществ в природной среде, а их потоков из природной среды в экономику и из экономики обратно в виде отходов. Информация о физическом состоянии биосферы необходима, но недостаточна для характеристики взаимосвязи между окружающей средой и экономикой. Основная сложность использования натуральных показателей заключается в подготовке огромных массивов данных, зачастую без оценки их значимости. Весьма непросто получить сжатое физическое описание предмета исследования, так как сложно, а иногда и невозможно, агрегировать его из-за использования различных подходов в измерении и из-за нехватки знаний об их относительной важности. Кроме этого, необходимо принимать во внимание существующую пространственную ориентацию экологических данных препятствующую такому уровню обобщения, который служил бы материалом по регулированию процессов природопользования [4]. Не решена проблема «взвешивания» показателей природопользования, а для сопоставления данных прибегают к денежным оценкам. Весьма часто для анализа материальных потоков между природой и экономикой используется концепция материальных энергетических балансов (особенно матричные таблицы затрат и результатов). Общепризнанной модели процессов, преобразований, происходящих в природе, и динамики влияния на нее экономической деятельности нет [10]. При этом измерить загрязнение и его влияние на качество окружающей среды можно только в отдельных регионах. Динамика взаимосвязей между экологическим стрессом, обратной реакцией и загрязнением в большинстве случаев не известна, несмотря на попытки разработать модели «статистической экологии» или «экоразвития». Причем успешными были работы

и модели по пространственному распределению отходов, их (частичной) ассимиляцией, трансформацией их физического и химического состава и окончательного местонахождения лишь в региональном аспекте.

Эколого-экономический учет целесообразно вести в сфере счетов природных ресурсов. Эти счета показывают запасы и движения материалов, используемых в качестве экономического сырья. Они являются дополнением к материальным (энергетическим), где дается характеристика природных ресурсов в рамках экономических процессов. Счета природных ресурсов уже получили распространение для целого ряда стран. В настоящее время для разработки систем эколого-экономического учета очень важной представляется увязка этих счетов со стоимостными данными национальных счетов. Кроме этого, счета природных ресурсов могут быть увязаны с системой финансового стратегического и управленческого учета. На этой основе можно вести оценку текущего природопользования, а также перспективные расчеты.

Введению природных активов в систему финансово-хозяйственных связей во многом способствует конвергенция отечественных учетных процедур в международные стандарты финансовой отчетности и в частности процессы биотрансформации сельскохозяйственных и биологических активов. [3] Более того в стандарте МСФО (IA S) «41. Сельское хозяйство» само сельскохозяйственное производство понимается как управление биотрансформации растений и животных через такую категорию, как биологические активы. Распространяется он только на процессы и только на начальных стадиях аграрного производства, не затрагивая переработку получаемой продукции. Кроме этого, принципиальное значение имеют границы управляемости биологическими активами. Получение биологических ресурсов из неуправляемых источников (вылов рыбы из океанов и морей, получение древесины посредством вырубки естественных лесов и т.д.) уже не считается сельскохозяйственной деятельностью, поскольку последняя предполагает возможность и необходимость изменения биологических ресурсов. Для сельскохозяйственного производства возможно как однократное, так и многократное использование биологических активов. Та часть животного и растительного мира, которая не используется в сельскохозяйственной деятельности и относится к декоративным защитным растениям, животным зоопарков и цирков, тоже не включается в сельскохозяйственные активы.

Следует иметь в виду и то, что в соответствии с МСФО 41 классифицируются эти активы в зрелом состоянии, то есть те, которые достигли необходимых параметров, позволяющих приступить к конкретному получению продукции или осуществлять ее регулярный сбор. Все остальные относятся к категории незрелых.

Рассматривая отечественную практику учета биологических активов, следует отметить, что в отечественной законодательной базе до сих пор не используется понятие биологические активы, в результате этого сельскохозяйственные активы регламентируются в части учетно-анали-

тических процедур двумя положениями по бухгалтерскому учету: ПБУ 6/01 «Учет основных средств» и ПБУ 5/01 «Учет материально-производственных запасов», что приводит к игнорированию биологических активов как отдельного вида, а значит, не принимаются во внимание их природа и сущность. В России сельскохозяйственные активы делят на оборотные (например, продуктивный скот), отражаемые на счете 11, и внеоборотные, включающие в себя основной продуктивный скот (счет 01). Если строго следовать пункту 17 ПБУ 6/01 «Учет основных средств», то на них необходимо начислять амортизацию, за исключением земли объектов природопользования и музейных объектов. Экономическая же сущность этих процессов указывает нам на то, что продуктивный скот не только не амортизируется, но и в результате своего привеса увеличивает свою стоимость. Итогом такого рода действий является искажение отчетности, занижение размера активов, завышение объема к прибыли от реализации скота.

К тому же в отечественной практике отсутствует указание об использовании справедливой стоимости при реализации скота. Применение справедливой стоимости, теоретически, должна дать более точную оценку потенциала предприятия, учитывающую рыночную конъюнктуру и может меняться в зависимости от рынков сбыта продукции и ее зонального расположения. Основная сложность в использовании справедливой стоимости заключается в высокой сложности расчетных операций по оценке.

Кроме того, что в МСФО нет деления биологических активов на внеоборотные и оборотные, а сама информация о них представляется обособленно в отдельной строке бухгалтерского баланса, с последующим их описанием в отдельных подстатях баланса или в примечаниях к ним.

С позиции экономики и производства деление активов на «производственные» и «непроизводственные» очевидно, хотя с экологической точки зрения это не столь явно. Так, деятельность живой природы неконтролируема, с экономической точки зрения может приводить к образованию производственных активов, что выступает производством с экологической точки зрения.

Использование природных активов может приводить к их частичному или полному истощению (в количественном выражении), или не вызывает изменений в количественных параметрах природной среды, воздействуя на ее качество. В первом случае количественные потоки из природной среды в экономику рассматриваются как природные товары. В другом же случае использование природных активов можно понимать как потоки экологических услуг из окружающей среды в экономику. С этих позиций использование экологических товаров может приводить к истощению природных ресурсов, а использование экономических услуг приводит к их деградации (качественному ухудшению).

Понятие «экологические (природные) товары» и «экологические услуги» напоминают понятия экономических продуктов, хотя и с некоторыми поправками. С экономической точки зрения природа не может производить товары или услуги для хозяйственных целей.

В нижеследующей таблице нами приведены некоторые функции природных активов, а также характеристика антропогенных активов. Из нее следует, что функции носят весьма разнообразный характер. В некоторой мере они конкурируют друг с другом. Это особенно верно по отношению к такой функции природы как места удаления отходов с одной стороны и функций, связанных с потреблением домашних хозяйств (питьевая вода, воздух, рекреационные функции), с другой. Использование одной функции природной среды может ограничивать ее возможности осуществлять другие, что и является основной для организации эколого-экономических взаимосвязей, которые затем могут быть подвержены анализу.

Дальнейшее углубление связи с социально-экономическими данными можно обеспечить путем использования более полных систем учета и статистики окружающей среды.

Функцию природной среды по обезвреживанию и удалению отходов производства можно рассматривать как составную часть по переработке отходов, где происходит перемещение физических объемов между экономикой и окружающей средой без изменения качества последней. Однако, это не относится к земле, экономическое использование которой связано с медленным или даже умеренным ее истощением, эрозией почв. Поэтому необходим поиск показателей, позволяющих оценить процессы деградации почвенного покрова.

Оценка отрицательных воздействий на окружающую среду включает в себя два аспекта: оценку непосредственных последствий и оценку косвенных последствий. Однако последние на нынешнем этапе могут быть учтены лишь частично. Примечательной в этом отношении является функция природы по удалению отходов. Учесть объем отходов, выбрасываемых в природу, можно довольно точно, но обратное воздействие загрязненной природы на общество оценить гораздо сложнее.

Оценка использования природных активов является одной из самых сложных эколого-экономических проблем. Здесь возможно три подхода к оценке:

- а) по рыночной оценке (или справедливой стоимости);
- б) прямой нерыночной оценке (в т. ч. с учетом возможности нести расходы;
- в) косвенные нерыночные оценки (с использованием информации об издержках, связанных с ущербом окружающей среды, или затратами по очистке).

По нашему мнению, наиболее простым способом оценки является рыночная оценка использования активов, так как в ней могут использоваться эмпирические данные, хотя существует и целый ряд особенностей и осложнений, вызванных практикой проведения сбора данных.

Для оценки биологических и небологических товаров, включающих продукцию растениеводства и животноводства, могут быть использованы текущие рыночные цены на эти товары. Издержки, связанные с

амортизацией этих активов, можно определить, приравняв их к величине обесценения за анализируемый период. Отсюда уменьшение цены реальных активов может быть выражено в снижении стоимости актива и определяется посредством корректирования новых видов активов на коэффициент обесценения.

Оценка произведенных реальных активов, представленных в частности землей, могут быть оценены, исходя из цен сделок, или опираясь на средневзвешенные рыночные цены на аналогичные виды, а иногда и через величину арендной платы.

При потреблении произведенных запасов рыночная оценка – возникает при их эксплуатации. Если использование природных активов не связано с рыночными операциями, то следует проводить прямую или косвенную нерыночную оценку, основанных на опросах или на концепции затрат по замещению.

Использование условных оценок возможно при качественном и количественном природопользовании в целях общественного потребления. Примером последнего является использование воздуха и воды, стоимость рекреационных услуг. К числу возможных методов такой оценки можно отнести методы, основанные на сохранении качества отдельных компонентов природной среды, а также интеллектуальных ресурсов. [6]

Косвенная нерыночная оценка экономических функций основывается на фактических или прогнозируемых издержках. Понесенные обществом затраты могут быть недостаточными, чтобы восстановить нарушенный баланс. В последнем случае требуется расчет условно прогнозируемых издержек, которые несло бы общество при условии практически полного возмещения ущерба. Здесь издержки, связанные с использованием природной среды, включают затраты, которые необходимо нести обществу без нанесения природе сколь-нибудь существенного ущерба. Это предполагает оценку полного фактического истощения природной среды, которая возможна на использовании двух теоретических постулатов:

- а) применение концепции устойчивости;
- б) концепция потребления основного капитала антропогенных активов при оценке использования произведенных природных активов в процессе хозяйственной деятельности.

Понятие устойчивого развития можно рассматривать в контексте такого рассмотрения хозяйственной деятельности, которая сохраняла бы возможность сохранения как производственного, так и природного капитала. В более сжатом виде концепцию устойчивости можно использовать для оценки природных активов. В этом случае их можно выразить через сумму компенсационных издержек. Последняя похожа на функцию производственного капитала в национальных счетах. Уровень потребления основного капитала представляет собой текущие издержки использования этого капитала в воспроизводственном процессе.

Для практической реализации концепции компенсационных издержек и восстановления выбывающего основного капитала мы считаем целесообразным использовать фактически сложившиеся рыночные цены, хотя в ряде случаев они могут не соответствовать реальным экономическим издержкам [9]. Концепцию устойчивости можно применять и по отношению к жизненно важным природным ресурсам.

Концепция компенсационных издержек ориентирована на сохранение экологического равновесия возможно при наличии равенства между величиной отходов, поступающих в природную среду и поглощающей способностью последней, не связанной с долгосрочными отрицательными последствиями.

Несмотря на достаточно большое количество подходов к разработке учетно-аналитических моделей, отражающих взаимодействие между природной средой и экономикой, здесь имеются два разных подхода. По первому варианту эколого-экономические системы рассматриваются преимущественно как отрицательное воздействие на природную среду. В данном случае главное значение имеет описание качественного состояния отдельных природных компонентов, прежде всего в региональном аспекте, а информационные потоки имеют преимущественно натурально-физическую форму.

Другая, теоретическая линия, заключается в том, что в учетно-экономических моделях основной упор делается на экономическую сторону проблемы, а природоохранные вопросы учитываются только в той мере, в какой они связаны с хозяйственными операциями. Примером этому могут служить мероприятия, связанные с расходами на охрану окружающей среды и издержками, отражающими фактический ущерб. Данные учетно-экономические модели представляют более распространенные варианты обычных национальных счетов, поскольку обеспечивают получение стоимостных данных о фактических операциях в их рыночной оценке. Кроме этого есть концепции промежуточного плана, использующие в различных вариациях как физические, так и стоимостные единицы измерения.

Системы, использующие физические единицы, дают возможность описать информацию о материальных потоках между окружающей средой и экономикой (использование материальных ресурсов, отходов производства, их трансформации). При этом учет природных ресурсов и материально-энергетические балансы существенно дублируют друг друга.

В эколого-экономическом учете описание хозяйственной деятельности в денежной форме охватывает и оценку использования природопользования. Выбор наиболее адекватных методов такой оценки позволяет наиболее полно учитывать издержки, связанные с эколого-экономическими процессами. Это дает возможность не только вести учет природоохранной деятельности в экономическом анализе, но и создает возможность вести ориентирование в части выбора затратного механизма [11].

Главным преимуществом эколого-экономического учета является то, что он охватывает не только национальные счета, содержащие

информацию о хозяйственной деятельности, но и счета средозащитного характера, отражающие физико-стоимостные потоки в этой сфере. Однако такая интеграция не может быть реализована в полном объеме, поскольку отсутствует полноценная информация об эколого-экономических процессах. Главными причинами здесь являются не столько финансовые сложности, сколько проблемы, возникающие при моделировании климатических, физических, химических, биологических процессов, происходящих в окружающей среде. Абсолютное большинство оценок состояния окружающей среды осуществляется на конкретный момент времени, что не дает возможности увидеть полноценную картину динамики процессов природопользования, если не считать отдельные региональные аспекты этой проблемы. Целостная оценка существующих систем экологической и экономической информации все еще является неразрешенной проблемой.

Успешно разрешать проблемы экологического учета в рамках действующей системы национального счетоводства через операции потоков и запасов в полной мере до сих пор не считается возможным. Большинство исследований в учете и статистике природопользования сходятся во мнении о невозможности внесения больших корректировок в обычные национальные счета [5]. На наш взгляд, более перспективным можно считать создание вспомогательной системы счетоводства по взаимодействию экономики и окружающей среды.

Существующая сейчас система национального счетоводства используется для анализа структурных составляющих рыночной экономики и происходящих в ней изменений. Обычно исследование этих проблем через рыночные операции является важным преимуществом, поскольку для прогнозирования хозяйственных явлений необходимы стоимостные данные о производстве и занятости, движении капитала и доходов. Сама же первичная информация формируется на базе отчетных бухгалтерских данных, хотя большое количество природоохранных процессов сложно представить в денежной форме. С этих позиций вспомогательная система экологических счетов должна включать их и быть увязана с традиционными национальными международными видами учета.

Имея в виду сложный характер взаимосвязи общества и окружающей среды, наиболее общие методы их анализа и оценки являются и наиболее противоречивыми. Отсюда, вспомогательная система должна быть одновременно цельной, но в ней следует отражать различные научные взгляды. Здесь целесообразно иметь возможность анализировать прямое и косвенное воздействие хозяйственного использования природной среды на экономику, что подразумевает наличие тесных взаимосвязей между классическими системами учета и вспомогательными, отражающими природоохранные вопросы. Взаимодействие между ними можно использовать для создания обобщающих эколого-экономических моделей. Однако тесная увязка с национальными счетами ограничивает экспериментальный уровень систем, которые изначально были ориентированы на природоохранную деятельность. Уменьшить этот отрицательный момент

можно построением гибких модулей (блоков), опирающихся на одни и те же концептуальные установки, а при их существенном отличии – переходные таблицы к системам национальных счетов.

Другой проблемой является то, что настоящая система эколого-экономического учета ориентирована на национальный, общедоказательный уровень, а разбивка по регионам носит вспомогательный характер.

Приоритет федеральных данных имеет и свои недостатки и преимущества. Основной недостаток – это отсутствие данных о региональных и местных особенностях, которые наиболее полно отражают проблемы природопользования. Кроме этого, федеральные национальные счета по своей структуре проще, чем региональные, что обусловлено недостатком информации о межрегиональных хозяйственных связях. Поэтому в большинстве случаев учетная информация, выраженная в натуральных показателях, пока является наилучшим средством оценки регионального экономического воздействия и источников этого воздействия на окружающую среду.

С нашей точки зрения, наиболее подходящей основной экономической информации для анализа взаимоотношений между окружающей средой и экономикой является информация о затратах и результатах, поскольку ее можно достаточно легко расширить. В этом случае оно может включать потоки природных ресурсов из биосферы в воспроизводственный процесс в качестве вводимых ресурсов и потоков отходов производственного и потребительного характера в качестве отрицательного результата. Блочная система эколого-экономического учета предполагает наличие как агрегированных, так и дезагрегированных показателей. Дезагрегирование способствует определению средозащитных мероприятий, предотвращающих или уменьшающих ухудшению качества природопользования. Более того, появляется возможность дополнительно детализировать данные о величине природных ресурсов и их изменении.

Расширенный вариант эколого-экономического учета и анализа особенно ценен для понимания социальных и демографических причин, обуславливающих воздействие общества на окружающую среду и последствий этого влияния на уровень жизни человека [8]. Кроме того, могут быть рассмотрены результаты учета экологических функций как производства экологических услуг. И наконец, расширенный вариант означает попытку ввести в конкретном количественном выражении более широкое понятие «продукции производства и услуг» на основе экстернализации внутренних промежуточных издержек средозащитного характера. Последнее позволяет давать обобщенную характеристику эколого-экономической эффективности.

### Выводы

Проведенный анализ установил, что повышения качества информационного обеспечения рационального природопользования во многом заключается в развитии и совершенствовании эколого-экономического учета. Для этого необходимо более широкое использование первич-

ной информации учитывающий требования современного бухгалтерского экологического учета, а также введения системы вспомогательных экологических счетов в национальные счета с разбивкой их на общенациональные и региональные. Это позволит экстернализовать внутренние издержки природоохранного характера повышающих точность определения эколого-экономической эффективности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Башкатова Б.И. Национальное счетоводство. М.: Финансы и статистика, 2005.
2. Бобылёв С.Н. Экология и экономика природопользования. М.: Изд-во ЮНИТИ-ДАНА, 2002.
3. Гетьман В.Г., Блинова У.Ю., Герасимов Л.Н. Современный бухгалтерский учет и его проблемы. М.: Финансовый университет, 2014.
4. Лиховид А.А. Ландшафтная экология: проблемы и перспективы развития // Наука. Инновации. Технологии. 2010. №69. С. 132–137.
5. Латыпова О.В. Эколого-экономический анализ // Аудит и финансовый анализ. 2004. № 2.
6. Михайлова Г.В., Марченко Н.Е. Моделирование эффективности деятельности организации с учетом развития интеллектуальных ресурсов // Вестник Института дружбы народов Кавказа. Ставрополь, 2015. № 3(35). С. 106–112.
7. 26 Положений по бухгалтерскому учету. Положение о главных бухгалтерях // Новый федеральный закон «О бухгалтерском учете». М.: Изд-во «Проспект», 2015.
8. Тикунов В.С., Белозеров В.С., Щитова Н.А., Панин А.Н., Черкасов А.А. Геоинформационный мониторинг: инструмент пространственно-временного анализа миграции населения // Вестник Московского университета. Серия 5. География. № 2. 2015.
9. Ткач В. Интернациональная модель финансового учета: концепция, теория и практика / В. Ткач. Новочеркасск: НПМА, 2006.
10. Экономическая эффективность развития России / под ред. К.В. Попенова. М.: Теис, 2007.
11. Шнейдман Л.З. Экологический учет и аудит. М.: ФБК-Пресс, 2000.

#### НАУКИ О ЗЕМЛЕ

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ, № 4, 2016

УДК 622. 243.22 / 692.4 **Гасумов Р.А. [Gasumov R.A.],  
Шихалиева И.С. [Shikhaliyeva I.S.],  
Искандерова И.И. [Iskanderova I.I.]**

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ

#### Investigation of pressure loss during the of gas-liquid flow in vertical pipes

На заключительной стадии разработки газовых и газоконденсатных месторождений возникают осложнения, которые ухудшают условия эксплуатации скважин и снижают добычные возможности. Одним из них является накопление в стволе скважин жидкости, которая из-за недостаточной скорости восходящего потока газа не выносится на поверхность. Как известно, поступление подошвенной воды в скважину обусловлено как общим подъемом границы раздела воды и газа вследствие падения давления в газовой части пласта, так и локальным поднятием этой границы в призабойной зоне добывающей скважины и образованием так называемого водяного конуса. Особенности технологических режимов работы скважин с водопроявлениями требуют уточнения расчетов падений давлений на всем пути движения газа: от контура питания к ПЗП, далее от внешней границы ПЗП к контуру скважины, затем движение в объеме частично или полностью заполненного водой забоя и, наконец, вверх от башмака насосно-компрессорных труб (НКТ) до устья. Для понимания процессов подъема жидкости из скважин, умения проектировать установки и выбора материалов необходимо знать законы и параметры движения газожидкостных смесей (ГЖС) в трубах.

In the final stage of gas and gas condensate fields development there are complications that worsen the conditions of wells operation and reduce production opportunities. One is the accumulation of fluid in the well bore, which is due to lack of upward gas flow velocity is not brought to the surface. As is known, the bottom water flows into the well not only due of general rise of gas-water interface because of pressure drop in the gas reservoir portion, but local rise near the bottomhole of production well and formation of so-called water-cone. Features of technological operation modes of wells with water seepage require clarification calculation pressure drop all the way of gas motion: from the supply circuit to the bottomhole formation zone, then from the outer limit of the bottomhole formation zone to the outline of well, and then the motion in the amount of partially or completely filled with water bottom and finally, up from the shoe tubing to the mouth. To understand the processes of liquid recovery from wells, the ability to design the installation and material selection it is necessary to know the laws and parameters of movement of gas-liquid mixtures in the pipes.

**Ключевые слова:** скважина, газожидкостные смеси, давление, месторождение, насосно-компрессорные трубы.

**Key words:** well, gas-liquid mixture, pressure, field, tubing.

#### Введение

Более 60 % всей добычи газа в РФ сосредоточено в районах Крайнего Севера. Большинство месторождений находятся на поздней стадии разработки, что обуславливает возникновение специфических для этих месторождений вопросов планирования их доразработки. Специфика доразработки связана со значительным снижением продуктивности скважин вследствие падения пластового давления, уменьшением фазо-

вой проницаемости призабойной зоны пласта (ПЗП), неполным выносом жидкости из ствола скважины, ростом столбов жидкости на забоях скважин, приводящем к самозадавлению скважин.

Перечисленные особенности технологических режимов работы скважин с водопроявлениями требуют уточнения расчетов падений давлений на всем пути движения газа: от контура питания к ПЗП, далее от внешней границы ПЗП к контуру скважины, затем движение в объеме частично или полностью заполненного водой забоя и, наконец, вверх от башмака насосно-компрессорных труб (НКТ) до устья.

Обводнение добывающих скважин – одна из основных проблем газовых месторождений, находящихся на поздней стадии разработки. Как известно, поступление подошвенной воды в скважину обусловлено как общим подъемом границы раздела воды и газа вследствие падения давления в газовой части пласта, так и локальным поднятием этой границы в призабойной зоне добывающей скважины и образованием так называемого водяного конуса.

Механизм обводнения эксплуатационных скважин представляется в следующем виде. На начальной стадии происходит конусообразное подтягивание подошвенной воды к забоям скважин по трещинам. Вода постепенно накапливается на забое и по мере истощения энергетических возможностей газовых пластов уровень ее в стволе скважины повышается.

### Материалы и методы исследования

Для изучения движения газожидкостных потоков в вертикальных трубах проводились многочисленные эксперименты, результаты которых позволили получить зависимость перепада давления от различных физических параметров. Одним из способов исследования является моделирование. Моделирование – это построение и изучение моделей реально существующих предметов и явлений, а также конструируемых объектов для определения, либо улучшения их характеристик, рационализации способов их построения, управления ими и т.п.

Для расчета падения давления вдоль вертикальных насосно-компрессорных труб при движении в них газожидкостных смесей рекомендуется применять зависимость приведенного градиента давления  $i$  от комплексного числа Фруда и числа Фруда по жидкости.

$$i = \frac{\Delta P_{mp}}{\rho_{жс} \cdot g \cdot \Delta l} \quad (1)$$

Ряд авторов [1, 2, 9] предлагает применять данную зависимость к расчету падения давления вдоль насосно-компрессорных труб при движении в них газожидкостных смесей. Суть этой методики сводится к численному интегрированию дифференциального уравнения [10, 11]

$$\frac{dP}{dx} = \underbrace{\rho_g(P, T) \cdot g}_{\text{учет силы веса газа в газожидкостной смеси}} + \underbrace{\rho_{жс} \cdot g \cdot f(Fr^*, Fr_{жс})}_{\text{учет силы веса жидкости и сил сопротивления движению газожидкостной смеси}} \quad (2)$$

$$\text{Размерность, } \left[ \frac{dP}{dx} \right] = \frac{AmM}{M} \text{ а размерность } [\rho_g(P, T) \cdot g] = \frac{Pa}{M}$$

Ось  $x$  в (2) направлена вертикально вниз. Численное интегрирование (2) осуществляется совместно с начальным условием

$$P|_{x=0} = P_y \quad (3)$$

Для того, чтобы обе части уравнения (2) привести к одинаковой размерности, переведем размерность правой части в  $\frac{AmM}{M}$ .

В результате получим уравнение

$$\frac{dP}{dx} = [\rho_g(P, T) \cdot g + \rho_{жс} \cdot g \cdot f(Fr^*, Fr_{жс})] \cdot 0,01011972 \times 10^{-3} \quad (4)$$

Функция  $f(Fr^*, Fr_{жс})$  в уравнении (4) рассматривается как заданная таблично по результатам многочисленных физических и вычислительных экспериментов.

Для решения дифференциального уравнения (4) необходимо знать распределение температуры по стволу скважины. Рекомендуется брать линейное распределение температуры от башмака НКТ до границы с многолетнемерзлыми породами и линейное распределение от границы с многолетнемерзлыми породами до устья скважины. При этом задавать разные скорости падения температуры на первом и втором участках.

Значения приведенного градиента давления получены  $\frac{\Delta P}{\gamma_{жс} \cdot \Delta l} = f(Fr^*, Fr_{жс})$  по результатам опытов, где в качестве рабочей жидкости применялась чистая вода с плотностью  $\rho_B = 1000 \text{ кг/м}^3$ , а числа Фруда рассчитывались при условии, что  $\rho_{жс} = \rho_B = 1000 \text{ кг/м}^3$ .

Введение в эмпирическое уравнение (4) специального корректирующего  $M(\rho, y)$  множителя (5) вызывает необходимость уточнения условий, так как для удаления с забоя скважины легкой газожидкостной смеси потребуется меньшая, по сравнению с удалением дистиллированной воды, депрессия

$$\frac{dP}{dx} = [\rho_g(P, T) \cdot g + M(\rho, y) \cdot \rho_{воды} \cdot g \cdot f(Fr^*, Fr_{воды})] \cdot 0,01011972 \times 10^{-3} \quad (5)$$

Корректирующий множитель должен быть функцией двух безразмерных переменных,

$$\rho = \frac{\rho_{жс}}{\rho_B} \quad (6)$$

$$y = \frac{\gamma}{\gamma_0} \quad (7)$$

где  $\rho_{жс}$  – плотность газожидкостной смеси скопившейся на забое скважины;  
 $\rho_v$  – плотность воды;  
 $\gamma$  – газожидкостный фактор (см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>);  
 $\gamma_0$  – выбранная для нормировки базисная величина  $\gamma_0 = 1$  см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Корректирующий множитель  $M(\rho, \gamma)$  должен обладать рядом свойств:

- функция  $M(\rho, \gamma)$  должна монотонно возрастать по каждому аргументу;
- для  $\rho > 1$  множитель  $M(\rho, \gamma) > 1$ ;
- для  $\rho < 1$  множитель  $M(\rho, \gamma) < 1$ ;
- для  $\rho = 1$  множитель  $M(\rho, \gamma) = 1$ ;
- для  $\gamma = 0$  и для  $\forall \rho \geq 1$  множитель  $M(\rho, \gamma) = 1$ ;
- для  $\gamma \rightarrow 0$  и для  $\rho \rightarrow (1-0)$  множитель  $M(\rho, \gamma) \rightarrow 1$ .

Примером функции  $M(\rho, \gamma)$ , удовлетворяющей перечисленным свойствам, служит функция

$$M(\rho, \gamma) = \begin{cases} \frac{\rho^{1/\gamma} + A}{1 + A}, & \text{для } 0,2 \leq \rho < 1 \text{ и } 0,10 \leq \gamma \leq 10; \\ \frac{\rho^\gamma + B}{1 + B}, & \text{для } 1,0 \leq \rho \leq 1,5 \text{ и } 0,10 \leq \gamma \leq 10. \end{cases} \quad (8)$$

Параметры  $A$  и  $B$  вычислены по заданному значению функции  $M(\rho, \gamma)$  в конкретной точке  $(\rho_0, \gamma_0)$ . Если исследуемые жидкости по плотности варьируются в пределах от  $\rho_{жс} = 200$  кг/м<sup>3</sup> до  $\rho_{жс} = 1500$  кг/м<sup>3</sup>, тогда безразмерная переменная  $\rho = \rho_{жс}/\rho_0$  будет изменяться в отрезке  $0,2 \leq \rho \leq 1,5$ .

Безразмерная переменная  $\gamma$  будет изменяться в отрезке  $0,10 \leq \gamma \leq 10$ . При значениях  $M_{min} = M(0,2; 0,1)$  и  $M_{max} = M(1,5; 10)$  параметры  $A$  и  $B$  будут вычисляться по формулам

$$A = \frac{M_{min} - 0,2^{10}}{1 - M_{min}} \quad (9)$$

и

$$B = \frac{1,5^{10} - M_{max}}{M_{max} - 1} \quad (10)$$

Значения параметров  $A$  и  $B$  для некоторых конкретных величин  $M_{min}$  и  $M_{max}$  приведены в таблице 1.

Графики функции  $M(\rho, \gamma)$  при заданных параметрах  $A = 0,67$  и  $B = 36,78$  представлены на рисунке 1.

Табл. 1. ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ  $A$  И  $B$  ДЛЯ РАСЧЕТА ПОПРАВочНОГО МНОЖИТЕЛЯ  $M(\rho, \gamma)$

$M_{min}$		$M_{max}$			
		1,50	2,00	2,50	3,00
0,40	A	0,67	0,67	0,67	0,67
	B	112,33	55,67	36,78	27,33
0,50	A	1,00	1,00	1,00	1,00
	B	112,33	55,67	36,78	27,33
0,60	A	1,50	1,50	1,50	1,50
	B	112,33	55,67	36,78	27,33
0,70	A	2,33	2,33	2,33	2,33
	B	112,33	55,67	36,78	27,33

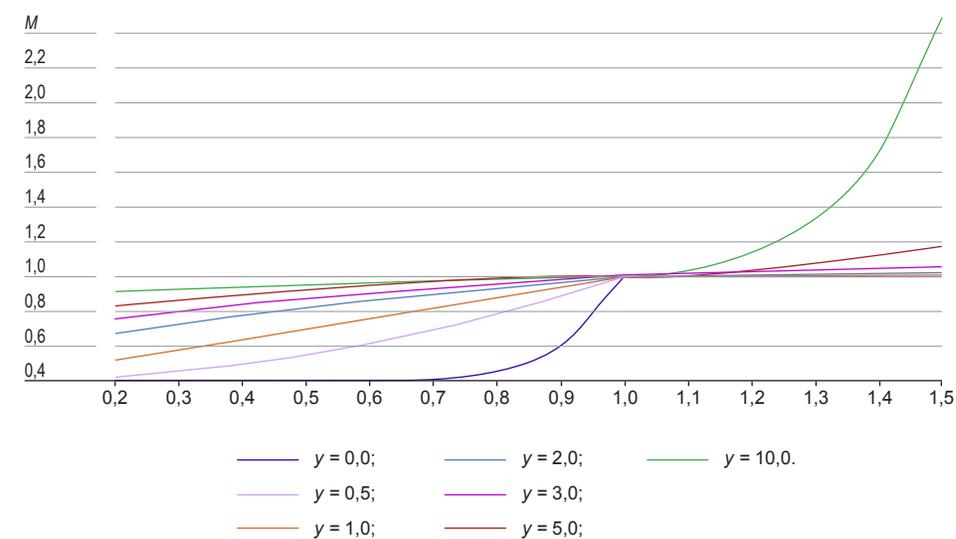


Рис. 1. Графики функции  $M(\rho, \gamma)$  при заданных значениях параметров  $A = 0,67$  и  $B = 36,78$  (отвечающих значениям  $M_{min} = 0,4$  и  $M_{max} = 2,5$ )

Задача Коши для нелинейного дифференциального уравнения (4) 1-го порядка решается численным способом – методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Расчетные формулы имеют вид [3]:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y); \quad y|_{x=x_0} = y_0. \quad (11)$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) + O(h^5) \quad (12)$$

$$k_1 = h \cdot f(x_n, y_n) \quad (13)$$

$$k_2 = h \cdot f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right) \quad (14)$$

$$k_3 = h \cdot f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}\right) \quad (15)$$

$$k_4 = h \cdot f(x_n + h, y_n + k_3) \quad (16)$$

Выполнение расчетов давления в газожидкостной смеси при ее движении снизу вверх вдоль НКТ потребует исходных данных (табл. 2) и значений управляющих параметров  $M_{min}$  и  $M_{max}$  (табл. 3) [4].

Табл. 2. ИСХОДНЫЕ ПРОМЫСЛОВЫЕ ДАННЫЕ УСЛОВНОЙ СКВАЖИНЫ А

Перечень исходных данных для скважины А	
Дебит скважины по газу Q (тыс. м <sup>3</sup> /сут)	300
Плотность жидкости/пены (кг/м <sup>3</sup> )	650
Газоводяной фактор γ (см <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> )	10
Давление на устье скважины (атм)	20
Толщина многолетнемерзлых пород (м)	500
Длина НКТ от устья до башмака (м)	1000
Наружный диаметр НКТ D (мм)	168
Толщина стенки НКТ d <sub>1</sub> (мм)	8,9
Температура газа на устье скважины (К)	282
Температура газа у башмака НКТ (К)	296
Число точек просчета вдоль НКТ	101

Табл. 3. ЗАДАННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ

Управляющий параметр	
Минимальное значение $M_{min}$ для безразмерного поправочного множителя $M(\rho, \gamma)$ в формуле	0,4
Максимальное значение $M_{max}$ для безразмерного поправочного множителя $M(\rho, \gamma)$ в формуле	2,5
Коэффициент падения температуры (в %) вдоль НКТ напротив многолетнемерзлых пород (в %)	65

### Результаты исследования и их обсуждение

В случае, когда с потоком газа выносятся жидкость с коэффициентом газоводяного фактора  $\gamma = 10 \text{ см}^3/\text{м}^3$ , распределение давления вдоль НКТ в первой серии расчетов в графическом виде будет иметь вид (рис. 2).

Если скважина закрыта (дебит равен нулю), то давление на забое равно гидростатическому давлению 21,6 атм (рис. 2). Для удаления тяжелой смеси с плотностью 1500 кг/м<sup>3</sup> с забоя скважины на забое должно быть давление 28,45 атм. С уменьшением плотности жидкости, давление на забое, как и должно быть в действительности, падает [5].

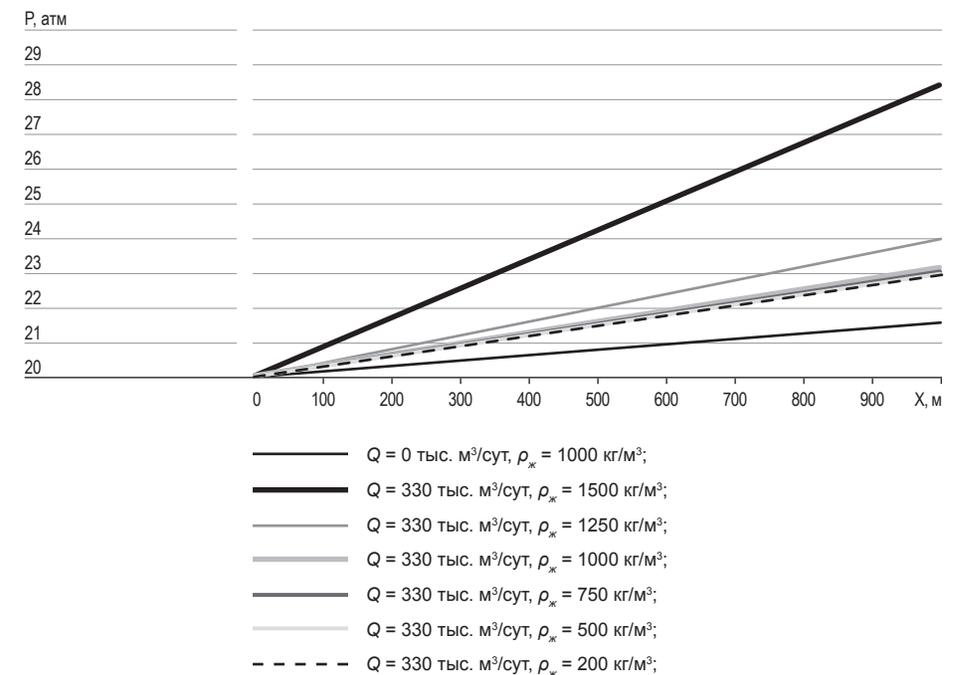


Рис. 2. Распределение давления вдоль НКТ при движении от устья к забою скважины для различных значений плотности выносимой жидкости с коэффициентом газоводяного фактора  $\gamma = 10 \text{ см}^3/\text{м}^3$

Зависимость разности давлений  $\Delta P = P_{заб} - P_{уст}$  вдоль НКТ от плотности выносимой с потоком газа жидкости для исходных данных представлена в виде графика на рисунке 3.

Уравнение линии регрессии на рис. 3 имеет вид

$$\Delta P = P_{заб} - P_{уст} = a_5 \cdot \rho^5 + a_4 \cdot \rho^4 + a_3 \cdot \rho^3 + a_2 \cdot \rho^2 + a_1 \cdot \rho + a_0 \quad (17)$$

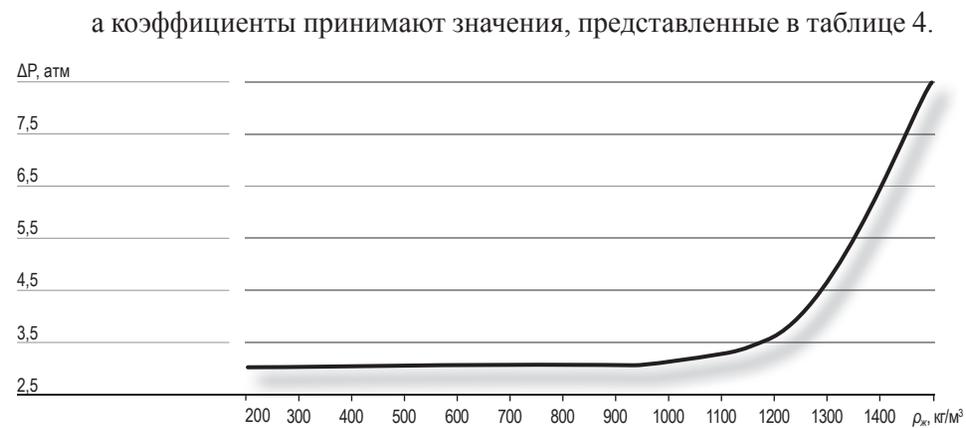


Рис. 3. Зависимость разности  $P_{заб} - P_{уст}$  от плотности жидкости.

Табл. 4. КОЭФФИЦИЕНТЫ УРАВНЕНИЯ ЛИНИИ РЕГРЕССИИ

$a_5$	$a_4$	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$a_0$
$1,02871 \cdot 10^{-14}$	$-3,0209 \cdot 10^{-11}$	$3,40033 \cdot 10^{-8}$	$-1,84738 \cdot 10^{-5}$	0,005076	2,456858

В области малых значений плотности зависимость разности давлений  $\Delta P = P_{заб} - P_{уст}$  от плотности жидкости/пены на забое хорошо аппроксимируется линейным трендом (рис. 4), уравнение которого имеет вид

$$\Delta P = P_{заб} - P_{уст} = 0,00022 \cdot \rho + 2,9297 \quad (18)$$

Графики на рисунках 3 и 4 и уравнения линий трендов показывают, что предложенная математическая модель качественно правильно передает зависимость разности  $P_{заб} - P_{уст}$  от плотности жидкости, выносимой потоком газа [6, 8].

Выходные данные экспериментов при значении газовой фактора  $\gamma = 0,1 \text{ см}^3/\text{м}^3$  отображены на рис. 5.

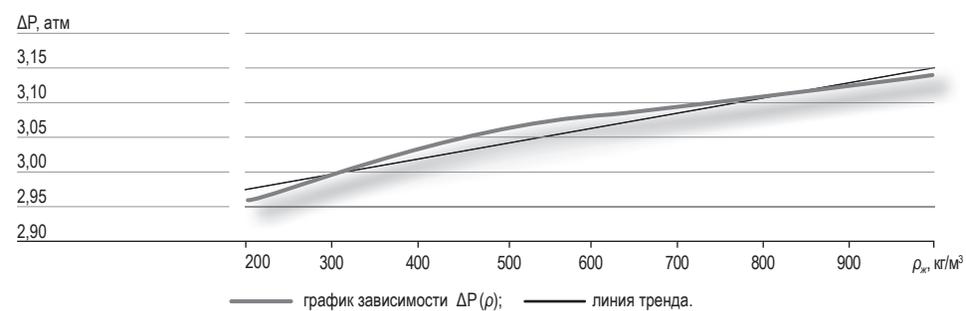


Рис. 4. Зависимость разности  $\Delta P = P_{заб} - P_{уст}$  от плотности жидкости на участке плотностей  $\rho = 200 \dots 1000 \text{ кг/м}^3$ .

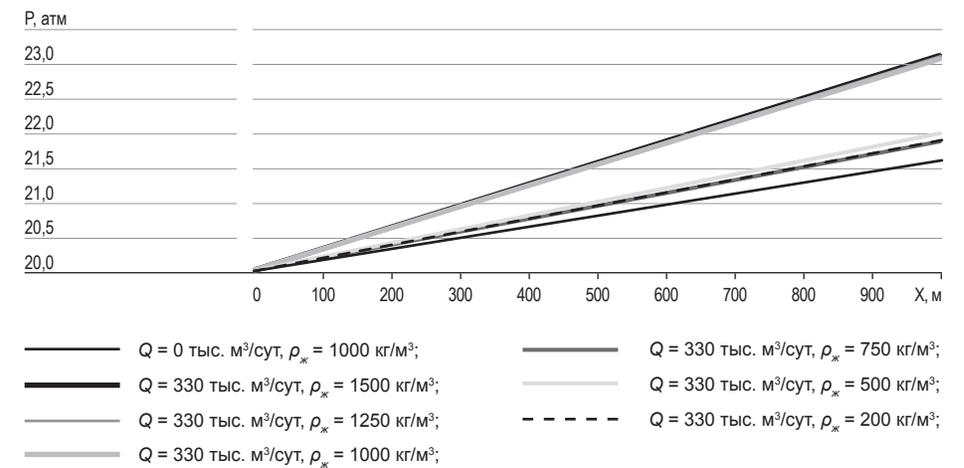


Рис. 5. Распределение давления вдоль НКТ при движении от устья к забою скважины для различных значений плотности выносимой жидкости с коэффициентом газовой фактора  $\gamma = 0,1 \text{ см}^3/\text{м}^3$ .

Гидростатическое давление, как и должно, снова составляет 21,6 атм. Для удаления тяжелой газожидкостной смеси с плотностью  $1500 \text{ кг/м}^3$  с забоя скважины при очень малом газовой факторе на забое должно быть давление 23,14 атм, т.е. с уменьшением коэффициента давление на забое уменьшается, что соответствует действительности.

Для исследования влияния внутреннего диаметра НКТ на падение давления вдоль трубы проводились расчеты для гладких НКТ, соответствующих ГОСТ 633-80. Постоянные исходные данные перечислены в таблице 5.

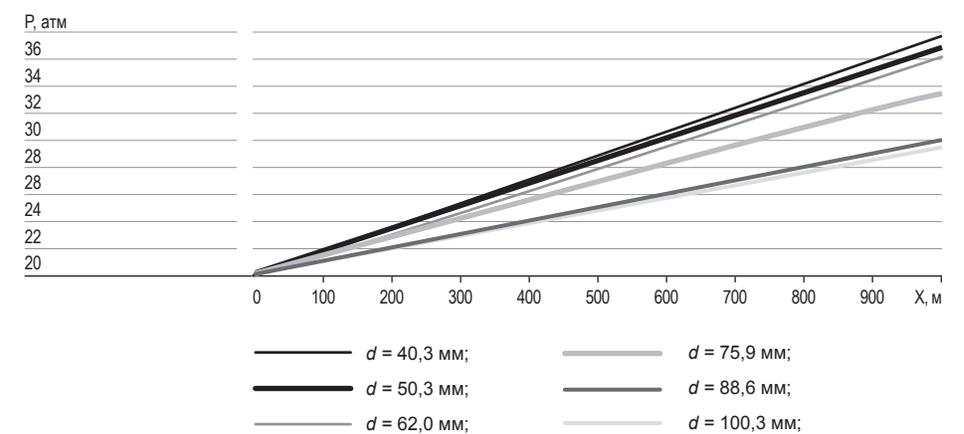


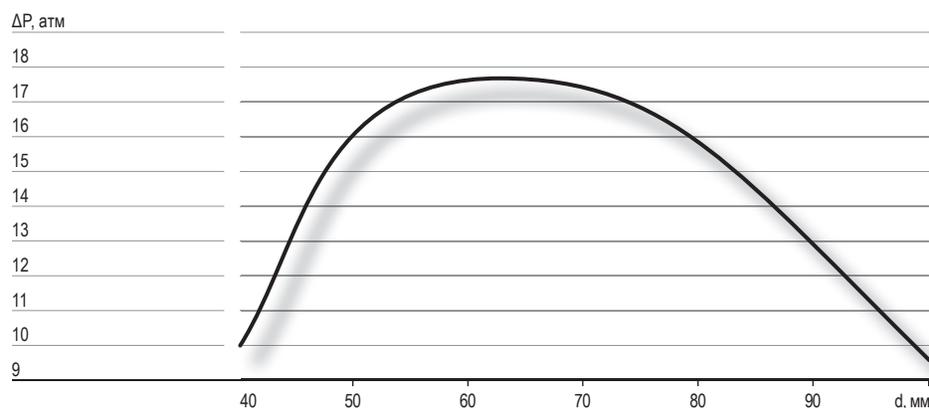
Рис. 6. Зависимость давления от глубины вдоль НКТ при различных значениях внутренних диаметров насосно-компрессорных труб.

Табл. 5. ПЕРЕЧЕНЬ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ УСЛОВНОЙ СКВАЖИНЫ А

Перечень исходных данных для условной скважины А	
Дебит скважины по газу Q (тыс. м <sup>3</sup> /сут)	300
Плотность жидкости/пены (кг/м <sup>3</sup> )	1000
Газоводяной фактор γ (см <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> )	3
Давление на устье скважины (атм)	20
Толщина многолетнемерзлых пород (м)	500
Длина НКТ от устья до башмака (м)	1000
Температура газа на устье скважины (К)	282
Температура газа у башмака НКТ (К)	296
Число точек просчета вдоль НКТ	101
Управляющие параметры	
Минимальное значение для поправочного множителя	0,20
Максимальное значение для поправочного множителя	5,00
Коэффициент падения температуры (в %) вдоль НКТ напротив многолетнемерзлых пород	70

Табл. 6. КОЭФФИЦИЕНТЫ УРАВНЕНИЯ ЛИНИИ РЕГРЕССИИ

a <sub>5</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>
2,12702·10 <sup>-7</sup>	-7,69877·10 <sup>-5</sup>	0,011025	-0,78783	28,24868	-390,141

Рис. 7. Зависимость разности давлений  $\Delta P = P_{\text{заб}} - P_{\text{уст}}$  от внутреннего диаметра НКТ.

В трубах малого диаметра устанавливается большая скорость восходящего потока газа, а в трубах с большим диаметром обеспечивается малое гидродинамическое сопротивление восходящему газожидкостному потоку. В графическом виде распределение давления вдоль НКТ с разными внутренними диаметрами представлено на рисунке 6.

График на рис. 7 показывает, что немонотонный характер зависимости  $\Delta P$  от внутреннего диаметра НКТ объясняется невозможностью одновременного сочетания высоких скоростей восходящего потока и малого сопротивления движению газожидкостной смеси.

В аналитическом виде зависимость  $\Delta P$  от внутреннего диаметра НКТ представлена уравнением регрессии (коэффициенты взяты из табл. 6) [7].

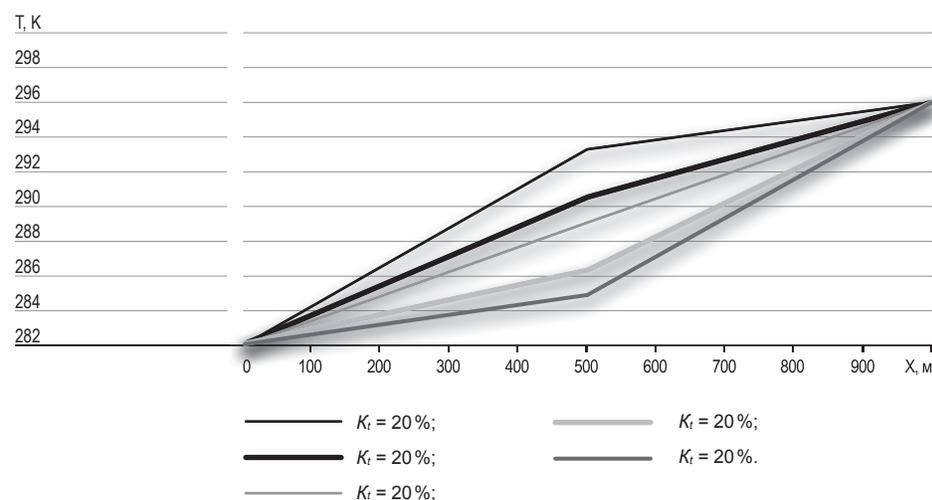
$$\Delta P = P_{\text{заб}} - P_{\text{уст}} = 0,00022 \cdot \rho + 2,9297. \quad (19)$$

Для исследования влияния распределения температуры на падение давления вдоль трубы проводились расчеты для различных распределений температуры. Исходные данные представлены в таблице 7.

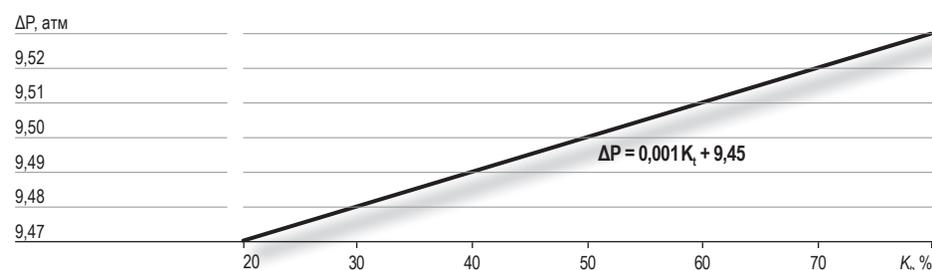
Расчеты падений давления  $P_{\text{заб}} - P_{\text{уст}}$  вдоль НКТ проводились для различных распределений температур газожидкостной смеси вдоль НКТ (рис. 8).

Табл. 7. ПЕРЕЧЕНЬ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ УСЛОВНОЙ СКВАЖИНЫ А

Перечень исходных данных для условной скважины А	
Дебит скважины по газу Q (тыс. м <sup>3</sup> /сут)	300
Плотность жидкости/пены (кг/м <sup>3</sup> )	1000
Газоводяной фактор γ (см <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> )	3
Давление на устье скважины (атм)	20
Толщина многолетнемерзлых пород (м)	500
Длина НКТ от устья до башмака (м)	1000
Наружный диаметр НКТ D (мм)	114,3
Толщина стенки НКТ d <sub>1</sub> (мм)	7
Температура газа на устье скважины (К)	282
Температура газа у башмака НКТ (К)	296
Число точек просчета вдоль НКТ	101
Управляющие параметры	
Минимальное значение для поправочного множителя	0,20
Максимальное значение для поправочного множителя	5,00
Коэффициент K <sub>t</sub> падения температуры (в %) вдоль НКТ напротив многолетнемерзлых пород	20..80



**Рис. 8.** Зависимость температуры вдоль глубины НКТ при различных коэффициентах падения температуры  $K_t$  вдоль насосно-компрессорной трубы напротив многолетнемерзлых пород.



**Рис. 9.** Зависимость разности давлений  $P_{заб} - P_{уст}$  от значений коэффициента падения температуры  $K_t$  вдоль НКТ напротив многолетнемерзлых пород.

На рис. 9 представлена зависимость разности давлений от башмака к устью вдоль НКТ от значений коэффициента падения температуры  $K_t$  вдоль насосно-компрессорной трубы в зоне многолетнемерзлых пород.

Возможные распределения температур газожидкостной смеси вдоль НКТ незначительно влияют на рабочую разность давлений  $P_{заб} - P_{уст}$  (рис. 9).

Относительные изменения  $\Delta P$  составляли

$$\frac{9,53 - 9,47}{9,50} \times 100\% \approx 0,63\%$$

Таким образом, в расчетах распределения давления вдоль НКТ можно выбирать наиболее простую гипотезу о распределении температуры газа вдоль НКТ – гипотезу линейного распределения температуры от башмака до устья НКТ.

### Выводы

На заключительной стадии разработки газовых месторождений одним из осложнений, влияющих на продуктивность и производительность скважины, является ее обводнение. Газ, смешиваясь с поступающей из пласта и скапливающейся на забое жидкостью, образует газожидкостную смесь. При движении газожидкостных смесей в обводненных газовых скважинах имеют место зависимости потерь давления этих смесей от различных параметров. В процессе моделирования реальных процессов, происходящих в газовых скважинах, отображаются зависимости потерь давления от таких параметров, как величина газодляного фактора, плотность выносимой газом жидкости, внутреннего диаметра насосно-компрессорных труб, распределения температуры вдоль труб.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахмедов Б.Г. Эксплуатация газовых скважин на поздней стадии разработки / Б.Г. Ахмедов, С.Н. Бузинов. М.: ВНИИЭгазпром, 1980.
2. Коротаев Ю.П. Влияние жидкости на движение газа по вертикальным трубам / Ю.П. Коротаев: избр. тр. в 3 т. Т. 1. М.: Недра, 1996. С. 35–54.
3. Справочник по специальным функциям / под ред. М. Абрамовица, И. Стигана. М.: Наука, 1979. 830 с.
4. Гасумов Р.А. Математические модели в управлении геологическими мероприятиями в газодобывающей отрасли / Р.А. Гасумов, К.С. Ахмедов, В.А. Толпаев, А.Г. Филлипов. М.: Газпром экспо, 2012. 128 с.
5. Новое представление уравнения притока газа к скважине и его связь со стандартной формой / В.А. Толпаев, К.С. Ахмедов, А.В. Колесников // Ученые записки Забайкальского государ-

- ственного гуманитарно-педагогического университета им. Н.Г. Чернышевского. Серия «Физика, математика, техника, технология». Чита, 2010. № 2 (31).
6. Есипова Э.Ю. Разработка математического, программного и ин-формационного обеспечения для автоматизированной системы управления геолого-техническими мероприятиями: автореферат дис. ... канд. техн. наук. М., 1996. 20 с.
  7. Расчет прогнозных дебитов непрерывно работающих газодобывающих скважин / В.А. Толпаев, К.С. Ахмедов, А.В. Колесников // Нефтепромысловое дело. 2010. № 10. С. 43–48.
  8. Мирзаджанзаде А.Х., Шахвердиев А.Х. Динамические процессы в нефтегазодобыче. Системный анализ, диагноз, прогноз. М.: Наука, 1997. 254 с.
  9. Гасумов Р.А., Шихалиева И.И. Особенности эксплуатации скважин на поздней стадии разработки газовых месторождений // НТЖ «Наука и техника в газовой промышленности». 2015. № 2. С. 67–72.
  10. Гасумов Р.А., Шихалиева И.И. Исследование параметров потока газожидкостной смеси для определения давления насыщения и условий удаления воды // НТЖ «Нефтепромысловое дело». 2015. № 7. С. 45–49.
  11. Гасумов Р.А., Шихалиева И.И. Определение выносящей способности твердых пенообразователей // НТЖ «Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море». 2015. № 6. С. 20–23.

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ, № 4, 2016

УДК 550.8.07 Керимов А-Г.Г. [Kerimov A-G. G.],  
Зенин Д.И. [Zenin D.I.],  
Керимова Е.Г. [Kerimova E.G.],  
Теленько Д.С. [Telenko D.S.]

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СКВАЖИНА» ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНОГО ХРАНИЛИЩА ГАЗА

Application of technology “intelligent well”  
for operation monitoring of underground  
gas storage

В работе рассматривается метод осуществления качественного контроля работы подземного хранилища газа (ПХГ) – метод для изучения динамических процессов в периоды закачки и отбора газа в масштабе реального времени. Технологии методов промышленной геофизики со временем совершенствуются и прогрессируют за счет использования цифровых технологий и оптоволоконного кабеля. Технология «Интеллектуальная скважина» – это комплекс цифрового оборудования скважины, включающий в себя набор цифровых первичных преобразователей, располагающихся по стволу скважины, и наземную телеметрию для непрерывного автоматического сбора информации о скважине. В работе приводятся условия применения оптического волокна (ОВ), его основные преимущества. Рассматривается удобство использования ОВ для решения задач эксплуатационного мониторинга ПХГ в интеллектуальных скважинах. Приведена схема конструкции оптоволоконного кабеля, состав всей контрольно-измерительной системы и требования, которым она удовлетворяет.

The article reviews the method of quality control of the underground gas storage (UGS) operating – a method for examination of dynamic processes in periods of gas injection and extraction in real time. Techniques of field geophysics are perfecting with time and progressing through the usage of digital technologies and optical fiber cable. The technology called “Intelligent well” – is a set of digital borehole equipment, including a set of primary digital converters, that are located in the wellbore, and ground telemetry for continuous automatic collecting of information about the well. The paper presents the conditions of usage of the optical fiber (OF), its main advantages. The article considers the convenience of usage of optical fiber for solving the problems of UGS operational monitoring in intelligent wells. The item shows the design scheme of the optical fiber cable, the composition of the entire test and measurement system and the requirements it meets.

**Ключевые слова:** подземное хранилище газа (ПХГ), цифровые технологии, оптического волокно (ОВ), интеллектуальная скважина, эксплуатационный мониторинг, оптоволоконный кабель, контрольно-измерительная система.

**Key words:** underground gas storage (UGS), digital technologies, optical fiber (OF), intelligent well, operational monitoring, optical fiber cable, test and measurement system.

### Введение

В отличие от газового месторождения подземное хранилище газа (ПХГ) эксплуатируется в циклическом режиме, оказывающее влияние на процессы, происходящие в резервуаре. Наиболее сложные процессы происходят в ПХГ при эксплуатации на упруговодонапорном режи-

ме, при котором в период закачки газа наблюдается вытеснение воды газом, а в период отбора газа – вытеснение газа водой [1]. Поэтому одной из основных задач безаварийной эксплуатации ПХГ является изучение динамических процессов в периоды закачки и отбора газа в масштабе реального времени. Чтобы из информации о работе эксплуатационного фонда скважин извлечь максимум полезной информации, с целью полноценного информативного мониторинга необходимо иметь не только достоверные и качественные данные, но и оперативные. В условиях подземного хранения, когда условия хранения углеводородов изменяются очень и очень быстро, решение задач качественного мониторинга месторождения становится невероятно сложным и затратным процессом. Методы промысловой геофизики со временем не сильно изменяются, а вот технологии применения этих методов совершенствуются, обновляются и прогрессируют в результате использования цифровых технологий и оптоволоконного кабеля.

#### Материалы и методы исследований

Рассмотрим одну из инновационных технологий на основе оптоволоконного кабеля под названием «Интеллектуальная скважина». *Интеллектуальная скважина* – это комплекс цифрового оборудования скважины, включающий в себя набор цифровых первичных преобразователей, располагающихся по стволу скважины, и наземную телеметрию для непрерывного автоматического сбора информации о скважине.

В комплекс *интеллектуальная скважина* можно включить и дистанционно работающие отдельные приборы, и оборудование, например, регулирующие клапаны, дистанционно управляемые задвижки и т. д., которые позволяют принять оперативные меры по оптимизации отбора или закачки газа в ПХГ.

В последние годы оптоволоконные технологии интенсивно внедряются в нефтяную и газовую отрасли. На основе оптоволокна (ОВ) разработаны многочисленные контрольно-измерительные системы, обладающие высокой точностью и стабильностью. Первичные преобразователи такие как, термодатчики, датчик давления, пьезо акустические преобразователи и т. д., в ОВ системах не подвержены влиянию магнитных и электрических полей, выполняются в антивандальном исполнении, стойки по отношению к вибрации и ударам. Главным преимуществом ОВ технологии является низкая потребляемая энергетическая мощность при измерениях, так как система работает только с источниками света, и возможность получения данных из любой точки ОВ [2].

Следует отметить, что в отечественной и мировой практике активно используются первичные преобразователи, изготовленные из ОВ, например, тепловой датчик. Характерной особенностью теплового датчика является возможность его распределения вдоль всей длины световедущей сердцевины, таким образом можно оценивать температуру в любой заданной точке, либо непрерывно вдоль всей протяженной линии ОВ. Используя такой распределенный датчик температуры и ОВ канал, передачу

информации из ствола скважины на поверхность можно передаваться в масштабе реального времени [3].

#### Результаты исследований и их обсуждение

Для решения задач эксплуатационного мониторинга ПХГ в интеллектуальных скважинах предлагается использовать ОВ систему, с распределенными по стволу скважины ОВ датчиками температуры и давления с высокой точностью. Наземная аппаратура обеспечит визуализацию данных термометрии и давления в реальном времени, и их математическую обработку для интерпретации и геолого-геофизических построений, карт изобар и изотерм [4].

По результатам замеров, выполненных с помощью ОВ распределенных датчиков температуры и давления по стволу скважины и по геологической структуре, можно контролировать динамику газовой контактной (ГВК) в различные циклы работы ПХГ. Конструкция ОВ кабеля схожа с каротажным кабелем, в котором вместо медных жил располагается оптическое волокно, упакованное в медной трубке (рис. 1).

Таким образом, на начальном этапе разработки технологии «интеллектуальная скважина» основным является создание технических средств, обеспечивающих дистанционное управление.

Для этих целей контрольно-измерительную систему дополняют элементами цифровой регистрации технологических параметров и информационно-управляющими устройствами. Помимо цифровой регистрации возникла необходимость в визуализации данных, их редактировании (масштабировании в физических единицах), документировании и преобразовании в требуемый формат для автоматизированного регулирования информационно-управляющими устройствами в процессе эксплуатации скважин [5].

Необходимость в компьютеризации наземной системы сбора информации на ПХГ заключается в том, что для разработки автоматизированного процесса регулирования технологическими параметрами следует отказаться от производства и применения специализированных, отдельных пультов контроля, автоматизировать процесс настройки измерительных приборов, тем самым избавиться от субъективных ошибок оператора.

В информационно-измерительной системе (ИИС) контроля и регулирования технологическими процессами, низшими элементами иерархии служат первичные преобразователи (датчики), устанавливаемые на контрольно-измерительном модуле (КИМ) в наземной или скважинной части комплекса.

Процесс получения информации от первичного преобразователя определяется внутренним устройством КИМ, к которому он подключен. Взаимодействие между информационно-управляемым устройством (ИУУ) и ИИС производится с помощью физически реализованного интерфейса. Так как в ИИС интерфейс между регистрирующей ЭВМ и периферийными устройствами определены и стандартизированы, то стандартизированный интерфейс необходимо создавать с ИУУ.

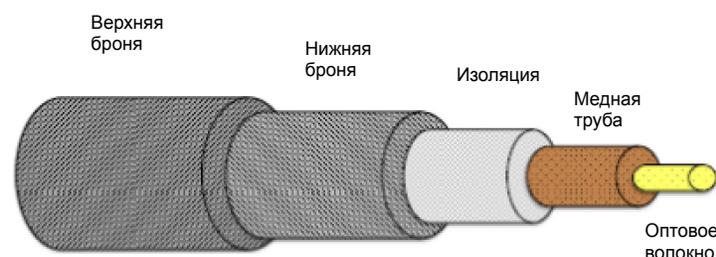


Рис. 1. Конструкция оптоволоконного кабеля.

Особенностью программно-управляемой системы автоматизированного процесса контроля и регулирования технологическими параметрами скважины является то, что она не только выполняет все функции, характерные для компьютеризированной системы контроля параметрами, но и непосредственно управляет различными процессами, например, положением задвижек и другими дистанционно управляемыми устройствами [6].

Данная система будет удовлетворять следующим требованиям: запуск и остановка сопряженных систем производится только по инициативе управляющей ЭВМ; каждая из сопряженных систем будет иметь внутренний буфер для выводных данных; система контроля отдельных элементов обвязки – автономная.

С учетом вышесказанного, система будет работать по алгоритму «запрос-ответ» в асинхронном режиме. При этом любой канал измерительной системы можно будет опросить по любому внешнему признаку – температуре, давлению и т.д. – с любым шагом в любой последовательности.

Использование аналоговой информации для дистанционного управления технологическими процессами требует использование аналоговых решающих систем, которые планируется реализовать в виде жестких схемных решений. Чаще встречаются смешанные аналого-цифровые методы управления технологическими объектами.

В настоящее время широкое распространение получили системы, основанные на цифровой обработке получаемой информации и управлении технологическими объектами методами цифровой техники.

Преимущество цифрового управления технологическими объектами заключается в его гибкости, которая обеспечивается использованием алгоритмов управления, основанных на математических моделях.

Изменение цифровой структуры управления не требует коренной перестройки физической структуры системы управления, а производится изменением алгоритмов и прикладных программных средств. Такие системы по сравнению с аналоговыми системами обладают большей от-

крытостью и позволяют довольно просто дополнять эти системы новыми датчиками и исполняемыми устройствами.

Основываясь на вышесказанном, заключаем, что разработку программно-управляемой информационно-измерительной системы контроля и регулирования ПХГ следует начинать с измерительной системы.

Для получения информации о состоянии автоматизированной системы контроля и управления предполагается использовать стандартные методы измерений физических и динамических характеристик газовых агентов, а также их смесей. Исходя из этого в состав измерительно-управляющего комплекса войдут следующие виды датчиков:

- датчики температуры;
- датчики давления;
- ультразвуковые датчики определения «зеркала» жидкости в скважине;
- датчики расхода газа в наземной обвязке скважины;
- датчики состояния задвижек.

Датчики температуры предназначены для измерения температуры в различных точках автоматизированной системы. Существующие системы датчиков температуры могут иметь аналоговый токовый выход и цифровой выход. Для приема информации от датчиков имеющих токовый выход необходимо использование аналого-цифрового преобразователя и системы передачи данных. Датчики, снабженные цифровым выходом не требуют использования аналого-цифрового преобразователя, но применение того или иного типа датчика будет определяться конкретными техническими требованиями к системе автоматизированного управления (требование взрывобезопасности и климатическое исполнение)

Датчики давления и датчики уровня имеют параметры, аналогичные датчикам температуры, использование того или иного типа датчиков определяется так же техническими требованиями к системе автоматизированного управления.

Как отмечалось выше, назначение измерительного модуля в обвязке скважины – это предварительное преобразование информативных газодинамических параметров моно- и многофазного потоков в электрический сигнал. Исходя из этого, было определено, что на главном звене измерительного модуля будет располагаться разнофункциональные первичные преобразователи физических величин в электрический сигнал.

Методы измерения параметров должны включать электрические, акустические, электромагнитные и термические преобразователи физических величин. Однако, в процессе отбора первичных преобразователей по техническим характеристикам, безопасности работы с ними и функциональным возможностям, а также для получения определенной точности измерения некоторые из них были исключены.

Таким образом, в разрабатываемом контрольно-измерительном комплексе, помимо классических средств измерения, таких как, давле-

ние, температура и расход предполагается использовать и акустические первичные преобразователи для измерения динамических свойств газового потока. Исключенными методами измерений стали радиоактивный и электромагнитный, в силу своей низкой безопасности и помехоустойчивости [7].

Одним из направлений повышения эффективности эксплуатации ПХГ является интеллектуализация. Понятие «интеллектуализация» ПХГ можно описать по-другому: например, оптимизация эксплуатации ПХГ по алгоритмам эффективного формирования искусственной газовой залежи, основанной на постоянном геолого-геофизическом контроле, включенном в автоматизированную систему управления.

Сегодня уже есть достаточно предпосылок для того, чтобы активно применять технологию «интеллектуализация» на объектах ПХГ в нашей стране. У данной технологии много очевидных плюсов. Например, очень высокий уровень автоматизации и информатизации наземного комплекса ПХГ. Индивидуальные сепараторы, датчики расхода, давления, температуры и механических примесей для каждой скважины; управляемые штуцера и задвижки – это все реалии сегодняшнего дня [8].

Что касается скважин, то здесь в интеллектуализации (к сожалению, не в системе ПХГ России) тоже имеется ряд положительных и очень перспективных разработок. Системы датчиков температуры, расхода и давления устанавливаются в компоновке НКТ в призабойной зоне скважин, и информация от этих датчиков передается на устье. Существуют разработанные, в том числе и в России, телеметрические системы на основе сенсорных сетей для регистрации устьевых параметров скважин на подземном хранилище газа, автоматизированная система сбора и обработки информации о параметрах технологического процесса скважин ПХГ. Передача информации от устья скважины на сервер или в диспетчерский пункт, или на рабочее место геолога – эта технология также не вызывает определенных трудностей. Если скважины расположены на одной площадке, то информация вообще передается по кабельной линии связи. Если нет, то, например, на Краснодарском ПХГ реализована система сбора и передачи информации от устья скважины на пункт диспетчера по радиоканалу через маломощные передатчики с использованием промежуточных станций.

Сейчас по многим ПХГ уже созданы математические геологические модели, и моделируются флюидодинамические процессы, которые открывают большие возможности для моделирования различных вариантов эксплуатации искусственной газовой залежи и могут быть использованы в автоматической системе управления. Но вот здесь как раз и кроется основная проблема, которая препятствует созданию интеллектуальных ПХГ. Это связано с тем, что наши знания о флюидодинамических процессах, происходящих в недрах при эксплуатации ПХГ, недостаточны, и эти процессы недостаточно изучены для того, чтобы создавать математические модели, корректно описывающие поведение искусственной газовой залежи в режиме реального времени.

Как в случае использования ПХГ для сглаживания пиков спроса на газ, так и в случае применения ПХГ для хранения газа, необходимость автоматизации процесса делает привлекательным обращение к технологиям интеллектуальных скважин.

Таким образом, на ПХГ представляется возможность с помощью «Интеллектуальной скважины» проводить мониторинг циклической работы хранилища в масштабе реального времени. С помощью распределенных по стволу скважины датчиков данные будут передаваться в программные модули для проверки правильности работы скважины в отдельности и ПХГ в целом. В процессе работы системы будет происходить автоматическое сравнение данных по различным скважинам. Для анализа работы действующих скважин ПХГ предоставленная информация от отдельных скважин будет трансформироваться в программы позволяющие строить разнообразные модели, геолого-геофизические карты и разрезы, для выявления очагов техногенных скоплений газа [9].

Эти современные программы моделирования нуждаются в больших вычислительных мощностях. Итерационные оптимизационные операции с использованием больших объемов данных не могут обеспечить получение удовлетворительных результатов за требуемое время даже после очистки и объединения этих данных. Вместо этого, для полномасштабного моделирования применяются промежуточные модели. Хотя эти модели и не столь точны, они способны давать приемлемые результаты уже через несколько секунд или минут. Автоматизированная система контроля сравнивает результаты вычислений с измеренными значениями [10]. Если информация по промежуточным моделям указывает на неправильное функционирование какого-либо скважинного или поверхностного компонента, то срабатывает сигнализация и выдается предупреждающий сигнал, отображающийся на ПК инженера. Для параметров, по которым срабатывает сигнализация, можно задать и настроить диапазон отклонения. После срабатывания сигнализации инженер своевременно принимает меры для определения источника возникшей проблемы.

### Выводы

Итак, за мониторингом ПХГ стоит интеллектуальная технология. Хотя многие сервисные компании затрудняются дать единое определение этому термину, большинство из них сходятся на том, что «Интеллектуальная скважина», как элемент интеллектуальной технологии ПХГ, должна характеризоваться высокой степенью автоматизации, активным применением моделирования, использованием инструментов для принятия решений (чем быстрее, тем лучше), а также комплексным подходом, не упускающим даже мелких деталей контролируемого объекта (или, по меньшей мере, предусматривающим систему их мониторинга).

Автоматизированная последовательность операций в мониторинговой системе, имеет следующую структуру: сначала прогоняются запланированные задачи контроля, а также критические параметры, автоматически

запускаемые при срабатывании сигнализации, затем – прогнозные промежуточные геолого-геофизические модели для анализа данных, а после этого вводятся правила. Иницирующие события – это либо отклонения от ожидаемых тенденций, либо нарушения установленных ограничений. Действия, активируемые сигнализацией, включают уведомление системы, подключение и прогон программ контроля, обмен данными с программным обеспечением третьей стороны, запуск подчиненных задач и создание электронных или текстовых сообщений для информирования оператора о сбое.

Помимо аварийных сигналов, это программное обеспечение автоматически выдает оператору на инженерном ПК основные эксплуатационные показатели. Оно же форматирует данные для визуализации и предоставляет прогнозы на основе текущих показателей эксплуатации ПХГ. Оперативный поток данных позволяет инженеру сконцентрироваться на отклонениях системы от нормы, тем самым быстро реагировать на осложнения. Например, при обнаружении по данным «Интеллектуальных скважин» роста давления в контрольном горизонте оперативно оповещать об этом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казарян В.А. Подземное хранение газов и жидкостей / В.А. Казарян. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. 432 с.
2. Листвин А.В. Оптические волокна для линий связи / А.В. Листвин, В.Н. Листвин, Д.В. Швырков. М.: ЛЕСАРПарт, 2003. 288 с.
3. Котюк А.Ф. Датчики в современных измерениях / А.Ф. Котюк. М.: Радио и связь, Горячая линия – Телеком, 2006. 96 с.
4. Удд Э. Волоконно-оптические датчики / Э. Удд. М.: Техносфера, 2008. 520 с.
5. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп / Перевод с английского Б.И. Копылова. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.
6. Дарлинг Т. Практические аспекты геофизических исследований скважин / Т. Дарлинг / Перевод с английского. М.: Премиум Инжиниринг, 2008. 400 с.
7. Валиулин Р.А. Геофизические исследования и работы в скважинах / Р.А. Валиулин, Л.Е. Кнеллер // Промысловая геофизика. Уфа: Информреклама, 2010. 172 с.
8. Селевцов Л.И. Автоматизация технологических процессов / Л.И. Селевцов. М.: Академия, 2014. 352 с.
9. Слепов Н. Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи / Н.Н. Слепов. М.: Радио и связь, 2003. 468 с.
10. Рассомахин С. Г., Малофей О. П., Малофей А. О. Нахождение оптимальных энергетических параметров передачи позиционных кодов в автоматизированных системах управления / С.Г. Рассомахин, О.П. Малофей, А.О. Малофей // Научный журнал СКФУ «Наука. Инновации. Технологии». 2014. №1. С. 74–80.

УДК 551.513.22

Набродова Е.Г. [Nabrodova E.G.],  
Диденко А.Ю. [Didenko A.U.],  
Закинян Р.Г. [Zakinayn R.G.]

## К СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

To rate spread internal gravity waves

Иногда ошибочно предполагается, что у гравитационных волн есть только частота, равная частоте Брента – Вайсяля. Однако, существует широкий спектр волн, частоты которых меньше этого значения. Частота колебаний по вертикали смещенных от положения равновесия частиц воздуха в устойчиво стратифицированной атмосфере равна частоте Брента – Вайсяля. Это резонансная (собственная) частота колебания воздуха, и даже если бы можно было вообразить некоторый процесс, который вызовет вертикальную вибрацию с частотой, большей, чем частота Брента – Вайсяля, то эта вибрация не будет поддержана плавучестью атмосферы, и амплитуда колебания уменьшилась бы быстро с расстоянием от точки принуждения. Таким образом, максимальная частота гравитационных волн равна частоте Брента – Вайсяля, так же существует широкий спектр волн, частоты которых меньше этого значения.

Sometimes mistakenly assumed that gravity waves only have a frequency equal to Brunt – Vaisala. However, there is a wide range of wave frequencies are less than this value. The frequency of oscillation vertically displaced from the equilibrium position of the air particles in a stably stratified atmosphere is equal to the frequency of Brunt – Vaisala. This resonance (on site) frequency vibrations in the air, and even if it were possible to imagine some process, which will cause vertical vibration with a frequency of greater than Brent frequency – Vaisala, this vibration will not be supported by the buoyancy of the atmosphere, and the vibration amplitude would decrease rapidly with the distance from the point of compulsion. Thus, the maximum frequency of the gravitational wave frequency equal to Brunt – Vaisala, as there is a wide spectrum of waves whose frequencies are less than this value.

**Ключевые слова:** гравитационные волны, частота Брента – Вайсяля, уравнение движения, уравнение Тейлора – Гольдштейна, стратифицированная атмосфера.

**Key words:** gravitational waves, Brunt frequency – Brunt, the equation of motion, the equation of the Taylor – Goldstein, stratified atmosphere.

#### ВВЕДЕНИЕ

Движение воздушных масс в атмосфере носит сложный, меняющийся с течением времени характер. Последние несколько десятилетий отмечены значительным прогрессом в понимании волновых движений в атмосфере. Несмотря на это, разномасштабные и разнородные волновые и вихревые движения в атмосфере – планетарные волны, циклоны и антициклоны, гравитационные волны и их крупномасштабные решения остаются сложной задачей в планетарных науках.

Цель настоящей работы заключается в решении уравнения Тейлора – Гольдштейна в случае постоянной фоновой стратификации  $N$ , и когда длина волны намного меньше, чем  $H_s$  (подстрочная). В результате решения этого уравнения получить пределы ограничения спектра частот гравитационных волн.

Уравнение Тейлора – Гольдштейна является волновым уравнением для линейных гравитационных волн. Рассмотрим двумерные уравнения Эйлера для не вращающегося и невязкого течения. В приближении Буссинеска запишем

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_i} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_i} \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) - g, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Уравнение (1) есть уравнение движения в направлении оси  $x$ . Уравнение (2) есть уравнение движения в направлении оси  $z$ .

Линеаризуем указанные выше уравнения в соответствии с представлением

$$q(x, z, t) = q_0(z) + q_1(x, z, t), \quad (5)$$

где  $q_0(z)$  принимает установившееся, однородное по горизонтали значение, а  $q_1(x, z, t)$  является возмущением первого порядка. Мы также полагаем, что в невозмущенном состоянии имеет место уравнение статики, т. е.

$$\mathbf{v} = 0, \quad \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} = 0, \quad -\frac{1}{\rho_e} \left( \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \right) - g = 0.$$

Тогда уравнения (1) – (4) примут вид

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u_0 \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u_0}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_e} \left( \frac{\partial p'}{\partial x} \right); \quad (6)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u_0 \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p'}{\partial z} + \alpha \Delta T g, \quad (7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + u_0 \frac{\partial \rho_1}{\partial x} + w \frac{\partial \rho_e}{\partial z} = 0, \quad \rho_1 = -\rho_e \alpha \Delta T, \quad \Delta T = \theta(x, z, t)$$

$$\rho_e \alpha \left( \frac{\partial \theta}{\partial t} + u_0 \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) - w \frac{\partial \rho_e}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

где  $\rho_e$  – плотность воздуха невозмущенной атмосферы.

Тогда мы можем представить решение в виде волны

$$u(x, z, t) = U(z) e^{i(kx - \omega t)}, \quad (10)$$

$$\rho_1(x, z, t) = R(z) e^{i(kx - \omega t)}, \quad \theta(x, z, t) = \overline{\Delta T(z)} e^{i(kx - \omega t)}, \quad (11)$$

$$p'(x, z, t) = P(z) e^{i(kx - \omega t)}, \quad (12)$$

$$w(x, z, t) = W(z) e^{i(kx - \omega t)}. \quad (13)$$

Уравнения (6) – (9) принимают вид

$$-i\omega U + iku_0 U + W \frac{\partial u_0}{\partial z} = -ik \frac{P}{\rho_e}, \quad (14)$$

$$-i\omega W + iku_0 W = -\frac{1}{\rho_e} \frac{\partial P}{\partial z} + \alpha \Delta T g, \quad (15)$$

$$ikU + \frac{\partial W}{\partial z} = 0, \quad (16)$$

$$-i\rho_e \alpha \Delta T (\omega - ku_0) - W \frac{\partial \rho_e}{\partial z} = 0. \quad (17)$$

Введем определение внутренней частоты  $\omega_i$ , как частоты волны относительно потока, т. е. частоты волны, измеренной наблюдателем, движущимся вместе с потоком со скоростью  $u_0$ ; следовательно

$$\omega_i = \omega - u_0 k. \quad (18)$$

Если мы рассмотрим два горизонтальных направления, то можно записать

$$\omega_i = \omega - u_0 k - v_0 l = \omega - (\mathbf{v}_h, \mathbf{k}), \quad (19)$$

где  $\mathbf{v}_h$  – вектор горизонтальной скорости фонового ветра. Если мы запишем (18) как

$$\omega = \omega_i + u_0 k, \quad (20)$$

то отсюда видно, что наблюдаемая частота  $\omega$  больше, чем внутренняя  $\omega_i$ , если волна распространяется в направлении ветра, и меньше, чем  $\omega_i$ , если волна распространяется против ветра. Из (20) для наблюдаемой горизонтальной фазовой скорости волны получим

$$c_x = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega_i}{k} + u_0 = c_i + u_0, \quad (21)$$

где  $c_i = \frac{\omega_i}{k}$  – внутренняя фазовая скорость волны в направлении оси  $x$ .  
Уравнения (14) – (17) с учетом выражений

$$\frac{1}{\rho_e} \frac{\rho_e \partial_e}{\partial z} = -\frac{1}{T_e} (\gamma_A - \gamma), \quad \gamma_A = \frac{g}{R},$$

$$\vartheta = T_e \left( \frac{p_0}{p} \right)^{R/c_p}, \quad \frac{1}{\vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial z} = \frac{\Delta \gamma}{T_e},$$

$$N = \sqrt{\frac{g}{\vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial z}} = \sqrt{\frac{g}{T_e} \Delta \gamma};$$

запишем в виде

$$i\omega_i U - \frac{\partial u_0}{\partial z} W = ik \frac{P}{\rho_e}, \quad (22)$$

$$i\omega_i W = \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial P}{\partial z} - \alpha \Delta T g, \quad (23)$$

$$ikU + \frac{\partial W}{\partial z} = 0, \quad (24)$$

$$-i\omega_i \alpha \Delta T + \alpha (\gamma_A - \gamma) W = 0. \quad (25)$$

Решая (22) – (25) относительно  $W$ , получим

$$\frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + \left[ \frac{k}{\omega_i} \frac{\partial u_0}{\partial z} - \alpha (\gamma_A - \gamma) \right] \frac{\partial W}{\partial z} + \left[ \frac{k}{\omega_i} \frac{\partial^2 u_0}{\partial z^2} - \alpha (\gamma_A - \gamma) \frac{k}{\omega_i} \frac{\partial u_0}{\partial z} + \alpha (\gamma_A - \gamma) g \frac{k^2}{\omega_i^2} - k^2 \right] W = 0 \quad (26)$$

$$\text{Так как } \rho_e = \rho_{e0} e^{-\alpha (\gamma_A - \gamma) z} = \rho_{e0} e^{-\frac{z}{H_s}},$$

где  $H_s = \frac{1}{\alpha (\gamma_A - \gamma)}$  – высота изотермической атмосферы, то (26) можно записать в виде

$$\frac{\partial^2 W}{\partial z^2} + \left( \frac{k}{\omega_i} \frac{\partial u_0}{\partial z} - \frac{1}{H_s} \right) \frac{\partial W}{\partial z} + \left( \frac{k}{\omega_i} \frac{\partial^2 u_0}{\partial z^2} - \frac{1}{H_s} \frac{k}{\omega_i} \frac{\partial u_0}{\partial z} + \frac{1}{H_s} \frac{gk^2}{\omega_i^2} - k^2 \right) W = 0. \quad (27)$$

Мы можем упростить это уравнение, введя новую переменную

$$W = f(z) \tilde{W}. \quad (28)$$

Подставляя (28) в (27), получим уравнение Тейлора – Гольдштейна (Taylor, 1931; Goldstein, 1931)

$$\frac{\partial^2 \tilde{W}}{\partial z^2} + \left( \frac{k}{2\omega_i} \frac{\partial^2 u_0}{\partial z^2} - \frac{1}{2H_s} \frac{k}{\omega_i} \frac{\partial u_0}{\partial z} - \left( \frac{k}{2\omega_i} \frac{\partial u_0}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{H_s} \frac{gk^2}{\omega_i^2} - k^2 - \frac{1}{4H_s^2} \right) \tilde{W} = 0. \quad (29)$$

Заметим, что если (28) использовать в (22), то получим

$$\rho_e = \rho_{e0} e^{-\frac{z}{H_s}}, \quad W = e^{\frac{z}{2H_s} - \frac{k}{2\omega_i} u_0} \tilde{W},$$

$$i\omega_i U e^{-\frac{z}{2H_s} + \frac{k}{2\omega_i} u_0} - \frac{\partial u_0}{\partial z} \tilde{W} = ik \frac{P}{\rho_{e0}} e^{\frac{z}{2H_s} + \frac{k}{2\omega_i} u_0}. \quad (30)$$

Чтобы иметь совместимую систему обозначений, мы должны определить новые переменные  $\tilde{U}$  и  $\tilde{P}$ , т. е.

$$U = e^{\frac{z}{2H_s} - \frac{k}{2\omega_i} u_0} \tilde{U}, \quad (31)$$

$$P = e^{-\frac{z}{2H_s} - \frac{k}{2\omega_i} u_0} \tilde{P}. \quad (32)$$

Аналогично, использование (28) в (25) приводит

$$-i\omega_i \alpha \Delta T + \alpha (\gamma_A - \gamma) \tilde{W} e^{\frac{z}{2H_s} - \frac{k}{2\omega_i} u_0} = 0. \quad (33)$$

$$\Delta T = \Delta T e^{\frac{z}{2H_s} - \frac{k}{2\omega_i} u_0}.$$

Мы можем записать (29) в более компактной форме, представляя производные штрихами, а также используя (2.18). Тогда уравнение Тейлора – Гольдштейна запишется в форме

$$\frac{\partial^2 \tilde{W}}{\partial z^2} + \left[ \frac{g/H_s}{(c-u_0)^2} + \frac{u_0''}{2(c-u_0)} - \frac{1}{2H_s} \frac{u_0'}{c-u_0} - \left( \frac{u_0'}{2(c-u_0)} \right)^2 - \frac{1}{4H_s^2} - k^2 \right] \tilde{W} = 0, \quad (34)$$

где для упрощения мы заменили обозначение  $c_x$  на  $c$ . Если для возмущения давления имеет место гидростатический баланс, т. е.

$$\frac{\partial p'}{\partial z} = -\rho_1 g, \quad (35)$$

то это слагаемое не появится в (34).

Решения для плоской волны ищем в виде

$$w = e^{\frac{z}{2H_s} - \frac{k}{2\omega_i} u_0} \tilde{W} e^{i(kx - \omega t)}. \quad (36)$$

Однако, можно также записать

$$w = \left( \frac{\rho_{e0}}{\rho_e} \right)^{1/2} e^{-\frac{k}{2\omega_i} u_0} \tilde{W} e^{i(kx - \omega t)}. \quad (37)$$

Мы видим, что плотность окружающего волну воздуха уменьшается с высотой. Из (37) видно, что амплитуда вертикальной проекции скорости с высотой увеличивается.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Мы начнем наше исследование решений уравнения Тейлора – Гольдштейна (34) с простого случая постоянной фоновой стратификации  $N$ , и когда длина волны намного меньше чем  $H_s$ .

В случае отсутствия скорости фонового ветра уравнение (34) принимает вид

$$\frac{\partial^2 \tilde{W}}{\partial z^2} + \left( \frac{gk^2}{H_s \omega^2} - k^2 \right) \tilde{W} = 0. \quad (39)$$

Общее решение этого уравнения имеет вид

$$\tilde{W} = A e^{imz} + B e^{-imz}, \quad (40)$$

где вертикальное волновое число дается выражением

$$m^2 = k^2 \left( \frac{g}{H_s \omega^2} - 1 \right). \quad (41)$$

Решая (41) относительно  $\omega$ , получим дисперсионное соотношение

$$\omega = \pm \sqrt{\frac{g}{H_s} \frac{k^2}{m^2 + k^2}}. \quad (42)$$

Рассмотрим отрицательную компоненту (42), тогда

$$\omega = c_x k = -\sqrt{\frac{g}{H_s} \frac{k^2}{m^2 + k^2}}, \quad (43)$$

$$\omega = c_z m = \pm \sqrt{\frac{g}{H_s} \frac{k^2}{m^2 + k^2}},$$

$$c_x = \pm \sqrt{\frac{g}{H_s}} \frac{1}{\sqrt{m^2 + k^2}}, \quad c_z = \pm \sqrt{\frac{g}{H_s}} \frac{k}{m \sqrt{m^2 + k^2}},$$

$$\frac{\omega^2}{m^2} = c_z^2, \quad \frac{\omega^2}{k^2} = c_x^2, \quad \omega^2 \left( \frac{1}{m^2} + \frac{1}{k^2} \right) = c^2,$$

$$c = \omega \frac{\sqrt{m^2 + k^2}}{mk} = \pm \sqrt{\frac{g}{H_s}} \frac{1}{m},$$

которая говорит нам, что горизонтальная фазовая скорость волны  $c_x$ , отрицательна, и таким образом, волна должна распространяться в отрицательном направлении оси  $x$ . Но, если волна распространяется в отрицательном направлении оси  $x$ , то значит и  $k < 0$ , тогда должно быть  $\omega > 0$ . Таким образом, если мы придерживаемся этого соглашения, тогда  $\omega > 0$  для всех условий.

Общим решением уравнения (39) является

$$w = e^{\frac{z}{2H_s}} \left( A e^{i(kx + mz - \omega t)} + B e^{i(kx - mz - \omega t)} \right). \quad (44)$$

Решение  $A$  представляет положительную компоненту уравнения (41), а решение  $B$  представляет отрицательную компоненту. Мы видим, что для решения  $A$  фазовой скоростью в направлении оси  $z$  является

$$c_z = \frac{\omega}{m}. \quad (45)$$

Тангенс угла наклона линий постоянной фазы в плоскости  $(x, z)$  равен

$$\frac{dz}{dx} = -\frac{k}{m}. \quad (46)$$

Для решения  $B$  эти величины равны

$$c_z = -\frac{\omega}{m} \quad (47)$$

и

$$\frac{dz}{dx} = \frac{k}{m}. \quad (48)$$

Из дисперсионного соотношения (42) мы видим, что

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{H_s}} \frac{k}{\sqrt{m^2 + k^2}} = \sqrt{\frac{g}{H_s}} \cos \beta, \quad (49)$$

где  $\beta$  – угол, который волновой вектор составляет с горизонталью. Не-

сколько важных аспектов распространения волн подразумеваются под этим простым результатом.

Например, если  $\sqrt{\frac{g}{H_s}}$  изменяется с высотой, то волны постоянной частоты распространяются вдоль криволинейных траекторий. Частота волны не может быть больше, чем  $\sqrt{\frac{g}{H_s}}$ . Когда  $\omega = \sqrt{\frac{g}{H_s}}$ , то  $\beta = 0$ , значит, волна распространяется горизонтально, а частицы воздуха колеблются вертикально. Когда  $\omega \ll \sqrt{\frac{g}{H_s}}$  очень малая величина, соответствующая сильному расслоению или длинным волнам,  $\beta$  приближается к  $\pi/2$ , волна распространяется почти вертикально, и частицы воздуха колеблются почти горизонтально. Мы видим, что спектр частоты гравитационных волн ограничен этими двумя пределами.

### ВЫВОД

Частота колебаний по вертикали смещенных от положения равновесия частиц воздуха в устойчиво стратифицированной атмосфере равна частоте Брента – Вайсяля. Это резонансная (собственная) частота колебания воздуха, и даже если бы можно было вообразить некоторый процесс, который вызовет вертикальную вибрацию с частотой, большей, чем частота Брента – Вайсяля, то эта вибрация не будет подержана плавучестью атмосферы, и амплитуда колебания уменьшилась бы быстро с расстоянием от точки принуждения. Таким образом, максимальная частота гравитационных волн равна частоте Брента – Вайсяля; однако, существует широкий спектр волн, частоты которых меньше этого значения. Иногда ошибочно предполагается, что у гравитационных волн есть только частота, равная частоте Брента – Вайсяля. Ясно, что это не правильно.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гилл А. Динамика атмосферы и океана / А. Гилл. М.: Мир, 1986, Т. 1, 399 с.; Т. 2, 416 с.
2. Закинян Р.Г. Изменение параметров поднимающегося подоблачного воздуха / Р.Г. Закинян, М.Д. Атабиев, М.А. Волочай, М.Н. Грицаева // Естественные и технические науки, 2010. №2. С. 297–303.
3. Holton J.R. An Introduction to Dynamic Meteorology. Forth edition / J.R. Holton. Elsevier, 2004, p. 540.

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ, № 4, 2016

УДК 550.8:553.98

Петренко В.И. [Petrenko V.I.],  
Петренко Н.Н. [Petrenko N.N.],  
Петренко И.Н. [Petrenko I.N.]

## ГАЗОЭВАПОРИГЕННАЯ ВЛАГА КАК ГЕОЛОГО ГЕОХИМИЧЕСКИЙ ФЕНОМЕН ПЛАНЕТАРНОГО МАСШТАБА

### Gasevaporated moisture as the geologic- geochtmical phenomenon of the planetary scale

Уже сам процесс образования газоэвапоригенной влаги (ГЭВ) является уникальным геохимическим явлением. Это наглядно доказывается присутствием водяного пара в газовых и газоконденсатных залежах в зонах земной коры, в которых из-за высокого флюидного давления вода может находиться только в жидкой фазе в пределах докритических температур для пресной воды (374 °С) и ее рассолов (500–700 °С). Появление в этой зоне, всегда водонасыщенной, свободного скопления газа, от зародышевых пузырьков до целых залежей, приводит к образованию двойной системы в виде парогазовой смеси. В последней всегда присутствует водяной пар, который следует называть газоэвапоригенной влагой (водяной пар, образовавшийся в результате испарения воды газом), что доказано многочисленными экспериментами в установках высокого давления и многолетней разработкой многочисленных отечественных и зарубежных газовых и газоконденсатных месторождений (сотни месторождений), а также газовых шапок нефтегазовых залежей. Влагосодержание парогазовых смесей зависит от природы газа (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub>, CO, COS, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, He, Ar, Xe и др.), термобарических параметров системы (в месторождениях углеводородов пластовые давление и температура), минерализации сопряженной с газом воды (в залежах остаточная вода). ГЭВ и её дериват в виде конденсационной воды участвует в проявлении многих геолого-геохимических процессов как в залежах углеводородов и в подземных хранилищах газа (ПХГ), так и в континентальной и океанической земных корах. Важной особенностью ГЭВ является массоперенос химических элементов, что позволяет предположить о возможном извлечении ряда химических элементов, включая редкие земли, из природных вод, включая морскую воду. Результатами данной работы являются многолетние кропотливые исследования по затронутой проблеме.

The process of forming the gasevaporated moisture is already being itself the unique geochemical phenomenon. This has visually been proved by the presence of aqueous vapour in the gas and gas-condensate deposits of the zones of the earth core in which owing to high fluid pressure the water can be present only in a liquid phase within the undercritical temperatures for fresh water (373 °C) and its brines (400–600 °C). The appearance in this zone, as a rule, always watersaturated, of the free gas accumulation, from nucleus bubbles to the whole deposits, leads to the formation of the double system as vapourgas mixtures. In the mentioned mixtures the aqueous vapor is always present of gasevaporated moisture (aqueous vapour formed as a result of the gas free accumulation which evaporated the liquid water). This had been proved by the nomerous experiments in the high pressure installations and by the development of numerous domestic and foreign gas and gas-condensate deposits and also the caps of oilgas deposits. The moisture content of the vapourgas mixtures depends on the gas ,moistures (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub> and so on), thermobaric parameters of the system (that is, pressure and temperature in the hydrocarbon deposits), mineralization of the water conjugated with gas) the residual water in the deposit. Gasevaporated moisture and its derivate as the condensational water takes part in the manifestation of a great number of geologic and geochemical processes both in the hydrocarbon deposits and in the earth core. The important peculiarity of the e gasevaporated moisture is mass transfer of chemical elements including rare earths. The results of the given work have been the laborious investigations on the mentioned problem for many years.

**Ключевые слова:** газ, вода, парогазовая смесь, химические элементы, массоперенос.

**Key words:** gas, water, vapourgas mixture, chemical elements, mass transfer.

## ВВЕДЕНИЕ

Согласно представлениям С.Л. Шварцева [1], на планете Земля существуют четыре глобальных круговорота воды, к которым приурочены четыре генетические группы подземных вод (табл. 1).

В приведенной генетической классификации в климатическом круговороте воды выделены конденсационные воды. В данном случае речь идет о зоне аэрации, в которой в поры пород проникает водяной пар земной атмосферы, и конденсируясь превращается в конденсационную воду.

Среди специалистов газового профиля уже давно известны конденсационные воды другого генезиса. Это воды, как правило, получаемые в поверхностных сепарационных установках по подготовке газа к транспорту.

Еще в начале XX века (1919 г.) Р. Миллсом и Р. Уэллсом была обнаружена способность газов поглощать молекулярную влагу [2]. Позже способность газов растворять воду при различных термобарических условиях была детально изучена Р. Олдсом, В. Сейджем, У. Лесли (1942 г.) [2], Р. Кобаяши, Д. Катцем (1953 г.) [2], М.И. Гербер (1957 г.), Т.П. Жузе (1960 г.), Б.И. Султановым [3], А.Ю. Намиотом (1971 г.), и др.

В СССР конденсационные воды впервые были описаны Б.И. Султановым в 1961 г. [3]. В последующие годы генезису, ионному, солевому и микроэлементному составу конденсационных вод была посвящена обширная научная литература [4–7]. Уже тогда было обращено внимание на значительное отличие в минерализации конденсационных и пластовых вод, и впервые на Кубани это отличие было применено для обнаружения поступления законтурных и подошвенных пластовых вод в газовые и газоконденсатные скважины и залежи. Так появился гидрохимический метод контроля за обводнением газовых и газоконденсатных скважин и залежей. В течение короткого периода на Ленинградском газоконденсатном месторождении Западного Предкавказья были уточнены все детали применения данного метода [4–7], и он, начиная с месторождений Кубани, сравнительно быстро распространился на все газодобывающие регионы СССР [8].

Обращает на себя внимание особый генезис газовой фазы (водяной пар) воды газовых, газоконденсатных и нефтегазоконденсатных залежей с газовой шапкой, а также газовой фазы воды любых по размерам гомогенных скоплений газов в земной коре. Заключается он в следующем.

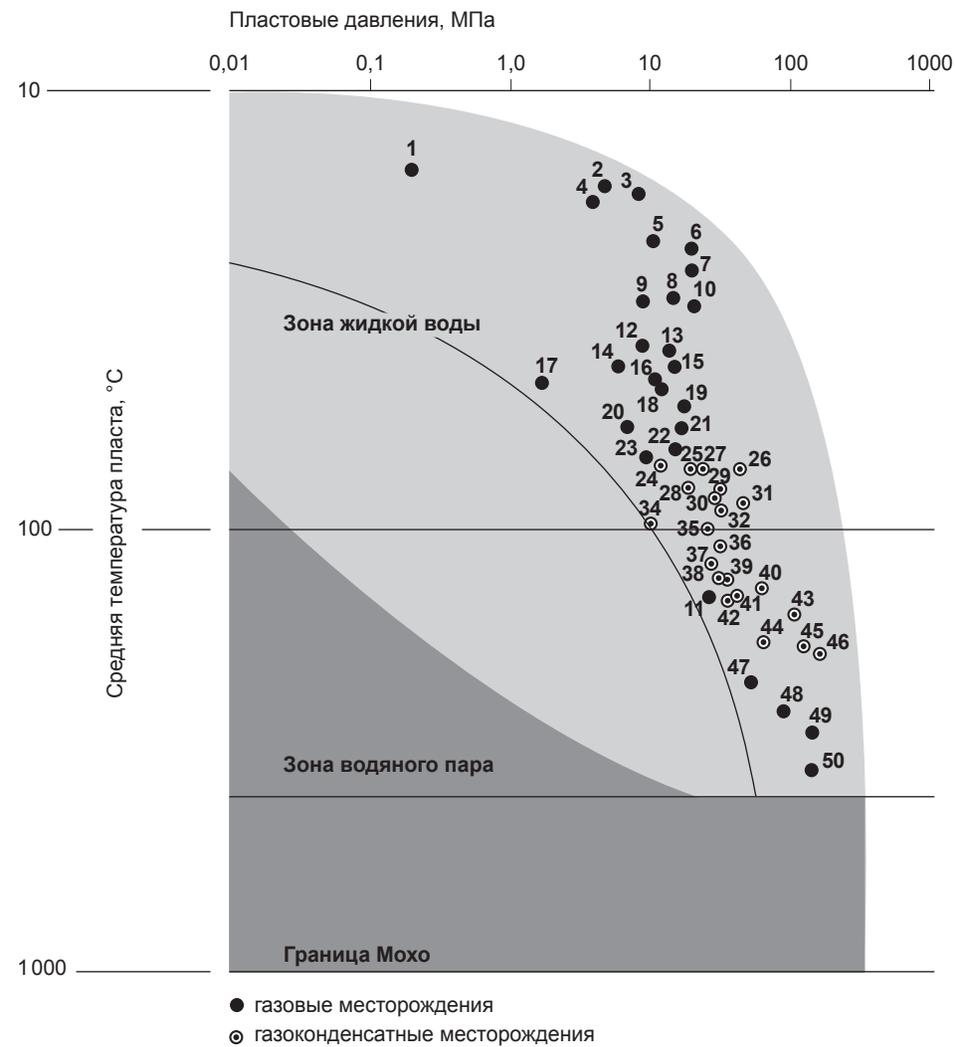
На Земле мало районов, в которых вода может присутствовать в виде пара. Известны немногочисленные геотермальные системы, такие как Камчатка в России, Лардерелло в Италии, Гейзеры в США, Мацукава в Японии и др., в которых из пробуренных на большой площади скважин получают пар при температурах от 100 до 200 °С. В большей части земной коры флюидное (в основном вода [9]) давление настолько значительно, что на любых отметках, вплоть до глубин распространения критической температуры для чистой воды (374 °С) и ее растворов (500–700 °С), вода может находиться только в виде жидкости [В.И. Смирнов, 1982]. Имеется, однако, удивительное исключение из этого «правила»: в случае наличия в земной коре газово-

Табл. 1. ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД [1]

Круговорот воды	Генетическая группа подземных вод	Генетический тип воды
Климатический	Метеорные	Инфильтрационные Конденсационные
Геологический	Седиментационные	Погребенные Элизионные Возрожденные (синтезированные)
Мантийный	Ювенильные	Магматогенные Интрателлурические (сквозьмагматические)
Мантийно-океанический	Талассогенные	Литификационные Рифтогенные Субдукционные

го скопления любого размера, от критического пузырька до газовой залежи, сформированного любым газом, в нём присутствует водяной пар. Происходит интраиспарение воды в газ [9]. Газ «принудительно» осуществляет фазовый переход жидкой воды в пар в «запретной» для его присутствия зоне, охватывающей всю земную кору от глубин распространения критических температур для воды и ее растворов вплоть до земной поверхности (рис. 1). Из рисунка 1 видно, что все месторождения углеводородов расположены в земной коре в зоне распространения жидкой воды, однако удивительная способность газов растворять воду при любых термобарических условиях обуславливает её присутствие в этой зоне в газовой фазе. Поэтому образующуюся по данному механизму парообразную влагу следует называть газоэвапоригенной влагой, т.е. сформированной газом. Известно, что все породы земной коры насыщены водой [9], и её количества всегда достаточно для полного насыщения влагой любых по размерам гомогенных скоплений природных газов. Таким образом, все газовые скопления в земной коре, включая месторождения газообразных углеводородов (УВ), представлены парогазовыми смесями, состоящими из газа-растворителя и газоэвапоригенной влаги. Можно предполагать, что водяной пар в виде газоэвапоригенной влаги природных парогазовых смесей отличается по своим физико-химическим свойствам от водяного пара, находящегося в сопряжении с дистиллированной водой [10]. Можно также утверждать, что превращение части жидкой воды в пар в области земной коры, «запретной» для водяного пара, есть спонтанное стремление подземной флюидной системы перейти в состояние с большей энтропией [11].

Многочисленными анализами (десятки тысяч проб воды, отобранных из скважин газовых и газоконденсатных месторождений России и проанализированных на содержание химических элементов и ионов) доказано, что при сопряжении парогазовой смеси с водой любой минерализации, вплоть до рассолов, конденсационная вода, являющаяся дериватом сконденсиро-



1 – Северо-Ставропольско-Пелагиадинское, 2 – Жуковское, 3 – Среднеямальское, 4 – Краснооктябрьское, 5 – Родинское, 6 – Совхозное, 7 – Кунакбаевское, 8 – Преображенское, 9 – Урицкое, 10 – Оренбургское, 11 – Мирненское, 12 – Анастасиевско-Троицкое, 13 – Рыбальское, 14 – Икибурульское, 15 – Куцевское, 16 – Бейсугское, 17 – Убеженское, 18 – Деминское, 19 – Первомайское, 20 – Безопасненское, 21 – Эрри, 22 – Каневское, 23 – Ладожское I, 24 – Расшеватское, 25 – Шарихан-Ходжабад, 26 – Машевское, 27 – Ленинградское, 28 – Сотэ-Юганское, 29 – Уренгойское, 30 – Надымское, 31 – Космачское, 32 – Хасси Р'Мель, 33 – Челбасское, 34 – Александровское, 35 – Калужское, 36 – Еланское, 37 – Майкопское, 38 – Майкопское, 39 – Русский Хутор Северный, 40 – Сундукли, 41 – Степное, 42 – Некрасовское, 43 – Малосса, 44 – Гомез, 45 – Томасвиль, 46 – Западный Пиней Вудс, 47 – Молв, 48 – Скважина 1 Смит Лиз, 49 – Скважина 1 Бенавадес, 50 – Гипотетическое.

Рис. 1.

Расположение газовых и газоконденсатных месторождений в земной коре в зависимости от термобарических параметров залежей.

Табл. 2. СОПОСТАВЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В КОНДЕНСАЦИОННОЙ И ПЛАСТОВОЙ ВОДАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ХАССИ Р'МЕЛЬ

Элемент	Содержание элементов в воде, мг/дм <sup>3</sup>		Коэффициенты	
	пластовой	конденсационной	распределения	фракционирования
Na <sup>+</sup>	105642	42,3	0,00040	1
K <sup>+</sup>	2446	17,52	0,0072	18
Ca <sup>2+</sup>	12652	34,52	0,0027	6,8
Mg <sup>2+</sup>	540,8	3,37	0,0062	15,5
Cl <sup>-</sup>	190544	138,45	0,00073	1,8
HCO <sup>3-</sup>	227,3	22,39	0,098	245
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2195	31,42	0,0143	35,8
Li	40,4	0,094	0,00233	5,8
Al	1,0	0,58	0,580	1450
Si	15,3	0,74	0,0484	121
Cr	0,97	0,069	0,0711	178
Mn	91,6	3,02	0,0330	82
Fe	155,1	98,63	0,636	1590
Co	2,57	0,10	25,7	64250
Ni	2,57	0,50	0,195	488
Cu	1,74	5,14	2,954	7385
Zn	83,6	4,37	0,0523	131
Ga	8,42	0,16	0,0190	48
Br	330	0,118	0,000358	0,90
I	3,0	0,00956	0,00387	7,97
Сумма главных ионов	314247,1	289,97	0,000923	3
Сумма микроэлементов	736,27	113,53056	0,154197	385
Сумма всех элементов	314983,37	403,50056	0,00128	3,20

вавшейся газозапаригенной влаги, всегда представлена низкоминерализованным раствором [11]. В качестве примера в таблице 2 приведено сопоставление содержания химических элементов и ионов в конденсационной и пластовой водах газоконденсатного месторождения Хасси Р'Мель.

Из приведенных данных видно, что для многих микроэлементов, от Mn до Zn, коэффициент распределения сравнительно высок. Если взять за основу коэффициент распределения хлорид-иона, то «летучесть» (коэффициент «фракционирования») тех же микроэлементов весьма значительна. Сопоставление коэффициентов распределения химических элементов между пластовой и конденсационной водами показывает, что переход микроэлементов в газозапаригенную влагу в среднем в 340 раз превышает переход в водяной пар макроэлементов.

Газозапаригенная влага в жидкой фазе (конденсационная вода) участвует в геологическом, мантийном и мантийно-океаническом круговоротах воды (см. табл. 1). В геологическом круговороте жидкая фаза ГЭВ выступает в виде седиментационных (погребенных) вод в виде составной части парогазовых смесей свободных газовых скоплений; в мантийном круговороте эти воды являются составной частью ювенильных вод, так как при температурах ниже критической для воды и её растворов соотношение водяного пара и газов в отделяющемся от магматического расплава флюиде контролируется влажностью [11]; в мантийно-океаническом круговороте эти воды выступают в роли субдукционных вод, так как в поддвигаемой плите сохраняются залежи природных газов, представленные парогазовыми смесями.

Обычно изучают конденсационную воду, представляющую собой дериват водяного пара сложной по составу парогазовой смеси (газ-носитель – пары высококипящих углеводородов – пары воды), в подавляющем большинстве случаев не предполагая об особой геолого-физической и геохимической роли газозапаригенной влаги. А роль эта весьма многообразна и значительна.

Наши тщательные многолетние исследования по рассматриваемой проблеме [11–25, 28] свидетельствуют о том, что ГЭВ влияет на проявления многих природных процессов как в месторождениях углеводородов и подземных хранилищах газа, так и за их пределами, т.е. в земной коре.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ПРОЦЕССЕ ОБСУЖДЕНИЯ МАТЕРИАЛА

##### 1. В месторождениях углеводородов газозапаригенная влага:

- **влияет на подсчёт начальных и текущих запасов газа и конденсата**, особенно в газовых и газоконденсатных месторождениях с повышенной температурой ( $T > 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (табл. 3).

Как следует из таблицы 3, в Мирненском ГКМ Центрального Предкавказья при начальных термобарических условиях

Табл. 3. ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ ГАЗА (W) РЯДА ГАЗОВЫХ И ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РОССИИ И МИРА К НАЧАЛУ И К КОНЦУ ИХ РАЗРАБОТКИ

Месторождение	Начальные условия			Конец разработки			Возрастание W, мол. доля
	T, °C	P, МПа	W, мол. доля	T, °C	P, МПа	W, мол. доля	
Ленинградское	72,5	22,14	0,0040	72,5	3,0	0,0147	0,0107
Каневское	80,0	18,44	0,0059	80,0	3,0	0,0197	0,0138
Крыловское	91,0	22,19	0,00761	91,0	3,0	0,0299	0,0223
Сердюковское	110,0	27,57	0,0125	110,0	5,0	0,0429	0,0304
Майкопское	127,9	29,68	0,0210	127,9	7,0	0,0607	0,0397
Митрофановское	149,0	36,20	0,0331	149,0	7,0	0,111	0,0779
Мирненское	142,0	24,98	0,0220	142,0	5,0	0,115	0,0765
Гомез	177,0	64,0	0,0457	177,0	10,0	0,175	0,129
Арун	178,0	49,0	0,0558	178,0	10,0	0,179	0,123
Мэри Энн	232,0	75,8	0,122	232,0	20,0	0,320	0,198
Берта Роджерс 1	250,0	140,0	0,112	250,0	20,0	0,423	0,311

( $P = 24,98\text{ МПа}$ ,  $T = 142\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) газозапаригенная влага в пластовом газе составляла 3,85 об. %, а при понижении пластового давления до 5 МПа её доля возросла до 7,65 об. %. Не учёт парообразной влаги ведет к ошибкам (в сторону завышения) при подсчете запасов УВ на величину, равную объёмной доли ГЭВ в пластовом газе.

В высокотемпературных газовых залежах даже при начальных термобарических условиях ошибка достигает значительных величин. Для месторождения Арун с температурой  $178\text{ }^{\circ}\text{C}$  и начальном давлении 49 МПа не учёт присутствия в пластовом газе парообразной влаги приведёт к завышению начальных запасов газа на 5,58 %. В залежи с температурой  $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ , близкой к температуре газовой залежи Бенавадес ( $291\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [26], при подсчёте начальных запасов газа без учёта присутствия ГЭВ при давлении 30 МПа парообразная влага будет составлять более 40 об. % ( $80 \cdot 10^9\text{ м}^3$  метана и  $76 \cdot 10^9\text{ м}^3$  водяного пара). Следует напомнить, что при существующем методе подсчёта начальных запасов газа  $76 \cdot 10^9\text{ м}^3$  водяного пара могут быть ошибочно приняты в качестве метана. При длительной разработке подобной залежи пластовый газ из парогазовой смеси превратится в газопаровую систему, когда газозапаригенная влага будет превалировать в залежи. Так, при отборе пластового газа в количестве  $40 \cdot 10^9\text{ м}^3$  соотношение флюидов в залежи будет таково:  $52 \cdot 10^9\text{ м}^3$  метана и  $80 \cdot 10^9\text{ м}^3$  ГЭВ;

— **повышает флюидное давление в газовых и газоконденсатных залежах** и в газовых шапках нефтегазовых месторождений на величину парциального давления ГЭВ при существующих в залежах термобарических параметрах и минерализации остаточной воды.

— **обуславливает привнос энергии в пластовый газ** в результате испарения остаточной воды и образования паробразной влаги. При изотермическом снижении пластового давления в газовых и газоконденсатных месторождениях возрастает влагоёмкость пластового газа. Дефицит влаги компенсируется испарением остаточной воды.

Превращение части остаточной воды в пар и приобщение этого пара к пластовому газу адекватно закачке объёма газа в залежь, равного объёму вновь сформировавшейся ГЭВ. Кроме того, происходит привнос энергии в пластовый газ, которая, по-видимому, равна энергии, затраченной на испарение остаточной воды.

Наша оценка показала, что в 8 газовых и ГКМ России и Украины (Сенгилеевское, Мирненское, Крыловское, Березанское, Северо-Ставропольское, Вуктыльское, Оренбургское, Шебелинское) за 21 год разработки испарилось  $2,51 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup> остаточной воды с образованием  $3,31 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> ГЭВ, и суммарный привнос энергии в пластовый газ составил  $5,66 \cdot 10^9$  МДж.

— **влияет на состав пластовых парогазовых смесей.** Это обусловлено как различной растворимостью углеводородов в водяном паре, так и различным взаимодействием молекул воды с молекулами отдельных углеводородов. Экспериментальные исследования, выполненные С.Н. Белецкой [27] во ВНИГРИ (Санкт-Петербург) показали, что углекислый газ, пропущенный через влажный мергель, в значительно большем количестве в сравнении с «сухим» CO<sub>2</sub> извлекает хлороформенного битумоида, а в его составе ароматических углеводородов, и даже масел и асфальтенов.

Наш предварительный расчет показал, что в залежи Ленинградского ГКМ образовавшаяся в пластовом газе глобула газоконденсата размером 1 нм испытывает  $1,97 \cdot 10^{39}$  с<sup>-1</sup> соударений с молекулами чистой воды, а с молекулами воды, имеющими связь с двумя ионами хлора, глобула газоконденсата соударяется  $0,66 \cdot 10^{39}$  с<sup>-1</sup>, или в три раза реже. Таким образом, в результате захвата глобулами газоконденсата в первую очередь молекул «чистой» ГЭВ создается представление, что происходит сопряженная ретроградная конденсация C<sub>5+B</sub> и водяного пара.

— **способствует образованию в пласте обратной эмульсии** (вода в газоконденсате) при ретроградной конденсации C<sub>5+B</sub>. Образование такой эмульсии было установлено на Ленинградском и Староминском ГКМ Западного Предкавказья: при прохождении вала газоконденсата через призабойные зоны скважин перед их обводне-

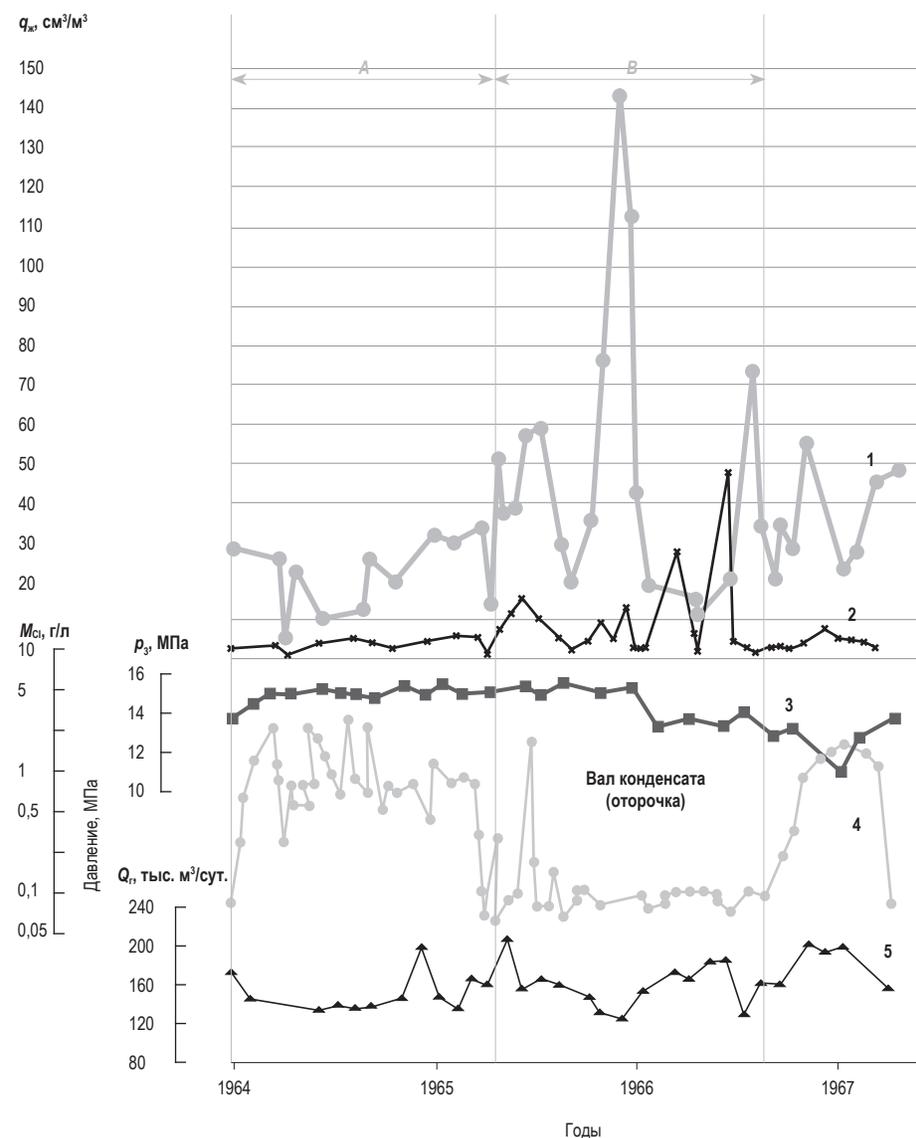


Рис. 2.

**Основные показатели эксплуатации скважины  
17 Староминского газоконденсатного месторождения:**

- А, В – периоды эксплуатации до прохождения и при прохождении вала конденсата;  
1 – выход резервуарного конденсата;  
2 – выход воды;  
3 – давление в затрубном пространстве;  
4 – содержание хлорид-иона в воде;  
5 – дебит газа.

нием получали в повышенных количествах конденсационную воду пониженной минерализации [11]. Пониженная минерализация воды в эмульсии обусловлена более частым соударением молекул чистой воды, т.е. молекул, не отягощенных ионами, с образовавшейся критической глобулой газоконденсата.

— **ускоряет сегрегацию заземленного водой газа в обводненной зоне.** Чем выше пластовая температура и чем на большую величину снижено давление в зоне вытеснения, тем больший объём заземленного водой газа представлен газозапаригенной влагой, что ускоряет сегрегацию заземленного газа [21]. Ускоренная сегрегация газа в обводнившихся зонах залежей была отмечена на ряде газоконденсатных месторождений Западного Предкавказья.

— **повышает конденсатоотдачу при сайклинг-процессе** в результате растворения части высококипящих углеводородов не только в «сухом» газе-носителе, нагнетаемом в пласт, но и в газозапаригенной влаге, образующейся при испарении остаточной воды в нагнетаемый «сухой» газ [27]. Особенно заметное увеличение конденсатоотдачи будет наблюдаться в высокотемпературных газоконденсатных залежах.

— **повышает нефтеотдачу при нагнетании в нефтяную залежь  $\text{CO}_2$ .** В сравнении с метаном углекислый газ обладает более высокой влагоёмкостью. При его закачке в пласт он в результате испарения остаточной воды насыщается газозапаригенной влагой, и часть нефти дополнительно испаряется в водяной пар. Высокая смесимость  $\text{CO}_2$  с углеводородами нефтяного ряда в определенной мере обусловлена образованием в пласте углекислой парогазовой смеси.

— **способствует проявлению внутреннего флюидонапорного режима** (миграция флюидов из неколлекторов в коллекторы залежи). Большинство месторождений представлено переслаиванием пород различной пористости, проницаемости и флюидонасыщенности. Среди них выделяются кондиционные коллекторы, в которых ведётся подсчёт запасов нефти и газа, некондиционные коллекторы, в которых имеются ресурсы нефти и газа, но они не учитываются при подсчёте запасов углеводородов, а также неколлекторы, поровое пространство которых частично насыщено углеводородами при преобладающем содержании поровых вод. Отбор углеводородов из кондиционных коллекторов обуславливает возникновение перепада давления в среде флюидов, насыщающих породы-неколлекторы и кондиционные коллекторы. Площади сопряжения неколлекторов с коллекторами могут достигать огромных величин. Так, в месторождении Хасси Р'Мель в Алжире площадь сопряжения неколлекторов с коллекторами превышает  $40 \cdot 10^3 \text{ км}^2$  [12]. Поэтому даже при высоких значениях начальных градиентов давления незначи-

тельное снижение пластового давления обуславливает частичную миграцию флюидов из пород-неколлекторов в коллекторы [11].

— **обуславливает более быстрое проникновение газов к земной поверхности** над газо-водяными и водо-нефтяными контактами залежей углеводородов. Эмпирические данные свидетельствуют о наличии над залежами углеводородов газовых геохимических аномалий [С.Г. Саркисян, 1982 и др.], причем наиболее контрастными аномалии отмечаются над контактами углеводороды-вода. Механизм их образования не раскрыт. В нашем представлении при разрушении залежей УВ мигрирующий в окружающую водонапорную систему газ проходит в зоне контакта через пузырьковую стадию (энергетически выгодное образование). Критические пузырьки исчезают с проявлениями пневмоконденсационной кавитации [15, 17], при которой в кровельную часть пласта со скоростью в несколько десятков метров в секунду выбрасывается микроструя жидкости с растворенным в ней газом. Происходит своеобразное нагнетание газа в кровлю залежи и далее к земной поверхности.

— **формирует оторочки опресненных вод** под нефтяными оторочками нефтегазоконденсатных месторождений. На стадии разрушения залежей углеводородов поступающие в законтурную зону пузырьки газа, схлопываясь, сбрасывают газозапаригенную влагу, которая образует с нефтью эмульсию 2-го рода. Нефть, выступающая в роли дисперсионной среды, не позволяет контактировать опресненной воде с подстилающей залежью минерализованной водой. В месторождении Хасси Р'Мель обнаружена оторочка воды с минерализацией  $25 \text{ г/дм}^3$ , подстилаемая рассолом с минерализацией  $360\text{--}400 \text{ г/дм}^3$  [12]. Эмульсии подобного рода не разрушаются благодаря спонтанному проявлению пневмоконденсационной кавитации [11, 15, 17].

— **ускоряет продвижение внедрившейся в газовую залежь пластовой воды** из зоны вытеснения в оставшуюся газонасыщенную область в случае снижения давления в зоне вытеснения. Это обусловлено увеличением объема заземленного газа в обводненной зоне по причине его расширения, а также возрастания его влагосодержания и наличием перепада давления, направленного от периферии залежи к ее центру. Чем выше температура в пласте, тем заметнее влияние газозапаригенной влаги на внедрение воды в залежь.

— **увеличивает объём внедряющейся в газовую залежь законтурной пластовой воды** на величину объема сжатой газозапаригенной влаги при текущих термобарических условиях в случае выделения водорастворенного газа в свободную фазу в приконтурной зоне. Как и в предыдущем случае, влияние газозапаригенной влаги зависит от пластовой температуры: чем выше температура, тем больший

объем законтурной воды внедряется в залежь из-за большего присутствия парообразной влаги в парогазовой смеси.

— **способствует выпадению солей в фонтанных трубах и установках по подготовке газа к транспорту** [А.А. Кутюва, 1973, В.С. Мерчева, 2004], в особенности в случае наличия в добываемом газе в виде примеси минерализованных пластовых вод. Значительное снижение давления при умеренном снижении температуры повышает влагоемкость поступающего по фонтанным трубам газа, в результате чего происходит испарение части пластовых вод, сопровождающееся концентрированием в них солей и их выпадением в виде осадка.

— **повышает конденсатоотдачу газоконденсатного месторождения при сайклинг-процессе** в результате растворения в повышенных количествах ретроградного конденсата в водяном паре, образуемом от испарения остаточной воды в нагнетаемый сухой газ. Результаты экспериментов, выполненных в Оренбурге под руководством В.Ф. Перепеличенко [11], показали, что в единице объема водяного пара растворяется большее количество углеводородов в сравнении с их растворимостью в газе. Следовательно, образующийся при сайклинг-процессе водяной пар в результате испарения остаточной воды вбирает в себя повышенное количество ретроградного конденсата, увеличивая его потенциальное содержание в пластовом газе.

— **обуславливает осушение призабойных зон скважин.** В месторождениях с газовым и упруговодонапорным режимами разработки в результате возрастающей влагоемкости поступающего к забоям скважин газа происходит испарение остаточной воды с образованием газозапаригенной влаги. При работе скважин с высокими дебитами газа, способствующими выносу капельной влаги из фонтанных труб, в призабойной зоне, а в дальнейшем и на некотором удалении от нее может произойти полное испарение остаточной воды. В месторождении Хасси Р'Мель при сайклинг-процессе остаточная вода полностью испарилась в среднем на расстоянии 60 м от нагнетательных скважин (56 скважин). Следовательно, на таком расстоянии от скважин в поровом пространстве произошло выпадение солей.

## 2. В подземных хранилищах газа газозапаригенная влага:

— **увеличивает объем закачиваемого в ПХГ газа** на объем газозапаригенной влаги, образующейся в результате испарения остаточной воды в нагнетаемый сухой газ. Испарение остаточной воды обуславливает некоторое повышение проницаемости пласта-коллектора, и как следствие этого увеличение дебита газа. Однако в

случае высокой пластовой температуры возрастание дебита пластового газа может происходить не за счет увеличения в нем доли углеводородной фракции, а за счет увеличения доли газозапаригенной влаги. Как и в газовых залежах, в ПХГ, созданных в выработанных газовых залежах с высокопроницаемыми коллекторами и эксплуатируемых при газовом режиме (хадумский горизонт Северо-Ставропольского ПХГ) может происходить полное осушение призабойных зон скважин, а также частичное осушение их депрессионных воронок.

— **способствует проявлению пневмоконденсационной кавитации.** В процессе отбора газа в ПХГ, эксплуатирующемся при газовом или упруговодонапорном режиме, происходит выделение из остаточной воды водорастворенного газа в виде парогазовых пузырьков, часть из которых (примерно 50%), достигнув раздела «остаточная вода–пластовый газ», схлопывается с выделением энергии. Газозапаригенная влага повышает энергию схлопывания пузырьков. Фронт схлопывания перемещается по пласту от скважин вглубь залежи по мере снижения пластового давления. Если при нагнетании газа пластовое давление превышает давление насыщения, то должна наблюдаться пневмоконденсационная кавитация оставшихся парогазовых пузырьков [15, 17]. В этом случае фронт схлопывания газовых пузырьков также движется от скважин вглубь залежи.

## 3. В земной коре газозапаригенная влага:

— **ускоряет миграцию газа из области его генерации.**

Чтобы образовавшееся из ОВ гомогенное скопление газа мигрировало по пласту-коллектору, требуется некоторый критический объем этого скопления. Уже на стадии зарождения критического газового пузырька он заполняется не «чистым» газом, а парогазовой смесью. По мере роста газового пузырька в нем из-за снижения лапласова давления увеличивается доля газозапаригенной влаги, которая, в свою очередь, приводит к более быстрому росту пузырька и ускорению его всплытия.

— **обуславливает газофазный массоперенос химических элементов** через земную кору и способствует формированию стратиформных рудных месторождений [14]. Газофазный массоперенос элементов подтверждается многочисленными анализами конденсационных вод [11]. В конденсационной воде месторождения Хасси Р'Мель обнаружено 20 элементов и ионов (см. табл. 2), в конденсационной воде Астраханского ГКМ – 21 элемент (табл. 4).

Для конденсационных вод ряда газоконденсатных месторождений характерно относительное обогащение микроэлементами. Для пластового газа Астраханского ГКМ со значительным содержанием в нем углекислого газа и сероводорода коэффициенты распределе-

Табл. 4. КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В СИСТЕМЕ «ВОДА КОНДЕНСАЦИОННАЯ – ВОДА ПЛАСТОВАЯ» АСТРАХАНСКОГО ГКМ

Элементы	Содержание ионов и микрокомпонентов в воде		Коэффициенты	
	пластовой	конденсационной	распределения	фракционирования
Cl <sup>-</sup>	42223,2	148,0	0,00351	1,00
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	27,3	19,7	0,722	205,9
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	301,8	16,8	0,0557	15,9
Ca <sup>2+</sup>	2802,1	42,8	0,0153	4,36
Mg <sup>2+</sup>	259,1	4,08	0,0157	4,49
Na <sup>+</sup>	24023,7	65,5	0,00273	0,778
K <sup>+</sup>	370,9	2,60	0,00701	2,00
Al	0,150	0,0633	0,422	120,4
Fe	0,134	0,150	1,12	319,4
Mn	0,0330	0,237	7,18	2048,9
Ni	0,0113	0,323	28,6	8154,8
Co	0,00500	0,410	82,0	23393,9
Ti	0,00500	0,497	99,4	28358,0
V	0,00150	0,583	388,7	110883,4
Cr	0,0356	0,670	18,8	5369,3
Mo	0,00567	0,757	133,5	38089,2
Zr	0,00467	0,843	180,5	51499,2
Cu	0,0140	0,930	66,4	18951,5
Pb	0,0245	1,02	41,6	11877,5
Zn	0,340	1,28	3,76	1074,0
Ba	6,44	2,06	0,320	91,3
Все элементы	70015,3	309,3033	0,00414	1,182
Макроэлементы	70008,1	299,48	0,00400	1,141
Микроэлементы	7,20424	9,8233	1,36	389,0

ния в системе «газоэвапоригенная влага – пластовая вода» очень значительны: от 7,18 для Mn до 389 для V. В рассматриваемом случае очень важно, что в конденсационных водах коэффициент распределения для микроэлементов в 340 раз превышает таковой для макроэлементов. При вычислении нормированной по хлорид-иону «летучести» ионов и микроэлементов в системе «конденсационная вода Астраханского ГКМ – океаническая вода» также обнаруживается высокая «летучесть» многих элементов, включая редкие земли.

Нам представляется, что транспортирующая роль газоэвапоригенной влаги доказана также при анализе выделений из хвойных деревьев в виде испарений, в которых было обнаружено 28 элементов (Li, Be, B, Na, Mg, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Sr, Y, Zr, Mo, Ag, Pb, Bi, Cd, Sn, Sb, Ba, La) [Брукс Р.Р., 1986].

Известно, что скорость газофазного массопереноса на порядок выше массопереноса в жидкой фазе. Следовательно, в докритической зоне земной коры для воды углеродистые газы транспортируют огромные объемы газоэвапоригенной влаги с растворенными в ней веществами [11, 14]. По мере миграции через земную кору и снижении давления и температуры происходит конденсация разнообразной влаги парогазовой смеси, что приводит к образованию железомарганцевых конкреций и металлоносных осадков [20, 21].

— **влияет на газонасыщенность подземных вод**, уменьшая количество водорастворенных газов в единице объема воды по мере роста температуры с глубиной. Известно, что давление насыщения жидкости газом представляет сумму парциальных давлений отдельных газов, находящихся в равновесии с жидкостью. Поскольку над жидкостью всегда присутствуют ее пары, то парциальное давление этих паров также входит в сумму парциальных давлений газов над жидкостью. В газовом пузырьке, образующемся в подземной воде, обязательно присутствует газоэвапоригенная влага с присущим ей парциальным давлением, причем по мере увеличения температуры парциальное давление парообразной влаги возрастает. Следовательно, критический пузырек газа образуется в подземной воде при флюидном давлении, превышающем сумму парциальных давлений чистых газов на давление насыщенного пара в пузырьке при данных термобарических условиях. По мере роста пузырька парциальное давление газоэвапоригенной влаги возрастает и достигает как минимум давления насыщенного пара при данных температуре и давлении. Парообразная влага «вытесняет» водорастворенные газы из воды, способствуя более ранней её дегазации [12]. Все это обуславливает не только более раннее формирование критических парогазовых пузырьков, но и более раннее перемещение газового скопления в водонасыщенном поровом пространстве пород.

— обуславливает обезвоживание пород с высоким содержанием ОВ. Высокое содержание ОВ в породах, погружившихся в главную зону газообразования, приводит к формированию огромных объемов газа, который за счет испарения поровой воды мгновенно превращается в парогазовую смесь. Баженины Западной Сибири в ряде районов были обезвожены образовавшимися в больших количествах газами, которые в результате испарения поровых вод превращались в парогазовые смеси, способствовавшие возникновению сверханомальных давлений, что приводило к газогидроразрывам и миграции газов в виде парогазовых смесей с большим содержанием газозапаригенной влаги.

— в субдуцирующей плите повышается влагосодержание с возрастанием температуры (еще до ее критических значений для воды и ее высокоминерализованных растворов) за счет испарения поровых вод пород как ранее образовавшимися газами, так и вновь образующимися газами из органического вещества. Нами для случая постепенного прогрева газового месторождения (от 120 до 360 °С) выполнены расчеты возрастания давления в залежи от расширения газа-растворителя ( $\text{CH}_4$ ), а также от все увеличивающегося влагосодержания пластового газа (рис. 3).

Полученные данные показывают, что эндогенный прогрев газовой залежи приводит к значительному изменению соотношения метана и водяного пара в связи с увеличением объемов метана из-за его температурного расширения, а водяного пара в связи с испарением остаточной воды.

Прогрев залежи обуславливает значительное возрастание пластового давления (рис. 3). Так, при начальных термобарических параметрах залежи ( $P = 27,20$  МПа,  $T = 120^\circ\text{C}$ ) влагосодержание пластового газа было равным 0,0118 мол. д., при этом парциальные давления  $\text{CH}_4$  и водяного пара ( $\text{H}_2\text{O}^{\text{пар}}$ ) составляли соответственно 26,54 и 0,66 МПа. При возрастании температуры в закрытой залежи до  $360^\circ\text{C}$  пластовое давление достигнет 122,23 МПа, т.е. возрастёт в 4,5 раза. При этом парциальное давление  $\text{CH}_4$  составит 67,30 МПа, а парциальное давление  $\text{H}_2\text{O}^{\text{пар}}$  достигнет 54,93 МПа.

В действительности подобного возрастания в газовой залежи пластового давления не будет наблюдаться, так как неизбежны газогидро-разрывы покрышки или подошвы газонасыщенного резервуара с переток парогазовой смеси в соседние водонасыщенные пласты.

#### 4. О роли газозапаригенной влаги в гидротермальном процессе

Влияние газозапаригенной влаги на гидротермальный процесс, наблюдаемый в океанической и континентальной корках, практически никем в достаточной степени не исследован, поэтому на данной проблеме остановимся несколько подробнее.

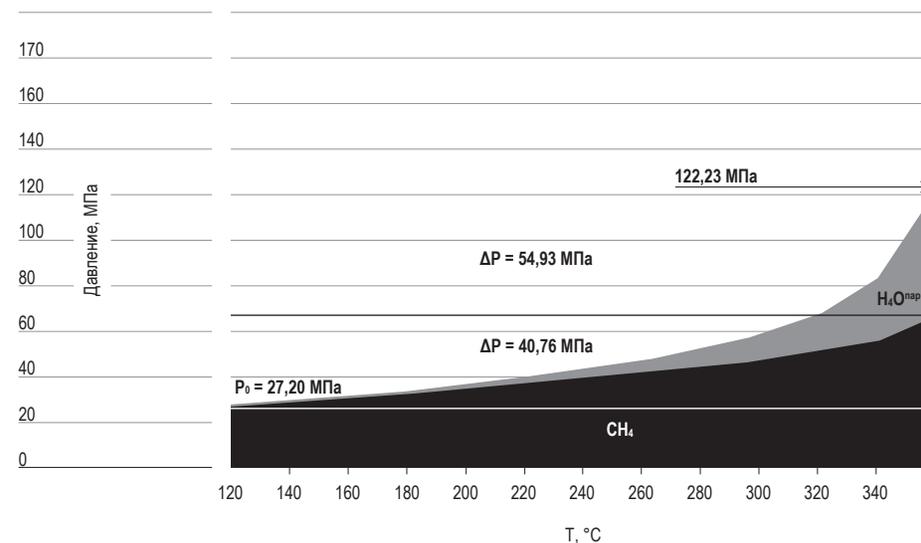


Рис. 3. Динамика возрастания парциального давления метана и водяного пара.

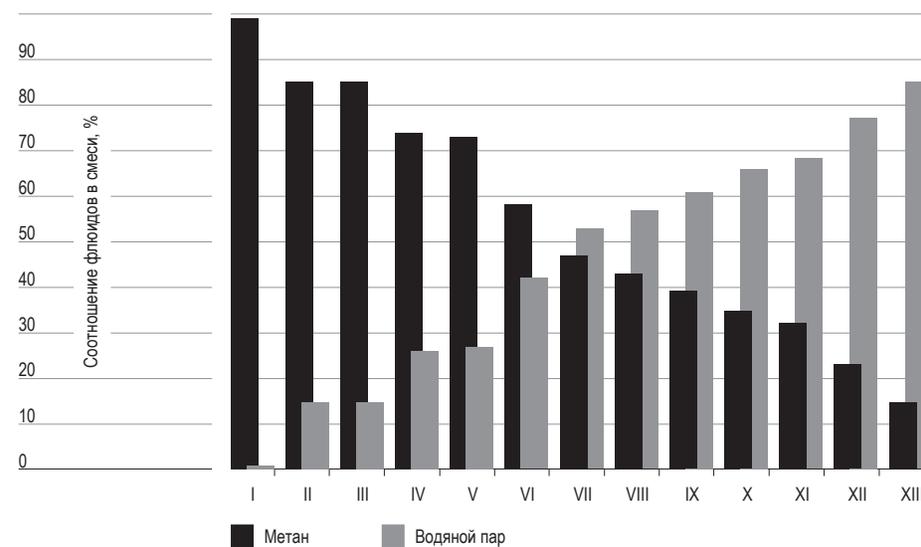


Рис. 4. Соотношение метана и водяного пара в гидротермах на выходе источника на океанское дно.

Большинство исследователей, изучающих океанический гидротермальный процесс, считает, что доставка химических элементов к океаническому дну осуществляется с помощью циркуляционной системы. Согласно этой теории, морская вода опускается от океанического дна к магматической камере, где она частично насыщается химическими элементами, нагревается и из-за пониженной плотности поднимается через породу, из

которой дополнительно извлекает элементы, и транспортирует их в повышенных количествах к океанскому дну, где они выпадают в виде руд.

Не отрицая доставки рудных элементов к океанскому дну по указанному механизму, мы хотим обратить внимание на возможность массопереноса химических элементов из магматического очага к океанскому дну парогазовыми смесями. К настоящему времени дегазация недр планеты признается большинством геологов [30, 31]. Отделяющийся от магматического очага высокотемпературный гомогенный флюид в газовой фазе по мере снижения температуры до критических значений вначале для высокоминерализованного раствора (500–700 °С), а затем и для пресной воды (374 °С), разделяется на две фазы: жидкую и газовую. Последняя представлена парогазовой смесью с очень высоким содержанием газоэвапоригенной влаги с растворенными в ней химическими элементами. Эта смесь опережает жидкий флюид и быстрее достигает океанского дна (табл. 5), где при снижении температуры сбрасывается большая часть химических элементов, формирующих рудные залежи. Рисунок 4 наглядно демонстрирует влияние температуры на влагосодержание гидротерм на выходе на океанское дно.

Если в бассейне Манус в источнике DESMOS на выходе на океанское дно при давлении 29,87 МПа и температуре 120 °С содержание газоэвапоригенной влаги в гидротерме будет составлять всего лишь 1,03 об. % (I в табл. 5), то при том же давлении, но при температуре на выходе на дно

Табл. 5. ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ РЯДА МЕТАНОВЫХ ГИДРОТЕРМ НА ВЫХОДЕ ИСТОЧНИКА НА ОКЕАНСКОЕ ДНО

Район	Гидротермальная система	Источник	L до дна, м	P на дне, МПа	T на дне, °С	W. мол. доля	Номера для рисунка 4
Восточно-Тихоокеанское поднятие (ВТП)		–	2600	26,78	273	0,288	–
		OBS	2600	26,78	350*	0,743	–
		SW	2600	26,78	*355	0,743	–
		HG	2600	26,78	*351	0,743	–
		Бассейн Гуаймас	3	2000	20,60	285	0,419
Южная часть ВТП		4	2000	20,60	315	0,606	IX
	17°25' ю. ш.	Nadir		20,60	340	0,767	XII
	18°15' ю. ш.	Akorta		20,60	305	0,534	VII
	Хребет Эксплорер	Vent 12d	1850	19,06	306	0,566	VIII

Подводный хребет Хуан-де-Фука	Сегмент Эндевор, 47°57' с. ш.	Hulk	1850	19,06	*353	0,842	–	
		Lobo	1850	19,06	346	0,822	–	
		Peanut	1850	19,06	350	0,842	–	
		North	1850	19,06	*356	0,842	–	
		Infemo	1850	19,06	328	0,727	–	
		Hell	1850	19,06	301	0,530	–	
		Crack	1850	19,06	217	0,152	III	
		Virgin Mound	1850	19,06	299	0,517	–	
		Хребет Хуан-де-Фука, южная часть, сегмент Cleft, 45° с.ш.	Plume	2190	22,56	224	0,151	II
			Vent 1	2190	22,56	285	0,397	–
Pipe Organ	2190		22,56	262	0,280	–		
Monolith	2190		22,56	327	0,664	–		
Срединно-Атлантический хребет	ТАГ, 26° с. ш.	Black smokers	3640	37,49	*363	0,684	XI	
		White smokers	3655	37,65	260	0,193	–	
			3655	37,65	270	0,230	–	
			3655	37,65	280	0,266	V	
			3655	37,65	290	0,303	–	
	MARK, 23° с. ш.	I	3500	36,05	350	0,690	–	
		Snake Pit	3500	36,05	345	0,655	X	
		Broken Spur, 29° с. ш.	4	3250	33,48	*364	0,700	–
			Поле Хине Хина	2000	20,60	40	0,00065	–
			Поле Ваи Лили	1600	16,48	342	0,848	XIII
Басс. Сев. Фиджи	Вайт Леди	2015	20,76	285	0,417	VI		
Басс. Манус	Венский лес	2900	29,87	275,7	0,264	IV		
Басс. Манус	Вост. DESMOS	2900	29,87	88	0,0039	–		
		2900	29,87	100	0,0055	–		
		2900	29,87	110	0,0079	–		
		2900	29,87	120	0,0103	I		

\* Влагосодержание определено для температуры 350 °С.

275,7 °С содержание газозапаригенной влаги достигнет 26,4 об. % (IV в табл. 5). В источнике же Nadig при давлении 20,60 МПа и температуре 340 °С гидротермальный раствор будет состоять на 23,3% из газа-растворителя (метан) и на 76,7% из водяного пара (газоэвапаригенной влаги).

При составлении таблицы 6 глубина моря до дна, температура гидротермального источника при выходе на океанское дно заимствованы из работы [29].

Данные табл. 5 и рис. 4 свидетельствуют о значительном диапазоне термобарических параметров поступающих на океанское дно гидротермальных растворов, которые обуславливают как массоперенос химических элементов в парообразной влаге, т.е. в газовой фазе, так и масштабы их концентрирования на океанском дне в виде руд в результате резкого изменения температуры раствора, обуславливающего конденсацию газозапаригенной влаги с содержащимися в ней химическими элементами.

В заключение данной работы доводим до сведения коллег, что авторами создана новая программа расчета влагосодержания природных газов с относительной плотностью от 0,6 до 1,8, в пределах давлений от 0,1 до 140 МПа, температуры от –40 до 350 °С, минерализации сопряженной с газом воды от 0 до 500 г/дм<sup>3</sup>.

В качестве примера в таблице 6 приведены результаты расчета влагосодержания метановой парогазовой смеси в сопряжении с водой минерализации 150 г/дм<sup>3</sup>.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Газозапаригенная влага – это глобальное явление на планете Земля. В докритических условиях по температуре для воды любой минерализации сопряжение в земной коре свободного скопления газа от зародышевого пузырька до гигантских газовых залежей с жидкой водой приводит к формированию парогазовой смеси, состоящей из газа-растворителя и водяного пара (газоэвапаригенной влаги).

Газозапаригенная влага влияет практически на все процессы, протекающие в разрабатываемых газовых, газоконденсатных и нефтяных месторождениях, в подземных хранилищах газов и в земной коре.

В месторождениях углеводородов газозапаригенная влага влияет на подсчет начальных и текущих запасов газа и конденсата, повышает флюидное давление в газовых и газоконденсатных залежах, приносит энергию в пластовый газ, влияет на состав углеводородной части смесей, способствует образованию обратной эмульсии, ускоряет сегрегацию заземленного водой газа в обводненной зоне, повышает конденсатоотдачу и нефтеотдачу, способствует проявлению внутреннего флюидонапорного режима, обуславливает более быстрое проникновение газов к земной поверхности, формирует оторочки опресненных вод, ускоряет продвижение внедрившейся в газовую залежь пластовой воды, увеличивает объем внедряющейся в газовую залежь законтурной воды, обуславливает осушение призабойных зон скважин. Газозапаригенная влага увеличивает объем

Табл. 6. ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ CH<sub>4</sub> И МЕТАНОВОЙ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ В СОПРЯЖЕНИИ С ВОДОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ 150 г/дм<sup>3</sup>

T, °C	P, МПа	Влагосодержание газа			T, °C	P, МПа	Влагосодержание газа		
		мол. д.	г/м <sup>3</sup>				мол. д.	г/м <sup>3</sup>	
			CH <sub>4</sub>	смесь				CH <sub>4</sub>	смесь
150	20	0,0245	18,8	18,3	250	20	0,1911	177,0	143,1
	30	0,0182	13,8	13,6		30	0,1402	122,2	105,0
	40	0,0144	11,0	10,8		40	0,1165	98,8	87,3
	50	0,0122	9,2	9,1		50	0,0996	82,9	74,6
200	20	0,0733	59,3	54,9	300	20	0,4549	624,9	340,7
	30	0,0527	41,6	39,5		30	0,3394	384,8	254,2
	40	0,0435	34,0	32,5		40	0,2806	292,0	210,1
	50	0,0374	29,1	28,0		50	0,2542	255,3	190,4
225	20	0,1203	102,4	90,1	350	20	0,8733	5159	654,0
	30	0,0877	72,0	65,7		30	0,7092	1826	531,1
	40	0,0729	58,9	54,6		40	0,6591	1448	493,6
	50	0,0605	48,2	45,3		50	0,6252	1249	468,2

закачиваемого в ПХГ газа, способствует проявлению пневмоконденсационной кавитации, ускоряет миграцию газа из области его генерации, обуславливает газофазный массоперенос химических элементов через земную кору и способствует формированию стратиформных рудных месторождений. Парогазовые смеси осуществляют транспорт пресных вод в виде газозапаригенной влаги через зоны земной коры, насыщенных подземными водами любой минерализации.

Имеющийся эмпирический материал и результаты выполненных авторами расчетов свидетельствуют о том, что весьма значительна роль газозапаригенной влаги в формировании аномально высоких давлений в газовых залежах в субдуцирующей плите. Несомненно, весьма высока роль газозапаригенной влаги в переносе химических элементов в гидротермальном процессе от магматической камеры к океанскому дну.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ  
СПИСОК**

1. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология. М.: Недра, 1996. 425 с.
2. Руководство по добыче, транспорту и переработке природного газа. Д.Л. Катц, Д. Корнелл, Р. Кобаяши Р. и др. М.: Недра, 1965. 676 с.
3. Султанов Б.И. Глубинные конденсатные воды газоконденсатных месторождений и условия их формирования // Докл. АН Азерб. ССР. 1961. Т. XVII. № 12. С. 1165–1167.
4. Петренко В.И., Рассохин Г.В., Леонтьев И.А. Контроль за обводнением газоконденсатных скважин с помощью наблюдений за минерализацией пластовых вод // Газовое дело. 1966. № 2. С. 10–16.
5. Контроль за процессом обводнения газовых и газоконденсатных месторождений по гидрохимическим показателям / И.А. Леонтьев, В.И. Петренко, Г.В. Рассохин и др. / Обзорная информация. М.: ВНИИОЭНГ, 1967. 48 с.
6. Влияние обводнения многопластовых газовых и газоконденсатных месторождений на их разработку / Г.В. Рассохин, И.А. Леонтьев, В.И. Петренко и др. М.: Недра, 1973. 264 с.
7. Взаимосвязь природных газов и воды / В.И. Петренко, Н.В. Петренко, В.Г. Хадыкин, В.Д. Щугорев. М.: Недра, 1995. 279 с.
8. Гидрогеологический контроль за разработкой газовых месторождений / А.Л. Козлов, А.С. Тердовидов, Н.Е. Чупис, В.А. Терещенко. Обзор. М.: ВНИИЭгазпром, 1978. Вып. 8. 52 с.
9. Вернадский В.И. Очерки геохимии. 7-е (4-е русское) издание. М.: Наука, 1983. 422 с.
10. Мартынова О.И. Некоторые вопросы растворимости малолетучих неорганических соединений в водяном паре при высоких температурах и давлениях // Физическая химия. 1964. Т. XXXVIII. № 5. С. 1065–1075.
11. Геолого-геохимические процессы в газоконденсатных месторождениях и ПХГ / В.И. Петренко, В.В. Зиновьев, В.Я. Зленко и др. М.: Недра, 2003. 511 с.
12. Geodynamique des fluides dans le cadre du gisement de Hassi R'Mel / T. Ghalem, M. Terkmani, V. Petrenko, V. Potukaev // 4-eme Seminaire National des Science de la Terre, Alger, 5-7 Juin 1982: Resumes. Alger: Centre National de Recherches et d'Applications des Geosciences (C.R.A.G.), Institut des Sciences de la Terre (I.S.T.), 1982. P. 46.
13. Петренко В.И., Заводнов С.С. Роль фазовых переходов в системе углеводороды–вода в формировании оторочек маломинерализованных вод // Доклады АН СССР. 1984. Т. 278. № 5. С. 1196–1199.
14. Петренко В.И., Заводнов С.С. Роль докритического пара воды в вертикальном массопереносе (на примере парогазовых смесей газоконденсатных месторождений) // Доклады АН СССР. 1986. Т. 291. С. 454–457.
15. Петренко В.И., Доготь А.Я. Механизм пневмогидравлической квазикавитации // Советская геология. 1987. № 3. С. 115–118.
16. Петренко В.И. О формировании гидротерм из глубинных парогазовых смесей // Известия Северо-Кавказского научного центра высшей школы. Технические науки. 1987. № 3. С. 6–10.
17. Петренко В.И., Доготь А.Я., Петренко Н.В. Диффузионно-квазикавитационный процесс в газовой залежи // Термогазодинамические процессы и системы их контроля при разведке, транспортировке и добыче нефти и газа. Харьков, 1989. С. 125–128.
18. Petrenko V.I., Dorogochinskaya V.A., Savenkov U.I., Kapitonova G.V., Fadeev V.S. Some physico-chemical peculiarities of oils from argillaceous reservoirs in the eastern near-caucasus district // International conf. on petroleum chemistry, 1–4 oct. 1991, Tomsk, USSR. Tomsk, 1991. P. 237–238.
19. Petrenko V.I., Dorogochinskaya V.A. Role of natural gases in the formation of microelemental composition of crude oils // International conf. on petroleum chemistry, 1–4 oct. 1991, Tomsk, USSR. Tomsk, 1991. P. 326–327.
20. Петренко В.И., Петренко Н.В. О роли эндогенных газов в формировании океанических железомарганцевых конкреций // Доклады АН Украины. 1991. № 11. С. 82–85.
21. Петренко В.И., Петренко Н.В. О роли природных газов в формировании океанических железомарганцевых конкреций // Геологический журнал. 1992. № 2. С. 45–54.
22. Petrenko V., Vershovski V., Petrenko N. Geologo-Physical and Geochemical Results of Natural Gases and Water global connection // Abstracts of 30th International Geological Congress, 4–14 August 1996, Beijing, China. Beijing: IGC, 1996. Vol. 2. P. 186.
23. Petrenko V., Geresh P., Vershovski V. To the Problem of Gas phase transport of Chemical Elements in Earth's Crust // Abstracts of 30th International Geological Congress, 4–14 August 1996, Beijing, China.– Beijing: IGC, 1996. Vol. 2. P. 891.
24. The Role of Water Vapor of Gas-Vapor Mixtures in Geological-Physical and Geochemical Processes in Hydrocarbon Accumulation and in the Earth's Crust / V. Petrenko, R. Gasumov, N. Petrenko, S. Ostroukhov // "Problem of Water Resources, Geothermics and Geoecology". Proceedings of the International Scientific Conference devoted to the 100th anniversary of academician G.V. Bogomolov. Minsk, June 1–3, 2005. Minsk: IG&G NAS of Belarus, 2005. Vol. II. P. 209–211.

25. Петренко В.И. Пространственно-генетическая связь природных газов и воды и роль парообразной влаги в проявлении геолого-геохимических процессов в месторождениях углеводородов и земной коре // Дегазация Земли: геофлюиды, нефть и газ, парагенезы в системе горючих ископаемых / Тез. Междунар. конфер. М.: ГЕОС, 2006. С. 206–208.
26. Черных В.А., Шмыгля П.Т. Опыт освоения глубокозалегающих газовых месторождений сложного состава с аномально высоким пластовым давлением // Газовая промышленность, серия: Передовой производств. опыт в газовой промышленности. Обзор. М.: ВНИИЭгазпром, 1985, вып. 2. 52 с.
27. Белецкая С.Н. Первичная миграция нефти. М.: Недра, 1990. 288 с.
28. Mechanism of Liquid Hydrocarbon Gas-phase Transfer / V.I. Petrenko, V.D. Schugorev, N.V. Petrenko, S.N. Beletskaya // Abstracts of 18th International Organic Geochemistry. Amsterdam: Pergamon, 1997. P. 169–170.
29. Гурвич Е.Г. Металлоносные осадки Мирового океана. М.: Научный Мир, 1998. 340 с.
30. Харченко В.М., Домарева А.Е. Тектоно-физические условия образования структур центрального типа, закономерности распространения залежей углеводородов и очагов землетрясений // Наука. Инновации. Технологии. 2016. № 2. С. 117–130.
31. Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М. Углеводородная ветвь дегазации в исследованиях по проблеме «Дегазация Земли». Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы. Материалы Всероссийской конференции, 22–25 апреля 2008 г. М.: ГЕОС, 2008. С. 3–6.

УДК 502.64

Подосян А.А. [Potosyan A.H.]

## СЕЛЬСКИЕ МЕСТНОСТИ КАК ПРЕДПОСЫЛКА ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ ГОРНЫХ РЕГИОНОВ

(на примере Республики Армения)

Rural areas as a prerequisite for the efficient  
use of the territories of mountainous regions  
(on the pattern of the Republic of Armenia)

Ограниченность территориальных ресурсов Республики Армения диктует необходимость более эффективного и целенаправленного использования земельных ресурсов, что особенно важно в условиях сложного политико-географического положения, в котором находится страна. Поскольку большая часть территории и более половины населенных пунктов республики находятся на высоте выше 1500 м над у.м., относительно равномерная и устойчивая заселенность и рациональное использование земельных ресурсов является актуальной проблемой. На основе анализа и обобщения фактического и статистического материала, в статье обосновывается точка зрения относительно того, что в горных странах вообще, и в Республике Армения в частности, эффективность использования земельных и территориальных ресурсов находится в непосредственной зависимости от плотности поселений и степени заселенности. Развитие сельских местностей и расселения, укрупнение малых и небольших сел, сохранение существующей сети поселений, восстановление и заселение покинутых сел является одной из важнейших задач социально-экономического развития страны.

Scarcity of territorial resources in the Republic of Armenia forces more efficient and targeted usage of land. This is even more important taking into consideration complicated political and geographic position of the country. For the reason the prevailing part of the country and most of the settlements are located on altitudes higher than 1500 over sea level, relatively monotonic and stable resettlement and rational usage of natural resources are an urging problem. The article is stating the point of view that effectiveness of use of land and territory resources in mountainous countries at all and particularly in Armenia directly correlates with the density and level of population, statement is based on analysis and summarizing of actual and statistical material. Development of rural areas and resettlement, agglomeration of medium and small villages, preserving existing network of settlements as well as reconstruction and repopulation of abandoned ones is one of the most important objectives of social-economic development of country.

**Ключевые слова:** сельская местность, сельские поселения, переселение, сельское расселение, горные регионы, территориальные ресурсы, Республика Армения.

**Key words:** rural area, rural settlements, resettlement, rural population settlement, mountainous regions, territorial resources, Republic of Armenia.

**Введение.** Основная функция большей части (более 90 %) сельских поселений Республики Армения (РА) заключается в сельскохозяйственном производстве, а в остальных поселениях сельское хозяйство играет значительную роль. Кроме этого, несмотря на то, что уровень

урбанизации в Армении составляет 64 %, только в столице сосредоточено более 1/3 населения страны, а в 7 наиболее крупных городах республики проживает 74 % всего городского населения. В ряде районов городские поселения отсутствуют, а в некоторых городских поселениях, которые являются райцентрами, население не превышает 7000 человек. Приведенные данные доказывают, что сельские поселения являются основным звеном в единой системе расселения Армении. Из этого следует, что в условиях сильно выраженной очаговости урбанизации, в процессах развития сельских местностей наибольшую роль играют не урбанизационные, а местные факторы, как то, производственные, социально-бытовые, природно-географические, историко-этнографические, региональные и др.

Территория является одним из главных природных ресурсов страны. Использование территории имеет многосторонний характер и непосредственно связано как с формой производства, так и с особенностями размещения городских и сельских населенных пунктов и других объектов. Наличие природных ресурсов, а также возможности для размещения населенных пунктов, как правило, зависят от размеров территории страны.

Ограниченность территории РА диктует необходимость более рационального использования земельных ресурсов, что особенно важно в условиях сложного политико-географического положения, в котором находится страна. С этой точки зрения, крайне важным является относительно равномерное размещение населения и сети населенных пунктов.

**Материалы и методы исследований.** Основой для исследования послужили данные переписи населения за 1959, 1970, 2011 гг. и текущего учета за 1988 и 2015 г. относительно численности населения РА, в частности, сельских поселений приграничных и горных районов республики. Проведен статистический анализ и обобщение указанных данных, делая акцент на тенденции изменений показателей людности, имевшие место в разных группах сельских поселений и состоянии на данный момент. В работе применены методы статистического и сравнительно-географического анализа.

**Результаты исследований и их обсуждение.** В горных странах с характерным расчлененным рельефом существует непосредственная связь между плотностью населенных пунктов и эффективностью использования земельных и территориальных ресурсов. Средняя высота территории РА над уровнем моря составляет 1800 м. Более 70 % территории и 50,7 % населенных пунктов расположены выше отметки 1500 м [5], в связи с чем относительно равномерное заселение и целенаправленное эффективное использование земельных ресурсов является важнейшей из задач.

Горный характер территории РА оказывает влияние на все сферы человеческой деятельности, но наиболее сильно сказывается на расселении населения. Вертикальная зональность означает изменение всех компонентов природного комплекса, что предполагает перемены в производственной деятельности и в расселении населения. Каждый высотный пояс РА является относительно однородной территориальной единицей со свойственными ей природными условиями, структурой земельных уго-

дий, специализацией хозяйства и занятостью населения, формой расселения и людностью поселений.

Повышение эффективности использования территориальных ресурсов горных стран зависит от ряда факторов и особенно от характера расселения, в частности, от сельского расселения, поскольку сельские местности включают также территории, вовлеченные в производственную (пастбища, сенокосы, леса и др.) и непроизводственную деятельность (рекреация, туризм). Использование сельских территорий, степень и эффективность их освоения в значительной мере зависит от формы расселения, от плотности сельских поселений и их величины, от производственно-хозяйственной специализации и других характеризующих населенные пункты показателей. К перечисленному необходимо добавить такие немаловажные для горных стран факторы, как характер рельефа смежных территорий, вертикальная и горизонтальная расчлененность, крутизна склонов, их экспозиция и др.

Исследования показывают, что за прошедшие десятилетия сокращение численности сельского населения и числа сельских населенных пунктов РА в разных регионах страны оказало негативное влияние на использование территориальных ресурсов, что привело к уменьшению площади обрабатываемых сельскохозяйственных угодий. Так, если в Арагатской долине и на прилегающих к ней предгорьях формирование новых населенных пунктов существенным образом повлияло на освоение новых территорий, на развитие сельского хозяйства и увеличение валового продукта, то в горных регионах наоборот, сокращение численности сельского населения и числа сельских поселений привело к существенному уменьшению площади обрабатываемых земель.

В советское время программа перспективного развития сельских поселений включала укрупнение хозяйств (колхозов и совхозов) и ликвидацию небольших и малых сел ввиду их нерентабельности. Цель программы заключалась в демонстрации преимуществ крупного колхозного и совхозного производства. Подобная политика осуществлялась на основе единых принципов и критериев в масштабе всей страны без учета особенностей горных регионов, таких как природно-географические условия и специфика сельского расселения. К примеру, в результате осуществления этой политики в Нечерноземной полосе России были ликвидированы тысячи сел.

Для Армении с ее горным рельефом последствия были намного хуже. Так, за период 1926–1988 гг. в РА количество сельских поселений сократилось на 361 [5]. Исчезло 274 села и 138 временных населенных<sup>2</sup> пунктов сельского типа. Вследствие ликвидации сел сократились и вышли из хозяйственного оборота значительные участки пашни, приусадебные территории и т.д., что по самым скромным подсчетам составило 173 тыс. га [2]. Исход населения с заселенных территорий сузил ареал расселения республики, снизил показатели эффективности использования территории, в частности, сельскохозяйственных угодий, что крайне нежелательно в предгорных, горных и приграничных районах.

В РА под влиянием природно-географических факторов и вследствие неравномерного распределения производительных сил сложились большие территориальные различия плотности населения, в особенности между равнинными и горными регионами. Ситуация усугубилась в результате неконтролируемой урбанизации и миграции населения из горных районов в равнинные. Это послужило причиной увеличения заселенности равнинных территорий, в горных же районах продолжающийся отток населения привел к значительному сокращению этого показателя. Возросли масштабы заселенности и использования под строительство ценных сельскохозяйственных земель Араратской долины. В настоящее время на каждые 100 кв. км Массиского, Эчмиадзинского и Арташатского районов, расположенных в Араратской долине, приходится соответственно 15, 11 и 7,5 сел. С другой стороны, в таких горных районах, как Мартунинский, Гаварский, Разданский и Вайкский, аналогичный показатель составляет всего 1,5–1,7 сельских поселений.

Исследования показывают, что сельские поселения играют особую роль в системе расселения горных и приграничных районов. Уровень социально-экономического развития сельских поселений находится в тесной взаимосвязи с основными отраслями хозяйства, что способствует рациональному использованию горных территорий, регулированию миграционных процессов. С этой точки зрения, необходимо глубокое и детальное изучение природно-хозяйственных особенностей горных территорий (районов), возможностей их социально-экономического развития, совершенствования сферы услуг, повышения социально-культурного уровня населения. Каждый горный регион должен стать органичной частью хозяйственного комплекса страны, что благоприятно отразится на улучшении системы расселения, социально-экономическом развитии отдельных сельских поселений, расширит ареал расселения, повысит степень и эффективность использования территориальных ресурсов.

Развитие горных районов РА и закрепление в них населения требует совершенствования системы расселения и укрупнения сельских поселений. Следует отметить значительное влияние природных условий на развитие сельских населенных пунктов, однако определенную роль в формировании и развитии некоторых видов расселения играют также социально-экономические факторы. Низкие показатели численности населения сел препятствуют развитию горных районов, являясь причиной их обезлюдения. В сложившихся обстоятельствах существуют вполне объективные трудности в создании социальных и бытовых условий для проживания в селах с населением всего в несколько десятков жителей. Ввиду малолюдности подобные села не в состоянии удовлетворить элементарные потребности населения: содержать школу, детский сад, объекты бытового обслуживания и пр.

Для расселения РА характерны относительно крупные сельские поселения, однако во многих горных районах республики их размеры меньше среднереспубликанского показателя в 1,5–2 раза, а в отдельных

случаях, например, в Амасийском, Мегринском и Кафанском районах – в 4,5–7,3 раза.

В РА 40% сельских поселений (в количестве 368), имеющих постоянное население, расположено в 14 районах из 37, которые являются одновременно и горными, и приграничными. За период 1970–2015 гг. в указанных районах численность сельского населения сократилась более чем на 76 тысяч, или на 24,5 %, а количество сельских поселений уменьшилось на 9. В настоящее время в 26 селах отсутствует постоянное население. За период 1970–2015 гг., когда число сельских поселений относительно стабилизировалось, в перечисленных горных районах в 2,5 раз увеличилось число сел с населением до 200 жителей, а с населением 501–1000 человек уменьшилось в 1,7 раз. Если в 1970 году в вышеупомянутых горных и приграничных районах проживало 29,8 % сельского населения РА, то в настоящее время эта цифра составляет лишь 19,0 %. Значительное уменьшение удельного веса сельского населения в высокогорных и приграничных районах привело к сокращению их экономического потенциала, территориальных ресурсов и эффективности использования сельскохозяйственных угодий. За тот же промежуток времени средняя людность сельских поселений уменьшилась на 203 единицы (с 824 до 621).

Анализ данных распределения сельских поселений по численности населения в горных и приграничных районах РА показывает, что более 33% этих сел небольшие и малые, с населением до 200 человек, а села с населением до 500 жителей составляют более 58% от общего числа, однако на их долю приходится всего 17,4% сельского населения этих районов.

Таким образом, очевидно, что небольшие и малые села горных и приграничных районов РА крайне неустойчивы в плане социально-экономического состояния и демографической ситуации, а со временем некоторые из них могут оказаться под угрозой исчезновения. Необходимо принять меры с целью увеличения численности населения и создания необходимой социальной и производственной инфраструктуры. В то же время целесообразно некоторые функции культурного, бытового и производственного обслуживания перенести из малых сел в крупные, что создаст предпосылки устойчивого общественного развития марзов и регионов и послужит основанием для их социально-экономического развития.

**Выводы.** Результаты анализа позволяют заключить, что одна из важнейших задач перспективного развития сельских местностей и расселения РА заключается в укрупнении небольших и малых сел в горных и приграничных районах. Ликвидация подобных сел недопустима, так как это приведет к сокращению заселенных территорий, воспрепятствует интенсивному использованию территориальных ресурсов и сельскохозяйственных угодий и в конечном итоге приведет к ослаблению обороноспособности страны. Необходимо не только сохранить существующую сеть сельских местностей РА, но и принять меры по восстановлению и заселению десятков покинутых и заброшенных сел.

Табл. ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ СЕЛЬСКОГО НАСЕЛЕНИЯ И НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ В ГОРНЫХ И ПРИГРАНИЧНЫХ РАЙОНАХ РА ПО ГРУППАМ ЛЮДНОСТИ (1959-2015 гг.)

Годы	Общее количество сел	Численность населения сел	Распределение сельских поселений и населения по группам людности (чел.)												Средняя людность сел	Села без населения
			до 200		201-500		501-1000		1001-3000		3001-5000		Более 5000			
			а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б		
1959	446	283057	111 24,9	12164 4,3	152 34,1	49203 17,4	102 2,9	70001 24,7	71 15,9	108528 38,3	7 1,6	25401 9,0	3 0,6	17760 6,3	635	
1970	377	310480	42 11,1	5392 1,7	125 33,2	41347 13,3	114 30,2	79729 25,7	88 23,3	150579 48,5	7 1,9	27000 8,7	1 0,3	6433 2,1	824	
1988	354	275026	72 20,3	8170 3,0	116 32,8	40323 14,7	75 21,2	56055 20,4	81 22,9	130329 47,4	9 2,5	33255 12,0	1 0,3	6894 2,5	777	
2011	368	212312	115 33,7	11912 5,6	101 29,5	34068 16,0	66 19,3	45686 21,5	52 16,2	88830 41,9	8 2,3	31816 15,0	-	-	621	26
2015	368	234271	107 31,7	10955 4,7	93 27,3	29728 12,7	68 19,9	46418 19,8	62 18,2	103449 44,2	9 2,6	32840 14,0	2 0,6	10881 4,6	687	27

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Итоги Всесоюзной переписи населения 1970 года по Армянской ССР. Ереван, 1972.
2. Манасян В.Г. Риски и пути их преодоления в специализации сельскохозяйственного производства // Вестник АГЭУ. 2013. №1. С. 69–85 (на арм. яз.).
3. Марзы Республики Армении и город Ереван в цифрах: статистический сборник. Ереван, 2015.
4. Населенные пункты и население Республики Армения за 1831–1959 годы: статистический сборник. Ереван, 1962.
5. Подосян А.А. Сельское население и поселения Республики Армения / А.А. Подосян. Ереван, 2013. 416 с. (на арм. яз.).
6. Результаты переписи населения Республики Армения, проведенного 12–21 октября 2011 года. Социально-экономическое состояние Республики Армения в 2013. (на арм. яз.).

Разумов В.В. [Razumov V.V.],  
Разумова Н.В. [Razumova N.V.]

## ОПАСНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ НА РАДИАЦИОННО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ ВОСТОЧНО- УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА РОССИИ

Hydrometeorological hazards on radiation  
contaminated territories of the East Ural region  
of Russia

В работе показана возможность влияния опасных гидрометеорологических явлений на характер и масштабы распространения радиоактивного загрязнения природной среды в пределах радиационно загрязненных районов. Проведен анализ пространственно-временного распространения ущербных гидрометеорологических явлений на радиационно загрязненных территориях Восточно-Уральского региона России (Челябинская, Курганская и Свердловская области). Большая часть, произошедших за 1991-2013 гг., таких явлений была связана с сильными ветрами, ураганами и смерчами, а также с сильными дождями и ливнями, что, по нашему мнению, в значительной степени способствовало распространению радиоактивных веществ по территории региона. Наиболее часто эти явления происходили на территории Челябинской области, наиболее радиационно загрязненной. Дана количественная характеристика произошедших чрезвычайных ситуаций, обусловленных опасными гидрометеорологическими явлениями, которые в основном возникали в весенне-летний период.

In work possibility of influence of the dangerous hydrometeorological phenomena on character and scales of distribution of radioactive pollution of environment within radiation polluted areas is shown. The analysis of existential distribution the ushcherboopasnykh of the hydrometeorological phenomena in radiation polluted territories of the East Ural region of Russia (The Chelyabinsk, Kurgan and Sverdlovsk regions) is carried out. The most part, the occurred for 1991-2013, such phenomena has been connected with strong winds, hurricanes and tornadoes, and also with heavy rains and heavy rains that, in our opinion, substantially promoted distribution of radioactive materials across the territory of the region. Most often these phenomena happened on the territory of Chelyabinsk region which is the most radiation polluted. The quantitative characteristic of the happened emergency situations caused by the dangerous hydrometeorological phenomena which generally arose during the spring and summer period is given.

**Ключевые слова:** Восточно-Уральский регион; радиационно-загрязненные территории, опасные гидрометеорологические явления, град, гололед, заморозки, сильные ветры, сильные дожди, наводнения и паводки, чрезвычайная пожароопасность, чрезвычайные ситуации

**Key words:** East Ural region; the radiation polluted territories, the dangerous hydrometeorological phenomena, a hail, ice, frosts, strong winds, heavy rains, floods and floods, extreme fire danger, emergency situations

#### ВВЕДЕНИЕ

Территория Восточно-Уральского радиоактивного загрязнения расположена в пределах Уральского федерального округа России – на севере Челябинской и Курганской областей, юге и юго-востоке

Свердловской области. Это районы, которые полностью или частично пострадали в результате сброса отходов радиохимического производства на производственном объединении (ПО) «Маяк» (Челябинская область) непосредственно в открытую речную систему Обского бассейна через р. Теча (1949–1951 гг.); регламентных выбросов в атмосферу радиоактивных нуклидов из вытяжных труб ПО "Маяк" (в первые годы работы предприятия), не имеющих специального газоочистного оборудования, а также вследствие радиационных аварий на ПО «Маяк», произошедших в 1957 и 1967 гг. Данными исследований [2, 9, 15 и др.] показано, что в течение последующего периода (вплоть до настоящего времени) зона радиационного загрязнения на Южном Урале видоизменялась и даже расширилась (с одновременным уменьшением уровня загрязнения за последние 40 лет), вследствие вторичной миграции радиоактивных продуктов с ранее загрязненных территорий за счет: транзитной роли рек; загрязнения прибрежных территорий речных экосистем (в результате эрозионной и русловой деятельности рек); вертикальной и горизонтальной миграции радионуклидов на поверхности почвы и в почвенном профиле (и в почвообразующих породах); распространения радиационного загрязнения ветрами, наводнениями, подземными водами по карстовым пустотам; переноса радиоактивных аэрозолей, образовавшихся в результате лесных пожаров и др.

Многочисленными исследованиями [2, 9, 13, 15 и др.] показано, что на распространение радиоактивного загрязнения (помимо вышеперечисленных и других факторов) значительное влияние оказывают и опасные гидрометеорологические явления (ОЯ). К опасным гидрометеорологическим явлениям относятся отдельные явления или их сочетания, воздействие которых может представлять угрозу жизни или здоровью граждан, а также может наносить материальный ущерб [10]. Гидрометеорологические явления оцениваются как опасные явления при достижении ими определенных значений гидрометеорологических величин (критериев). К ОЯ также относится сочетание (комплекс) гидрометеорологических явлений, каждое из которых в отдельности по интенсивности или силе не достигает критерия ОЯ, но близко к нему.

Опасными гидрометеорологическими явлениями, оказывающими основное влияние на характер и масштабы радиоактивного загрязнения природной среды в момент радиационных инцидентов и аварий, а также и после них, чаще всего выступают сильные ветры (ураганы, шквалы), суховеи, пыльные бури и пыльные поземки, сильные дожди (снегопады), наводнения и др. Так, проведенные исследования [2, 9, 13, 15 и др.] показали, что радиоактивные выпадения 1967 г. на территории Восточно-Уральского региона России, были в основном обусловлены ветровым переносом радиоактивной пыли, вызванным необычными, по сравнению со средними многолетними, погодными условиями: недостаточным количеством атмосферных осадков в течение зимнего периода времени; ранней и сухой весной; наличием сильных порывистых ветров (до 23 м/с). Пыльные бури и пыльные поземки также явились показателями вторичной ветровой

миграции радионуклидов в регионе Восточно-Уральского радиоактивного загрязнения [2, 19]. При этом минимальным порогом скорости ветра для пыльной бури на территории региона является значение 4 м/с, а для пыльного поземка – величина 3 м/с. Эти скорости сопоставимы со средними месячными скоростями ветра за теплый период, что свидетельствует в пользу высокой вероятности вторичной ветровой миграции радионуклидов с подстилающей поверхности. Основными направлениями ветровой миграции радиоактивных веществ в изучаемом регионе являются следующие: с запада на восток и с юго-юго-запада на северо-северо-восток [19].

Многочисленными исследованиями [2, 9, 13 и др.] доказано, что ливневые осадки и сильные снегопады приводят к пятнистости радиационного загрязнения территории за счет неравномерности выпадения на поверхность почвы и последующей водной эрозии (и стока поверхностных вод в гидрологическую сеть). Радиоактивное загрязнение территории часто происходит и в результате наводнений (паводков и половодий). В период сброса с ПО «Маяк» жидких радиоактивных отходов в реку Течу в 1949-1964 гг. (первый радиационный инцидент) радиоактивное загрязнение поймы реки происходило в период весенних половодий и дождевых паводков в теплый период года, которые способствовали распространению радионуклидов. Так, летом 1951 г. в результате паводковых затоплений примерно 80 кв. км пойменных земель оказались загрязненными радионуклидами, сорбированными донными отложениями р. Теча [2, 15].

«Вторичное» радиационное загрязнение условно чистых земельных участков также возможно при техногенном пылеобразовании, вызванном движением автомобилей в сухую погоду, сельскохозяйственными работами, природными пожарами и др. Возникновение и развитие лесных пожаров в радиационно-опасной зоне представляет значительную угрозу, т.к. при горении растительности на загрязненной территории с помощью конвективных потоков теплого воздуха с частичками пыли и *сажи* в атмосферу поднимается большое количество радионуклидов, которые переносятся на значительные расстояния. При крупных пожарах иногда происходит прорыв продуктов сгорания с радионуклидами даже в стратосферу.

Представленные примеры влияния опасных гидрометеорологических явлений на характер и масштабы радиоактивного загрязнения природной среды свидетельствуют о необходимости изучения пространственно-временного распространения ОЯ в пределах радиационно загрязненных районов, с целью оценки вероятности возможного изменения их границ или появления новых ареалов (зон) радиационного загрязнения.

*Целью* настоящего исследования является оценка потенциальной возможности влияния опасных гидрометеорологических явлений на характер и масштабы радиоактивного загрязнения природной среды и их пространственно-временной анализ на радиационно загрязненных территориях Восточно-Уральского региона России.

Учитывая масштабность проблемы, в данной работе решаются следующие основные задачи:

- оценка потенциальной возможности влияния опасных гидрометеорологических явлений на характер и масштабы радиоактивного загрязнения природной среды;
- анализ пространственно-временного распределения ущербопасных гидрометеорологических явлений на радиационно загрязненных территориях Восточно-Уральского региона России;
- описание районов опасного проявления гидрометеорологических явлений на радиационно загрязненных территориях изучаемого региона и количественная характеристика произошедших чрезвычайных ситуаций, обусловленных ими.

По данным Росгидромета [7], общее число опасных гидрометеорологических явлений (включая агрометеорологические и гидрологические) в Российской Федерации ежегодно составляет 800-1000 случаев. При этом около половины из них наносят значительный ущерб отраслям экономики и жизнедеятельности населения страны. Наибольшую повторяемость гидрометеорологические ОЯ имеют в теплый период года (с мая по сентябрь). Это связано с тем, что в этот период возрастает число ОЯ, обусловленных активной конвекцией, которая наблюдается по всей территории России. Распределение суммарного числа ОЯ по их видам показывает [7], что около 50% всех произошедших на территории России ОЯ приходится на сильные ветры (ураганы, шквалы, смерчи), сильные дожди (ливни), град и грозы.

Территория Уральского федерального округа, где находятся радиационно загрязненные районы, в относительно небольшой степени (в сравнении с другими федеральными округами страны) подвержена воздействию опасных гидрометеорологических процессов и явлений. Так, например, в 2013 г. в Уральском федеральном округе отмечалось только 9,0% случаев с опасными гидрометеорологическими явлениями (в 2012 г. – 8,3%) от общего числа ОЯ, произошедших на территории России.

В табл. 1 приведено распределение количества случаев с ОЯ, произошедших в рассматриваемом округе за последние 7 лет. Следует отметить, что ОЯ часто охватывают большие территории и одновременно наблюдаются в двух и более субъектах РФ. Данные об ОЯ в табл. 1 приведены с учетом всех наблюдавшихся на территории округа опасных метеорологических явлениях, независимо от того, зарегистрирован ли связанный с ними реальный экономический ущерб или нет.

Анализ табл. 1 показывает, что наибольшее количество случаев с ОЯ зарегистрировано на территории округа в 2010 г. – 78, а наименьшее (35) – в 2008 г. Из опасных метеорологических явлений наибольшее распространение получили комплекс неблагоприятных явлений (КНЯ) (в среднем 19,5% от всех случаев с ОЯ на территории округа), заморозки и сильные ветры (по 17,8%).

Табл. 1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ОЯ ПО ТЕРРИТОРИИ УРАЛЬСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА (УФО) РОССИИ [7]

Явления	Годы							Всего за 7 лет
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
Ветер	13	3	7	11	8	9	12	63
Сильные осадки	8	7	8	4	9	3	7	46
Метель	1	1	2	5	2	2	5	18
Пыльная буря	0	0	0	0	0	0	0	0
Смерч	0	2	1	0	1	1	0	5
Мороз	2	0	0	11	5	3	5	26
Аномально холодная погода	0	0	0	11	4	1	0	16
Жара	1	1	1	10	4	6	2	25
Аномально теплая погода	0	0	0	0	4	2	1	7
Град	2	2	2	1	4	0	1	12
Гололедные явления	0	1	1	0	1	0	0	3
Налипание мокрого снега	0	0	0	1	0	0	0	1
Заморозки	10	6	6	15	8	10	8	63
Туман	0	0	0	0	0	0	0	0
КНЯ	10	12	9	9	11	10	8	69
<b>Всего по УФО</b>	<b>47</b>	<b>35</b>	<b>37</b>	<b>78</b>	<b>61</b>	<b>47</b>	<b>49</b>	<b>354</b>

На радиационно загрязненных территориях Восточно-Уральского региона (Курганская, Свердловская и Челябинская области) встречаются практически все опасные гидрометеорологические процессы и явления, характерные для России и Уральского федерального округа: сильные дожди и ветры, интенсивные снегопады и метели, грозы, градобития, экстремальные температуры воздуха, наводнения и паводки, гололедно-изморозевые явления и др. В различных районах региона они имеют разную повторяемость и интенсивность проявления. Приведем их краткую характеристику по нашим данным [3, 18].

В целом территория изучаемого радиационно загрязненного Восточно-Уральского региона относится к районам со слабой степенью опасности проявления опасных гидрометеорологических явлений, распределе-

ние которых по территории региона очень неравномерно. Сильные дожди в регионе отмечаются на всей территории, способствуя образованию дождевых паводков. Сильные снегопады отмечаются также во всех субъектах региона, но наиболее часто – в пределах Свердловской и Челябинской областей. Площадь, охватываемая интенсивным снегопадом, может достигать на территории региона нескольких тысяч квадратных километров. Сильные метели в регионе бывают каждую зиму. Наиболее часто они возникают в равнинной степной части региона и связаны с прохождением средиземноморских и атлантических циклонов. Сильные ветры в виде ураганов, шквалов и смерчей занимают одно из ведущих мест в регионе по повторяемости и распространению опасных природных процессов. Грозы и молнии на территории региона наблюдаются с мая по сентябрь. Изучаемая территория относится к районам страны со слабой степенью опасности градобитий. Чаще других страдают от градобитий Челябинская и Свердловская области. Выпадение града на территории региона отмечается с апреля по октябрь. Ущерб от градобитий, относительно других регионов России, отличающихся высокой градовой деятельностью, незначителен. Заморозки на почве и в воздухе происходят довольно часто, но по интенсивности они слабые и значительного ущерба экономике региона не наносят. Образование туманов на территории региона довольно редкое явление. Оно происходит здесь, в основном, в весенний и осенний периоды, однако образование интенсивных туманов возможно и в зимние месяцы, особенно в отдельных районах Свердловской и Челябинской областей. Образование гололедных явлений на большей части территории региона возможно ежегодно, но чрезвычайные ситуации возникают редко и в основном на юге региона.

В зимний период территория региона часто занимается антициклоном, что способствует формированию здесь довольно длительных периодов с низкими температурами воздуха и создает благоприятные условия для формирования чрезвычайных ситуаций, связанных с экстремально низкими температурами воздуха. Высокие температуры воздуха (40–41°C) возможны на юге региона, где при дефиците выпадающих осадков возможно образование засух, существенно снижающих урожайность на сельскохозяйственных угодьях Курганской и юга Челябинской областей. С периодами дефицита осадков и высокой температурой воздуха связано развитие степных и лесных пожаров, при этом в атмосферу может подниматься и переноситься большое количество радионуклидов с загрязненных территорий.

Для проведения анализа опасных гидрометеорологических явлений, которые могут оказывать влияние на формирование радиоактивного загрязнения на изучаемой территории, нами были сформированы каталоги по ОЯ, отражающие их динамику (за разный период времени) по субъектам РФ в пределах изучаемого региона, включающие сведения о количестве случаев, интенсивности, продолжительности, районе распространения и ущербе. Основой используемой информации явились дан-

ные о произошедших ущербопасных гидрометеорологических явлениях в период с 1991 по 2013 гг., выбранные нами из базы данных ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД). Для отдельных временных периодов эти данные были нами дополнены материалами из других источников (ежемесячники, госдоклады Минприроды, Росгидромета, МЧС РФ и субъектов РФ).

В основу формирования и ведения специализированного массива сведений в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» положен следующий принцип: в массив сведений включаются все те неблагоприятные и опасные условия погоды и явления, которые наносят социальный и экономический ущерб. Другими словами, за основу берутся не только критерии опасных гидрометеорологических явлений, но и наличие социального и/или экономического ущерба, причиняемого ими. Сведения о чрезвычайных ситуациях, произошедших на территории региона за описываемый период, в результате катастрофического проявления гидрометеорологических ОЯ, были нами выбраны из базы данных МЧС РФ.

Проведенный анализ данных о произошедших за 1991-2013 гг. опасных гидрометеорологических явлениях показал, что в пределах радиационно загрязненной территории Восточно-Уральского региона России за этот период времени было отмечено более 700 ущербопасных ОЯ. Наиболее часто гидрометеорологические ОЯ происходили на территории Челябинской области (41% случаев). На долю Свердловской и Курганской областей приходится соответственно 35% и 24% случаев с ОЯ.

Наибольшее количество случаев с ОЯ в радиационно загрязненном Восточно-Уральском регионе происходит летом (37% случаев) и весной (31%). На осень приходится 22% случаев ОЯ, а на зиму – 10%. Наиболее опасны теплые месяцы – май, июнь, июль, на которые приходится 44% всех происходящих опасных гидрометеорологических явлений в году. Наименьшее количество случаев с ОЯ зарегистрировано в ноябре (4%), декабре и январе (по 3%) (табл. 2).

Большая часть, произошедших за изучаемый период ОЯ, была связана с сильными ветрами, ураганами и смерчами (23% случаев от всех произошедших ОЯ), значительный вклад внесли сильные дожди и ливни (11%) и периоды с резким понижением температуры (10%), меньшую, но наиболее трудно предсказуемую долю имели ОЯ с чрезвычайной пожароопасностью (8%), смешанные осадки (7%), паводки и половодья (7%) (табл. 3).

Сильная ветровая деятельность наиболее выражена на территории Челябинской области (45,7% случаев сильного ветра). На долю Свердловской области приходится 33,3%, Курганской – 21,0%. Наиболее характерные максимальные скорости ветра на территории Восточно-Уральского региона колеблются в пределах 24–28 м/с, снижаясь с севера на юг региона [3]. Наибольшее количество случаев ОЯ с сильным ветром (смерчем, ураганом) происходит в летние месяцы (47% случаев). Весной и осенью ветровая деятельность в регионе снижается соответственно до 29% и 15% случаев

Табл. 2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА СЛУЧАЕВ ОЯ (%) ПО МЕСЯЦАМ НА РАДИАЦИОННО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА РОССИИ ЗА ПЕРИОД 1991-2013 ГГ.

Месяцы	Количество случаев (%) с ОЯ			
	Восточно-Уральский регион	Области		
		Курганская	Свердловская	Челябинская
Январь	3	4	3	2
Февраль	4	6	2	4
Март	5	6	5	6
Апрель	11	9	14	9
Май	15	17	16	13
Июнь	16	17	16	17
Июль	13	6	14	17
Август	8	6	7	9
Сентябрь	4	3	4	4
Октябрь	14	15	13	13
Ноябрь	4	6	3	4
Декабрь	3	5	3	2
<b>Итого (%):</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

(табл. 4). Зимой отмечается наименьшая ветровая активность – 9% случаев. В зимний период сильные ветра сопровождаются выпадением снега, что создает дополнительные условия для образования заносов на автодорогах, перерывах в работе аэропортов. Следует отметить, что в сентябре, на территории региона ущербопасные сильные ветры (смерчи, ураганы) не зарегистрированы. Ежегодный ущерб в регионе от сильных ветров и сопутствующих явлений оценивается в десятки миллионов рублей.

Территория Восточно-Уральского региона характеризуется средней и сильной степенью ливневой опасности. Максимальные суточные значения дождевых осадков достигают здесь 130 мм осадков за сутки [3]. Так, например, 10 августа 2001 г. в Сысертском районе Свердловской области в результате ливня за 45 минут выпало 34 мм осадков. Сильные дожди

Табл. 3. СООТНОШЕНИЕ ПРОИЗОШЕДШИХ ОПАСНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ (%) НА РАДИАЦИОННО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА РОССИИ ЗА ПЕРИОД 1991-2013 ГГ.

Опасные гидрометеорологические явления	Количество случаев (%) с ОЯ			
	Восточно-Уральский регион	Области		
		Курганская	Свердловская	Челябинская
Сильные ветры (ураганы, смерчи)	23	20	22	26
Пыльные бури	1	1	0	1
Сильные дожди (ливни)	11	5	12	14
Сильные снегопады	5	6	5	5
Метели	3	4	2	2
Снежные заносы	1	1	0	1
Смешанные осадки	7	8	7	7
Сложные отложения	4	5	4	5
Гололедные явления	4	3	5	4
Сильные морозы	4	6	4	3
Резкое понижение температуры	10	11	11	9
Резкое изменение погоды (РИП)	5	5	5	5
Комплекс неблагоприятных явлений (КНЯ)	4	4	4	5
Грозы	2	1	2	2
Туманы	0	0	0	0
Сильная жара	1	1	0	1
Чрезвычайная пожароопасность	8	11	5	10
Паводки и половодья	7	9	11	1
<b>Итого (%):</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

(ливни) наиболее часто происходят на территории Челябинской области (50,6% случаев сильного дождя). На долю Свердловской области приходится 37,7%, а Курганской – 11,7% случаев. Наибольшее количество случаев ОЯ с сильным дождем (ливнем) в регионе характерно для теплых месяцев (май-август), при этом выделяется июль – 44% случаев. В июне и августе количество случаев с сильным дождем снижается соответственно до 30% и 21% (табл. 4).

В летние месяцы происходит и наибольшее число случаев ОЯ с чрезвычайной пожароопасностью (55% случаев), приводящих к природным пожарам. Среди всех

Табл. 4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА СЛУЧАЕВ С УЩЕРБОПАСНЫМИ СИЛЬНЫМИ ВЕТРАМИ, ДОЖДЯМИ И ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ ПОЖАРООПАСНОСТЬЮ (%) ПО МЕСЯЦАМ НА РАДИАЦИОННО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА РОССИИ ЗА ПЕРИОД 1991-2013 ГГ.

Месяцы	Количество случаев (%) с ОЯ		
	Сильные ветры	Сильные дожди	Чрезвычайная пожароопасность
Январь	2	—	—
Февраль	6	—	—
Март	4	—	—
Апрель	8	—	5
Май	17	5	20
Июнь	26	30	22
Июль	12	44	25
Август	9	21	8
Сентябрь	0	—	15
Октябрь	11	—	3
Ноябрь	4	—	2
Декабрь	1	—	—
<b>Итого (%):</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

месяцев здесь также выделяется июль (25% случаев). Весной количество случаев с чрезвычайной пожароопасностью составляет 25%, осенью – 20% (табл. 4). Наибольшее число случаев с чрезвычайной пожароопасностью характерно для Челябинской области (49,1% случаев). На долю Курганской и Свердловской областей число таких случаев составляет соответственно 30,5% и 20,3%.

Распределение случаев с ОЯ в отдельных субъектах РФ в пределах изучаемого региона, в основном подтверждает региональную тенденцию, с некоторыми отличиями. На территории Челябинской области за изучаемый период (1991–2013 гг.) было отмечено около 300 ущербопасных гидрометеорологических явлений. Наибольшее количество случаев с ОЯ отмечается летом (43% случаев). На весну, осень и зиму приходится соответственно 28%, 21% и 8% случаев. Наибольшее количество случаев с ОЯ регистрируется в июне и июле (по 17%) (табл. 2). Анализ разных временных отрезков изучаемого периода (1991–2013 гг.) распределения ОЯ по области лишь подтверждает общую многолетнюю тенденцию с некоторыми отличиями. Так, например, за период 2001-2005 гг. при наибольшем

Табл. 5. ПОВТОРЯЕМОСТЬ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ В 2001–2005 ГОДАХ (ЧИСЛО СЛУЧАЕВ)

Год	Месяцы												Всего за год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2001	0	1	0	0	4	1	1	0	1	1	0	0	9
2002	1	0	0	0	3	1	0	1	4	2	1	2	15
2003	0	0	0	4	2	6	2	2	3	1	0	0	20
2004	0	0	2	0	4	4	3	2	2	1	1	0	19
2005	0	0	1	0	0	4	2	3	4	1	1	1	17
<b>Итого за 5 лет:</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>13</b>	<b>16</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>14</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>80</b>

летнем количестве случаев с ОЯ (46% случаев), на осень пришлось 35% случаев с ОЯ, а на весну – 25% (табл. 5).

В разные годы структура видов ОЯ и их повторяемость на территории области различаются. Так, например, в 2004 г. из 19 случаев метеорологических ОЯ в 6 случаях наблюдались заморозки, которые, несмотря на их высокую повторяемость, большого ущерба экономике области не нанесли, так как по интенсивности были слабые. В течение летнего сезона наблюдался целый ряд конвективных явлений в виде ливней, гроз, града шквалистого усиления ветра до 31 м/сек. 11 августа в с. Дубровка Красноармейского района наблюдался смерч, скорость ветра достигала 27 м/сек. 19 июля отмечались градовые процессы, а в конце месяца – сильные дожди. 12 и 14 октября в большинстве районов области наблюдались осадки в виде дождя и мокрого снега. За трое суток выпало от 10 до 54 мм осадков. Среди КНЯ, произошедших в начале и конце марта, следует отметить сильные снегопады с налипанием мокрого снега на провода, гололед, метели, снежные заносы. Сильной почвенной и атмосферной засухой были охвачены 15 основных сельскохозяйственных районов области.

На 30% посевной площади погибли зерновые и зернобобовые культуры (360,5 тыс. га), а с остальных полей был получен низкий урожай. С 16 мая по 7 июня на всей территории области наблюдалась чрезвычайная пожарная опасность. В 2005 г. из 17 случаев метеорологических ОЯ в 5 случаях наблюдались заморозки, которые большого ущерба экономике области не нанесли. На долю чрезвычайной пожароопасности и КНЯ пришлось по 3 случая, а сильных дождей и гололедных явлений – по 2 случая. По продолжительности и нанесенному ущербу первенство в этом году принадлежало такому явлению, как чрезвычайная пожарная опасность.

Большая часть опасных гидрометеорологических явлений, произошедших на территории Челябинской области за период 1991-2013 гг. была связана с сильными ветрами, ураганами и смерчами (26% случаев от всех произошедших ОЯ), значительный вклад внесли сильные дожди и ливни (14%), меньшую, но также весомую долю имели ОЯ с чрезвычайной пожароопасностью (10%), резким понижением температуры (9%) и смешанные осадки (7%) (табл. 3).

Сильная ветровая деятельность на территории области в основном происходит летом (47% случаев). Весной, осенью и зимой ветровая активность снижается соответственно до 29%, 15% и 9% случаев. Направление ветра в разные сезоны года на территории области различное. Так, по данным центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС) по Челябинской области, в январе-мае, в основном, преобладают ветры южного и юго-западного направления со средней скоростью 3-4 м/с, в июне-августе – ветер дует с запада и северо-запада. В сентябре-декабре ветер поворачивает на южный и юго-западный, средняя скорость ветра составляет 3 м/с, максимальная – 18-28 м/с. Усиление ветровой деятельности происходит при метелях (до 16-28 м/с) и при грозах (до 16-25 м/с). В Троицке и Златоусте (16.06.1978 и 17.04.1980 гг.) была отмечена максимальная скорость ветра – 40 м/с.

Наибольшее количество случаев с сильным дождем (ливнем) на территории области отмечается в теплые месяцы (май-август), при этом выделяется июль (44%). Так, например, в июле 1915, 1957, 1961 и 1994 гг. выпало 180-215 мм осадков. В июне и августе количество случаев с сильным дождем снижается соответственно до 30% и 21%. По данным ЦГМС по Челябинской области, больше всего осадков выпадает в пределах горной части области (Златоуст – 704 мм), меньше – в лесостепном Зауралье (Челябинск – 439 мм), а еще меньше в степной зоне на юге области (Бреды – 351 мм).

Наибольшее количество случаев ОЯ с чрезвычайной пожароопасностью регистрируется в области в июне и сентябре (по 20,7%), а также в мае и июне (по 17,2%). На октябрь и ноябрь приходится 10,3% случаев чрезвычайной пожароопасности. По данным [11], на территории Челябинской области в среднем в год регистрируется порядка 1500 лесных пожаров, на площади 8000 га. Но бывают годы и с аномальной пожароопасностью. Так, например, в 2004 г. на территории области было зарегистрировано 4410 лесных пожаров на общей площади 22842 га. Средняя

площадь одного пожара составляла 4 га. Наибольшее количество ландшафтных пожаров происходит на территории Красноармейского, Увельского, Чебаркульского, Карталинского муниципальных районов; Миасского и Кыштымского городских округов.

На территории Свердловской области за изучаемый период (1991-2013 гг.) было отмечено около 250 ущербных гидрометеорологических явлений. Значительное количество случаев с ОЯ отмечалось летом (37% случаев) и весной (35%). На осень и зиму приходится соответственно 20% и 8% случаев. Наибольшее количество ОЯ регистрируется в мае и июне – по 16% (табл. 2).

Большая часть всех произошедших на территории Свердловской области ОЯ была связана с сильными ветрами, ураганами и смерчами (22% случаев от всех произошедших ОЯ), значительный вклад внесли сильные дожди и ливни (12%), меньшую долю имели ОЯ с паводками и половодьями (11%) и периоды с резким понижением температуры (11%) (табл. 3). ОЯ с сильными ветрами, в основном, отмечались летом (51,8% случаев). На весну, осень и зиму приходится соответственно 27,8%, 13,0% и 5,6% случаев. По данным ЦГМС по Свердловской области, во все сезоны года на территории области преобладают ветры западных и южных направлений, нередко ветры северные, реже – восточные.

Наибольшее количество ОЯ с сильными дождями на территории области отмечается в июне (48,3% случаев). На июнь, август и май приходится соответственно 34,5%, 13,8% и 3,4% случаев. Средняя величина осадков на территории области составляет 400 мм на юго-востоке области и до 500 мм – на севере. В горных районах запада и юго-запада области эта величина может превышать 600 мм (данные ЦГМС по Свердловской области).

Основное количество случаев ОЯ с чрезвычайной пожароопасностью в области регистрируется летом (58,3% случаев). Так, по данным [4], в середине июля 2010 г. метеорологический показатель пожарной опасности на территории области достигал пятого (чрезвычайного) класса. Размах лесных и торфяных пожаров был необычайно большой. 29 июля в Серовском районе Свердловской области был введен локальный режим чрезвычайной ситуации. Бушующие, в труднодоступном районе Северного управленческого округа, пожары приблизились к населенным пунктам в пределах территориального отдела поселка Красноглинный, куда входят поселки Боровой, Первомайский и Сотрино. С 1997 по 2013 гг. в области ежегодно регистрировалось от 422 до 2516 лесных пожаров [12].

В разные годы структура видов ОЯ и их повторяемость на территории Свердловской области изменяются, однако практически для всех изученных лет характерна наибольшая повторяемость случаев ОЯ с неущербными заморозками, в основном слабой интенсивности. Так, например, в 2006 г. большая часть из 29 опасных явлений, наблюдавшихся на территории области, была связана с заморозками вегетационного периода (13 случаев), значительный вклад внесли продолжительные январские

морозы (9 случаев), меньшую долю имели сильные ливни, очень сильные осадки, град и засуха [6]. В 2007 г. из 50 возникших опасных метеорологических явлений также отмечалось много заморозков (26 ночей с заморозками), конвективных явлений – шквалов, ливней, града. Из явлений холодного полугодия можно отметить февральские морозы. Обращает на себя внимание тот факт, что большая часть опасных гидрометеорологических явлений в 2007 году случилась в теплый период года. В 2010 г. из зарегистрированных 27 случаев с ОЯ, наибольшую повторяемость также имели заморозки (8 случаев), отмечались сильные морозы (6 случаев), сильные ветры с ураганами и шквалами (4) и сильные дожди (2). Небольшую повторяемость имели ОЯ с чрезвычайной пожароопасностью (3 случая), сильной жарой (2) и почвенной засухой (1), которые носили макромасштабный характер и отличались большой продолжительностью. Абсолютных рекордов высокой температуры в этом году не было установлено, несмотря на то, что жаркие периоды при температуре 35–37 °С отмечались и в июле, и в августе. Неоднократно были превышены суточные максимумы температуры (только в Екатеринбурге 4 раза – в июле, августе, сентябре) [5]. 5 августа в Артинском районе, а вскоре и в Красноуфимском районе, а 11 августа и на всей территории Свердловской области, была объявлена чрезвычайная ситуация по засухе. Больше всего от нее пострадали юго-западные и южные районы области: Артинский, Красноуфимский, Ачитский, Нижнесергинский, Сысертский и Каменский, на которые приходится 18% посевных площадей области. Опасных гидрологических явлений в этом году не наблюдалось.

Анализ ОЯ, произошедших в Свердловской области, за последние годы (2011-2013 гг.) показывает некоторые отклонения от среднесуточных значений (1991-2013 гг.) значений. Так, наибольшее количество ОЯ на территории Свердловской области в последние годы происходило в мае-сентябре, а наименьшее – в октябре-ноябре и марте-апреле. Устойчивой тенденции к росту числа опасных гидрометеорологических явлений на территории области явно не прослеживается. Например, 2011 и 2013 гг. оказались самыми спокойными за последние 10 лет – всего отмечено соответственно 10 и 12 случаев проявления опасных явлений.

На территории Курганской области за изучаемый период (1991-2013 гг.) было отмечено более 170 ущербных гидрометеорологических явлений. Наибольшее количество случаев с ОЯ отмечается как весной (32% случаев), так и летом (29%), при этом выделяются май и июнь (по 17%). На осень и зиму приходится соответственно 24% и 15% случаев (табл. 2). Большая часть произошедших на территории области ОЯ была связана с сильными ветрами, ураганами и смерчами (20% случаев от всех произошедших ОЯ), значительный вклад внесли ОЯ с чрезвычайной пожароопасностью и резкими понижениями температуры (по 11%), меньшую, но наиболее трудно предсказуемую и ущербную долю имели ОЯ с паводками и половодьями (9%) (табл. 3). По данным [16, 17], при весенних половодьях на реках области подтоплению подвергаются города

Курган и Шадринск, Катайский, Далматовский, Шадринский, Каргапольский, Белозерский, Куртамышский, Кетовский, Притобольный, Звериноголовский, Сафакулевский и Целинный районы. При прохождении максимальных уровней весеннего половодья, близких к 1% обеспеченности, зона затопления может составить 2,928 тыс. кв. км с населением 150,2 тыс. человек.

ОЯ с сильными ветрами отмечаются на территории области как летом (35,3% случаев), так и весной (32,3%). На осень и зиму приходится соответственно 17,6% и 14,8% случаев. Зимой преобладают юго-западные и западные (20–40% случаев) ветры, летом наблюдается увеличение северных и северо-западных ветров. В целом за год преобладают ветры юго-западного (20–30% случаев), в отдельных районах – западного направления. Средние годовые скорости ветра изменяются от 1,7 до 4,1 м/с [14].

ОЯ с сильными дождями на территории области регистрируются только летом, равномерно распределяясь по всем месяцам. Средняя годовая сумма осадков изменяется от 500 до 350 мм с уменьшением в направлении с северо-запада на юго-восток области. [1] и значительно колеблется по отдельным годам.

Основное количество случаев ОЯ с чрезвычайной пожароопасностью в области в основном регистрируется летом (61,1%). Лесные пожары могут возникать практически по всей площади лесного фонда области в период с апреля по октябрь. За последние 13 лет на территории Курганской области произошло более 11 тысяч случаев возгорания леса, лесостепей и полей. Чрезвычайно высокая горимость наблюдалась в 1996, 2004, 2008 и 2010 гг. В зоне лесных пожаров находится 209 населенных пунктов области с населением 117507 человек, кроме того, в зону входят 6 нефте- и газопроводов, 27 объектов экономики, 4 потенциально опасных объектов [8, 17].

Проведенный нами анализ фондовых материалов МЧС РФ показал, что на радиационно загрязненной территории Восточно-Уральского региона России за 1991-2013 гг. было объявлено около 140 чрезвычайных ситуаций (ЧС), обусловленных опасными гидрометеорологическими явлениями. По количеству произошедших гидрометеорологических ЧС выделяется территория Челябинской области, где за исследуемый период произошло 41% всех ЧС в регионе, на долю Свердловской области приходится 37%, а Курганской – 22%. В структуре источников ЧС гидрометеорологического характера преобладают наводнения (24% случаев), лесные пожары (23%), значительный вклад вносят сильные ветры (14%) и заторы льда (13%), меньшую, но также весомую долю имеют засухи (10%) и сильные снегопады (5%). Возникновение чрезвычайных ситуаций, обусловленных гидрометеорологическими ОЯ на территории региона, возможно круглогодично, но наиболее часто они возникают в весенне-летний период.

Наибольшее количество ЧС, произошедших на территории Курганской области за исследуемый период было обусловлено наводнениями (54%), природными пожарами (27%) и сильными ветрами (14%). Основ-

ную долю ЧС на территории Свердловской области также вносят наводнения (34%), природные пожары (18%), сильные ветры и дожди (по 12%). В Челябинской области чрезвычайные ситуации гидрометеорологического характера, в основном, обусловлены природными пожарами (34%), сильными ветрами (24%) и наводнениями (18%).

На основных реках региона практически ежегодно происходит превышение максимальных уровней воды, что нередко приводит к катастрофическим затоплениям. Только за исследуемый период (1991–2013 гг.) на территории региона было объявлено более 40 чрезвычайных ситуаций, обусловленных наводнениями. Так, например, в апреле–мае 1994 г. чрезвычайная паводковая обстановка сложилась на р. Тобол у г. Кургана, где максимальный уровень воды превысил среднесуточную отметку на 4,5 м. В г. Курган и ряде других населенных пунктов было затоплено более 3500 жилых домов, временно пришлось отселить 5300 человек. Ущерб от водной стихии в Курганской области составил 79 млрд. руб. (в ценах 1994 г.). Значительное наводнение произошло в августе 2013 г. в Челябинской области, когда в результате подъема уровня воды в реках Кызыл-Чилик, Караталы-Аят и прорыва Анненской плотины было подтоплено около 800 приусадебных участков и частных подворий. Особо следует выделить последствия катастрофического наводнения, произошедшего на реке Каква в **июне 1993 года** в городе Серове Свердловской области, когда в результате затопления пострадало 6,5 тысячи человек и 15 человек погибло. В зону затопления попало 1772 дома, из них 1250 домов стали непригодными для жилья. Были разрушены железнодорожный и 5 автомобильных мостов, 500 м главного железнодорожного пути. Пострадали четыре крупных завода, Серовская ГРЭС, около двадцати хозяйственных объектов, почти 400 га полей. Общий материальный ущерб составил 63 миллиарда рублей.

Наиболее часто ЧС, обусловленные паводками и половодьями, происходили на территории Свердловской области (38% случаев от всех гидрологических ЧС), на долю Челябинской области приходится 33%, Курганской – 29%. Все чрезвычайные ситуации, обусловленные гидрологическими процессами, происходили на территории изучаемого региона с апреля по август. При этом на апрель-май пришлось 77% всех произошедших ЧС.

Значительное превышение скоростных характеристик ветра (160 случаев за исследуемый период) на территории Восточно-Уральского региона более чем в 20 случаях привело к возникновению ЧС. Наиболее часто ЧС, обусловленные сильным ветром, происходили на территории Челябинской области (в 50% случаев), на долю Свердловской области приходится 33,3%, Курганской – 16,7% от всех произошедших ЧС. Все чрезвычайные ситуации, обусловленные сильными ветрами, происходили на территории региона с апреля по август. При этом на долю летних месяцев пришлось 72% всех произошедших ЧС. На территории Челябинской области практически все эти ЧС происходили в летние месяцы.

Из зарегистрированных (за исследуемый период) на территории региона почти 80 случаев с сильными дождями (ливнями), более чем в 10 случаях были объявлены чрезвычайные ситуации. Практически все объявленные ЧС, возникшие в результате интенсивных ливней и продолжительных дождей, происходили на территории Челябинской и Свердловской областей.

На территории региона за исследуемый период было также зарегистрировано около 60 случаев с чрезвычайной пожароопасностью. При этом в более чем 30 случаях на территории региона были объявлены чрезвычайные ситуации. Чаще всего ЧС, обусловленные природными пожарами на территории региона, происходили в мае (65,5% случаев). Больше всего ЧС, обусловленных лесными пожарами, произошло на территории Челябинской области (62% случаев).

Проведенный нами анализ данных о произошедших за 1991–2013 гг. ущербных гидрометеорологических явлениях показал, что в пределах радиационно загрязненной территории Восточно-Уральского региона России наиболее часто эти ОЯ происходили на территории Челябинской области, наиболее радиационно загрязненной. Наибольшее количество случаев с ОЯ в регионе происходило летом и весной, наименьшее – было зарегистрировано в ноябре-январе. Большая часть произошедших за изучаемый период ОЯ была связана с сильными ветрами, ураганами и смерчами, а также с сильными дождями и ливнями, что по нашему мнению в значительной степени способствовало распространению радиоактивных веществ по территории региона. Наибольшее количество гидрометеорологических ЧС произошло на территории Челябинской области, наименьшее – на территории Курганской области. В структуре источников ЧС гидрометеорологического характера на территории региона преобладают наводнения и лесные пожары, значительный вклад вносят сильные ветры. Наиболее часто чрезвычайные ситуации гидрометеорологического характера возникали в весенне-летний период.

Таким образом, проведенное исследование позволило выявить закономерности пространственного и временного распределения случаев ущербного проявления опасных гидрометеорологических явлений и связанных с ними ЧС, которые могли бы послужить существенным фактором изменения характера и масштабов радиоактивного загрязнения природной среды на радиационно загрязненной территории Восточно-Уральского региона.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроклиматические ресурсы Курганской области. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 138 с.
2. Атлас Восточно-Уральского и Карачаевского радиоактивных следов, включая прогноз до 2047 года / под ред. Ю.А. Израэля).

- М.: ИГКЭ Росгидромета и РАН, Фонд «Инфосфера» – НИА-Природа, 2013. 140 с. 1
3. Разумов В.В., Перекрест В.В., Разумова Н.В. и др. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций Уральского федерального округа России / под ред. С.К. Шойгу. М.: Дизайн. Информация. Картография. 2008. 304 с.
  4. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2010 году». Екатеринбург, 2011. 350 с.
  5. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2011 году». Екатеринбург, 2012. 350 с.
  6. Государственный доклад «О состоянии окружающей природной среды Свердловской области в 2006 году». Екатеринбург, 2007. 299 с.
  7. Доклады об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2007-2013 год. М.: Росгидромет, 2008-2014.
  8. Доклады о состоянии защиты населения и территорий Курганской области от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2008-2012 годах. Курган, 2009-2013.
  9. Исходные материалы для подготовки постановления правительства СССР по оздоровлению экологической обстановки в зоне ПО "Маяк" Минатомэнергопрома СССР. М. Т. 1,2. 1990. 320 с.
  10. Критерии опасных гидрометеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения. РД 52.04.563-2002. М.: Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. 2003. 30 с.
  11. Материалы для ежегодного государственного доклада о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера по Челябинской области за 2008-2012 годы. Челябинск: ГУ МЧС России по Челябинской области, 2009-2013.
  12. Мониторинг безопасности, оценка риска и прогнозирование чрезвычайных ситуаций на территории Свердловской области // Информационный бюллетень. Вып. 6. Екатеринбург, 2013. 28 с.
  13. Никипелов Б.В., Романов Г.Н., Булдаков Л.А. и др. Радиационная авария на Южном Урале в 1957 г. // Атомная энергия. Т. 67, вып. 2, 1989, с. 74-80.
  14. Особо охраняемые природные территории Курганской области: справочник (под ред. И.Н. Некрасова). Курган, 2014. 188 с.
  15. Последствия техногенного радиационного воздействия и проблемы реабилитации Уральского региона. М.: МЧС РФ, 2002. 204 с.
  16. Природные ресурсы и охрана окружающей среды Курганской области в 2011 году. Доклад. Курган. 2012. 224 с.
  17. Прогноз природных и техногенных чрезвычайных ситуаций на территории Курганской области на 2010 год. Курган: Управление реабилитации территорий и защиты населения Курганской области. 2009. 17 с.
  18. Разумов В.В., Разумова Н.В. Подверженность территории Уральского федерального округа России опасным природным процессам // Геориск. № 3, 2009, с. 49-53.
  19. Тетерин А.Ф. Эколого-климатические особенности территории Восточно-Уральского радиоактивного загрязнения: Автореф. дис. ... на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. Санкт-Петербург. 2000. 22 с.

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ, № 4, 2016

УДК 911.3:312

Щитова Н.А. [Shchitova N.A.],  
Соловьев И.А. [Soloviev I.A.],  
Белозеров В.С. [Belozеров V.S.]**ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ  
ИНОСТРАННЫХ ТРУДОВЫХ МИГРАНТОВ  
(на примере Ставропольского края)\*****Problems of adaptation of foreign migrant workers  
(an example of Stavropol territory)**

В исследовании, основанном на научной литературе, рассматриваются основные подходы к определению дефиниции «иностранцы трудовые мигранты». В работе на материалах социологического опроса и интервьюирования иностранных мигрантов выявлены основные проблемы адаптации и интеграции иностранных трудовых мигрантов в регионе «нового освоения» (на примере Ставропольского края), а также составлен среднестатистический портрет иностранного трудового мигранта в Ставропольском крае. В исследовании приводится анализ (на материалах официальной статистики) региональных особенностей иностранной трудовой миграции в России. В результатах исследования представлены основные рекомендации по оптимизации интеграционной политики по отношению к иностранным трудовым мигрантам.

The study reviews the basic approaches for defining the term of « migrant workers». The research has revealed, based on sociological surveys and migrant workers interview, the main adaptation and integration problems of migrant workers in a new region and gives an average migrant worker's profile (in the case of Stavropol region). The authors perform an analysis of foreign labor migration regional aspects. The results of the study present the general recommendations for migration worker's policy adjustment.

**Ключевые слова:** региональные аспекты, иностранная трудовая миграция населения, Ставропольский край, проблемы адаптации и интеграции мигрантов.

**Key words:** migrant workers, regional aspects, foreign labor migration, the Stavropol Territory, migrant worker adjustment.

**Постановка проблемы**

Приток иностранных мигрантов в Россию начался сравнительно недавно – после распада СССР. Большинство иностранных мигрантов – граждане бывших союзных республик, ныне – самостоятельных государств. Негативные тренды в социально-экономическом развитии вынуждают население этих государств искать возможности решить свои материальные проблемы за рубежом. Миграционная привлекательность России для жителей стран СНГ обусловлена целым рядом известных причин и, по мере повышения уровня жизни в российских регионах, будет возрастать. Массовая трудовая миграция – новая экономическая реальность для

\* Статья подготовлена при государственной поддержке ведущих научных школ по гранту Президента Российской Федерации в рамках научно-исследовательского проекта «Иностранцы мигранты в России: стратегии и практики интеграции и адаптации в региональные сообщества» (проект № НШ-9300.2016.6).

всего постсоветского пространства. Кроме факторов, связанных с вытеснением мигрантов из страны проживания, постепенно все острее ощущается дефицит собственных трудовых ресурсов и нарастает потребность в иностранной рабочей силе в принимающих странах. Аргументация многих политических деятелей и специалистов в области демографической политики по поводу необходимости привлечения иностранных трудовых мигрантов в Россию звучит все более убедительно. Однако, достаточно активны и противники иностранной миграции. Зачастую дискуссия принимает острые формы не по вопросам актуальности трудовой миграции, а в связи с неопределенностью самого понятия «иностранцы трудовые мигранты».

Несмотря на кажущуюся очевидность, содержание понятия «иностранная трудовая миграция» не вполне однозначно. Предлагаются различные его определения. Так, в Международной конвенции о защите прав всех трудящихся-мигрантов под иностранным мигрантом понимается «лицо, которое будет заниматься, занимается или занималось оплачиваемой деятельностью в государстве, гражданином которой он не является» [1]. В данном определении не оговариваются временные рамки нахождения на территории другого государства – то ли это длительная миграция с надеждой на постоянное место жительства, то ли – временное пребывание с целью получения заработка по договору с работодателями или иными государственными структурами, то ли ежедневное пересечение границы в приграничных районах. Могут ли относиться к данной категории нелегальные мигранты? Некоторые разночтения снимаются в определении, данном С.В. Рязанцевым. Иностранная трудовая миграция – это «...временные перемещения населения с целью работы в другом регионе или стране с периодическим возвращением к обычному или постоянному месту жительства независимо от способа или легитимности пересечения границы и трудоустройства, времени и периодичности работы, то есть без окончательного переселения в регион или страну трудоустройства» [2]. Безусловно, любая категоричность в определениях не позволяет охватить весь спектр мотиваций мигрантов. В ряде случаев возможны переходы мигрантов из одной категории в другие, однако последнее определение позволяет все же разделить иностранный миграционный поток на две большие группы – иммигрантов и временных трудовых мигрантов. Временное пребывание трудовых мигрантов в стране прибытия не предусматривает их глубокой интеграции с местными сообществами. Однако, необходимость построения комфортной модели их взаимодействия достаточно очевидна, что невозможно без успешной адаптации мигрантов к новым условиям.

Накоплен достаточно большой отечественный опыт исследования процессов международной миграции. Большое внимание уделяется российской миграционной проблематике в работах И. Ивахнюк [3], Г. Витковской [4], М. Денисенко [5], Е. Красинца [6], Л. Рыбаковского [7], А. Топилина [8], Т. Юдиной [9]. Интересные результаты, связанные с трудовой миграцией, представлены в исследованиях Е. Тюрюкановой [11], С. Рязанцева [2]. Однако, проблемы адаптации иностранных трудовых мигрантов, особенно в региональном разрезе, изучены все еще недостаточно.

Табл. 1. ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ ИНОСТРАННЫХ ТРУДОВЫХ МИГРАНТОВ В СТАВРОПОЛЬСКОМ КРАЕ

2000 г.	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
1205	2390	3364	5908	8984	7225	5697

Источник: [12]

Вместе с тем, распространение дискомфортных практик взаимодействия, развитие различных форм дискриминации мигрантов, способствующие их социальной исключенности, могут создавать реальные стабильности общественных региональных систем.

Иностранная трудовая миграция в России развивалась в соответствии с центро-периферийной моделью. Первоначально основными центрами притяжения иностранных трудовых мигрантов выступали главные столичные агломерации – Московская и Санкт-Петербургская, крупные регионы ресурсной ориентации (Республики Коми, Якутия, Ханты-Мансийский АО и др.), затем стали осваиваться и другие, примыкающие к основным центрам территории. Южные периферийные регионы, по мере улучшения социально-экономической ситуации, становятся еще одной зоной активного привлечения иностранных мигрантов (табл. 1), чему способствовали такие факторы, как полиэтничность и наличие сложившихся еще в советское время достаточно крупных этнических диаспор (армянской, азербайджанской и др.).

Цель данного исследования – выявить на примере Ставропольского края основные проблемы адаптации трудовых иностранных мигрантов в регионах «нового освоения».

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Основными источниками информации послужили официальные статистические данные и материалы социологических опросов, проводимых совместными усилиями авторов и органами УФМС по Ставропольскому краю. Массовый социологический опрос иностранных трудовых мигрантов на Ставрополье был проведен в 2012 г., выборка составила 776 чел. При проведении исследования учитывалась география концентрации трудовых мигрантов в регионе. Основными ареалами их расселения выступили территории Ставропольской и Кавминводской городских агломераций. В этой связи большая часть респондентов было опрошены в вышеуказанных территориях, менее массово анкетирование проводилось в других городах и районах края. Таким образом, структура выборочной совокупности отражала географические особенности генеральной совокупности исследования, поэтому тип выборки можно определить, как квотно-пропорциональный.

Среди иностранных трудовых мигрантов в Ставропольском крае преобладают граждане бывших республик СССР. Первые места по численности занимают жители Узбекистана, Армении, Азербайджана и Таджикистана. Доминируют лица мужского пола в возрасте 23–40 лет со средним (часто профессиональным) образованием. Около 70 % мигрантов имеют семью, которая живет на родине. Многие приезжают не в первый раз. Кроме Ставропольского края трудоустраиваются мигранты и в других регионах Юга России.

### Обсуждение результатов

Основной причиной трудовых миграций является возможность заработать. Многие мигранты приезжают не вследствие индивидуального выбора, а по решению семьи, рода, большая часть мигрантов заняты в строительстве, в сельском хозяйстве и обрабатывающей промышленности. В связи с тем, что наиболее востребованы работники в сфере низкоквалифицированного труда, многие мигранты вынуждены менять свою специализацию и осваивать более актуальные и высокооплачиваемые, хотя и менее престижные профессии. Так, медбрат работает теперь грузчиком, швея, продавец, медсестра – сельхозработчицами, электромонтёр – кровельщиком, экономист и тракторист – строителями, автотехник – сварщиком и т.д. Основным способом поиска работы и места миграции – сетевые этнические структуры, которые обеспечивают подбор, переезд и прибытие (часто многократное) необходимых кадров. Организуются прямые транспортные перевозки мигрантов, например, непосредственно из Узбекистана в Ставропольский край. Пути легализации – оформление патента или разрешения на работу. Как правило, помощь в оформлении документов и аренде жилья оказывают работодатели (месячная оплата за жилье составляет в среднем по краю около 1 тысячи рублей). Жилье предоставляется в виде общежития или съемной квартиры также общежитического типа с минимальным набором удобств. Проблему с питанием и другими бытовыми вопросами решают коллективно. Обычно формируется небольшая бригада в 5–10 чел. (члены которой часто объединены родственными связями). Неформальный лидер такого коллектива – как правило человек, приезжающий в Россию не в первый раз, неплохо владеющий русским языком, имеющий среднее специальное образование. Он и решает основные бытовые, коммуникационные и др. проблемы мигрантов, в том числе и взаимодействие с работодателем. Средний размер заработка оставляет 10–15 тысяч рублей в месяц при работе около 10 часов 6 дней в неделю. По желанию трудовой мигрант может взять отпуск (но пользуются этой возможностью редко). Заработанные деньги ежемесячно отправляются на родину. Траты на себя составляют от 2 до 5 тыс. руб. в месяц.

Свою экономическую адаптацию мигранты оценивают положительно (табл. 2), но к интеграции они не стремятся. Часто такие коллективы живут изолированно от местного сообщества, сводя взаимодействие с коренным населением до минимума. В целом трудовых мигрантов устраивает ситуация в Ставропольском крае, которую они признают достаточно благоприятной. Некоторые из них (но не более 10%), из числа тех, кто не имеет семьи, готовы остаться в России.

Ключевой проблемой, по мнению мигрантов, затрудняющей их пребывание в России, является плохое знание русского языка (табл. 3), осложняет их взаимодействие с работодателями и не позволяет самостоятельно правильно оформить необходимые документы. Особенно острой языковой проблемой для мигрантов моложе 35 лет.

Второе место по важности для мигрантов заняла проблема потре-

Табл. 2. ОЦЕНКА РЕСПОНДЕНТАМИ СВОЕГО МАТЕРИАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ, 2012 г.

Варианты ответов	Трудовые мигранты	
	чел.	%
Живем хорошо, без особых материальных проблем	37	11,97
Живём более или менее приемлемо	130	42,07
Живем очень скромно	130	42,07
Живем за гранью бедности	12	3,88

Табл. 3. ВЛАДЕНИЕ РУССКИМ ЯЗЫКОМ, 2012 г.

Варианты ответов	Трудовые мигранты	
	число респондентов	%
Русский язык – мой родной	29	9,03
Владею свободно (говорю, пишу, читаю)	71	22,12
Говорю свободно, пишу и читаю плохо	96	29,91
Говорю плохо, читать и писать не умею	112	34,89
Не владею русским языком	13	4,05

бительского к ним отношения со стороны работодателя. Работодатели в своем большинстве не обеспечивают мигрантов медицинской страховкой, а они, в свою очередь, избегают обращений в медучреждения на платной основе по причине экономии средств. Нередки случаи обмана со стороны работодателя, в т. ч. связанные с оплатой труда.

Установление доверительных отношений – главный фактор предупреждения возможных противостояний между местным населением и трудовыми мигрантами. Формирование положительного образа трудового мигранта – процесс достаточно сложный, требующий взаимных усилий со стороны мигрантского и местного сообществ. В этой связи важно формировать у мигрантов стремление знать и принимать ценности местного сообщества, соответствовать ожиданиям и требованиям к ним со стороны принимающей среды. Вместе с тем, исследование демонстрирует неготовность обеих сторон к этому процессу. Мигранты имеют очень поверхностные и фрагментарные знания о культуре и традициях принимающей стороны (табл. 4). В региональном сообществе присутствуют проявления ксенофобий и мигрантофобий. По оценкам респондентов, уровень мигрантофобии со стороны принимающего общества, достаточно высок. Так, на пренебрежительное отношение со стороны обычных граждан указало 17,3% опрошенных трудовых мигрантов, на проявления открытого национализма и мигрантофобии – 8,5%, произвол и угрозы со стороны полиции – 6,76%. Особенно часто случаи мигрантофобии отмечаются в сельской местности [13, с. 256].

Табл. 4. ЗНАНИЕ РОССИЙСКОЙ КУЛЬТУРЫ И ОБЫЧАЕВ

Варианты ответов	Трудовые мигранты	
	чел.	%
Обычаи, традиции	81	25,23
Литература и искусство	34	10,59
История	43	13,4
Религиозные ценности	24	7,48
Этикет, поведение в обществе	43	13,4
Знаком со всем поверхностно	105	32,71
Не знаком ни с чем	94	29,28

Низкий уровень стремления к интеграции трудовых мигрантов объясняется временным характером их пребывания в России. Вместе с тем, многие из них, рассматривают варианты длительного или даже постоянного проживания. Но основными условиями переселения выступают почти исключительно экономические показатели. В приоритете: стабильный доход, наличие собственного жилья и получение необходимых документов) (табл. 5). Размышляя о своих планах на будущее, опрошенные расходятся в оценках. 31 % респондентов будут смотреть на обстоятельства, 25 % собираются покинуть Россию уже в этом году, 17 % проработают не более 3 лет, а 11 % вообще затрудняются при ответе на данный вопрос.

Однозначно, возможности для адаптации трудовых мигрантов шире в местах с более благополучной социально-экономической ситуацией. В Ставропольском крае – это города и прилегающие к ним сельские районы западной и южной частей края (Ставрополь, Михайловск, Невинномысск, города Кавказских Минеральных Вод). Остальные территории края менее привлекательны для мигрантов, поскольку их уровень социально-экономического развития заметно ниже.

### Выводы

1. Трудовая миграция в Ставропольский край из стран ближнего зарубежья имеет ярко выраженный этнический характер. Основными странами, поставляющими мигрантов являются государства Южного Кавказа и Центральной Азии.
2. Гастарбайтеры, ориентированные исключительно на заработок, нуждаются хотя бы в элементарном знании языка, традиций, культуры и норм поведения принимающего социума.
3. В настоящее время формируются различные институты, призванные регулировать потоки трудовых мигрантов, но институтов, регулирующих процессы адаптации практически нет. В мигрантских сообществах наблюдается проявление процессов самоорганизации и формирование самостоятельных регулирующих структур, что не способствует упорядочению миграционных процессов и успешности адаптации.

Табл. 5. КРИТЕРИИ ВОЗМОЖНОЙ ИММИГРАЦИИ В РОССИЮ, 2012 Г.

Варианты ответов	Чел.	%
Наличие собственного жилья	135	43,41
Хорошая зарплата	1	0,32
Много детей	1	0,32
Наличие автомобиля	44	14,15
Наличие постоянного дохода	204	65,59
Нормальные взаимоотношения с окружающими	57	18,33
Получение необходимых документов	103	33,12
Доброжелательное отношение со стороны государства	52	16,72
Бесплатное образование и медицина	34	10,93
Хорошая работа	1	0,32
Не собираюсь оставаться	1	0,32

4. Успешность адаптационно-интеграционных процессов требует определённых усилий со стороны принимающего сообщества. Необходимо обеспечивать равные социальные условия и требования для приезжих рабочих, не допускать проявления ксенофобий или мигрантофобий. Вместе с тем, как показало наше исследование, принимающий социум в крае не вполне готов для позитивного взаимодействия с миграционным сообществом. Было бы заблуждением считать, что в знаниях традиций, обычаев, культуры другой стороны нуждаются лишь мигранты. Принимающему населению также необходимы элементарные знания о традициях, особенностях поведения и социальных коммуникаций иностранных мигрантов. Просвещение принимающего населения – задача масс-медиа и масс-культуры, сферы публичной политики.
5. Проведенное исследование позволяет нарисовать портрет средне-статистического иностранного трудового мигранта в Ставропольском крае.

### Портрет иностранного трудового мигранта (по данным социологических опросов)

Мужчина в возрасте 30–39 лет, имеет среднее образование, женат, но его семья и дети живут на родине. Приехал в Россию из Узбекистана. Впервые он прибыл в РФ год назад, с того момента был ещё пару раз. Никаких проблем при пересечении границы у него не бывает. Кроме Ставрополя, трудоустроивался также в других регионах Юга России, работая строителем. В строительной сфере был занят и у себя на родине. Работу нашёл через родственников и знакомых, получил на неё разрешение (патент), не испытыв при этом каких-либо проблем, в чём ему помог работодатель. Работодатель же обеспечивает жильём (на которое в месяц приходится тратить менее 1 тысячи рублей), питанием и рабочими инструментами. Зарабатывает 10–15 тысяч рублей в месяц, работая 6–10 часов 6 дней в неделю. По желанию может взять отпуск, домой ездит раз в год. В остальное время ежемесячно отправляет семье деньги. Работа в России не отразилась на здоровье. Частой проблемой явился обман со стороны работодателя.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Международная конвенция о защите прав всех трудящихся-мигрантов и членов их семей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.un.org/russian/documen/convents/migrant.htm>.
2. Рязанцев С.В. Трудовая миграция в странах СНГ и Балтии: тенденции, последствия, регулирование / С. В. Рязанцев. М.: Формула права, 2007. 576 с.
3. Ивахнюк И.В. Интеграция мигрантов в России: оценка новых законодательных инициатив // Миграционные процессы: проблемы адаптации и интеграции мигрантов: сборник материалов Международной научно-практической конференции / под ред. проф. В.С. Белозерова. Ставрополь, 2014. С. 118–122.
4. Витковская Г.С. Миграционные вызовы ближайшего десятилетия // Россия: ближайшее десятилетие. // Сборник статей к десятилетию Московского Центра Карнеги / под ред. Э. Качинса и Д. Тренина. М., 2004, С. 83–90.
5. Денисенко М., Чудиновских О. Миграции между странами СНГ // Демоскоп, 2012. № 533–534 [Электронный ресурс] – [http://www.demoscope.ru/weekly/2012/0533/analit04.php#\\_FN\\_2](http://www.demoscope.ru/weekly/2012/0533/analit04.php#_FN_2).
6. Красинец Е. С. Международная миграция населения в России в условиях перехода к рынку / РАН. Ин-т соц.-экон. пробл. народонаселения. М.: Наука, 1997. С. 188–190.
7. Рыбаковский Л.Л. О современной концепции миграционной политики России // Миграционные процессы: проблемы адаптации и интеграции мигрантов: сборник материалов Международной научно-практической конференции / под ред. проф. В.С. Белозерова. Ставрополь, 2015. С. 112–114.
8. Топилин, А.В. Миграционные процессы и рынок труда в России // Наука. Инновации. Технологии, 2015. №2 С. 140–153.
9. Юдина Т.Н. Мигранты из стран Закавказья в Москве: установки на адаптацию и интеграцию // Миграционные процессы: проблемы адаптации и интеграции мигрантов: сборник материалов Международной научно-практической конференции / под ред. проф. В.С. Белозерова. Ставрополь, 2015. С. 266–270.
10. Рязанцев С.В. The lingual integration of migrants in Russia: declaration sandrealities // Миграционные процессы: проблемы адаптации и интеграции мигрантов: сборник материалов Международной научно-практической конференции / под ред. проф. В.С. Белозерова. Ставрополь, 2014. С. 243–246.
11. Тюрюканова Е.В. Трудовая миграция в России // Отечественные записки, 2004. №4. [Электронный ресурс] – <http://www.strana-oz.ru/2004/4/trudovaya-migraciya-v-rossii>.
12. Численность иностранных граждан, осуществлявших трудовую деятельность в России (по данным ФМС) в 2000–2010 гг. [Электронный ресурс] – [http://www.gks.ru/bgd/regl/B13\\_14p/lssWWW.exe/Stg/d1/03-19.htm](http://www.gks.ru/bgd/regl/B13_14p/lssWWW.exe/Stg/d1/03-19.htm).
13. Соловьев И.А., Щитова Н.А., Белозеров В.С. Трансформации социально-экономической адаптации и интеграции мигрантов на Ставрополье в постсоветский период // Миграционные процессы: проблемы адаптации и интеграции мигрантов: сборник материалов Международной научно-практической конференции / под ред. проф. В.С. Белозерова. Ставрополь, 2015. С. 256.

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ, № 4, 2016

УДК 911.3

Щитова Н.А. [Shchitova N.A.],  
Чихичин В.В. [Chihichin V.V.]ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ  
АСПЕКТЫ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО  
ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ  
АДАПТАЦИИ И ИНТЕГРАЦИИ  
ИНОСТРАННЫХ МИГРАНТОВTheoretical and methodological aspects  
of geographical studies processes of adaptation  
and integration of foreign workers

В статье предпринята попытка теоретико-методологического осмысления процессов адаптации и интеграции иностранных мигрантов в России. Представленные теоретические положения опираются на анализ материалов отечественных исследований миграционных процессов последних лет, а также на собственный исследовательский опыт изучения процессов адаптации и интеграции разных групп мигрантов. Анализируется содержание и связь понятий социально-экономическая адаптация и этнокультурная интеграция, при этом акцентируется внимание на их принципиальных различиях. Выдвигается тезис о необходимости учета географических аспектов адаптации и интеграции мигрантов и предлагаются методологические подходы их географического анализа. Предложены три основные модели адаптации иностранных мигрантов – инертная, активная и девиантная, распространение которых зависит от этно-демографических и социокультурных характеристик миграционного и принимающего сообществ, уровня их этнической комплементарности, развитости правовой и институциональной региональной среды и т.п. Обозначена актуальность потребности в разработке понятия региональной адаптационно-интеграционной политики как обязательной части миграционной политики, в качестве информационного базиса которой предлагается использование полимасштабного геоинформационного мониторинга миграционных процессов, позволяющего отслеживать состояние и динамику адаптационно-интеграционных процессов на разных территориальных уровнях – от поселения до страны в русле проводимой миграционной политики Российской Федерации.

This item is a theoretical & methodological attempt of comprehending the process of foreign migrants' adjustment and integration in Russia. The theoretical statements put forth herein rely on analysis of the migration studies conducted in Russia in the recent years as well as on the authors' research experience gained through investigating adjustment and integration of various migrant groups. The article also dwells on the meaning and the correlation between terms like socio-economic adjustment and ethnic & cultural integration, with a special focus on the fundamental differences between the two. The idea put forward here implies that there is a need for taking into account geographic aspects of migrant adjustment and integration, and certain methodological approaches are proposed that might be used to carry out such geographic analysis. Three major models are proposed for adjustment of foreign migrants – inert, active, and deviant, while the prevalence of these depends ethnic & demographic and socio-cultural features pertaining to both the migrant and the hosting communities, the level of their ethnic complementary capacity, the progress in the legal and institutional regional environment, etc. There is also an indication of the need for developing the concept of the regional adjustment & integration policy as a mandatory part of the migration policy, whereas the informational basis of that could employ poly-scale geo-informational monitoring of migration that would allow following the current status and the dynamics of the adjustment & integration processes at various local levels – from communities to the entire country – given the migration policy currently pursued by the Russian Federation.

\* Статья подготовлена при государственной поддержке ведущих научных школ по гранту Президента Российской Федерации в рамках научно-исследовательского проекта «Иностранные мигранты в России: стратегии и практики интеграции и адаптации в региональные сообщества» (проект № НШ-9300.2016.6).

**Ключевые слова:** иностранные мигранты, социально-экономическая адаптация мигрантов, этнокультурная интеграция мигрантов, принципы географического исследования адаптации и интеграции мигрантов, поведение мигрантов, модели адаптации и интеграции мигрантов, геоинформационный мониторинг адаптационно-интеграционных процессов, адаптационно-интеграционная политика.

**Key words:** migrants, foreign migrants, social and economic adaptation, ethnocultural integration, geographical research methodology, migrant's behavior migrant adjustment and integration models, adjustment and integration processes, GIS monitoring, migrants adjustment and integration policies.

*Прежде чем пытаться реформировать общество, надо его изучить.*

*А. Радклифф-Браун*

## Введение

Миграция – один из главных вызовов современной мировой повестки дня. Рост миграционных потоков обостряет проблемы культурной и поведенческой совместимости новоселов с местным населением, что особенно актуально в случаях этнических миграций. Миграционные процессы становятся неотъемлемой составной частью и российской повседневной жизни, они достаточно ощутимо на нее влияют. Более того, по всем имеющимся экспертным прогнозам, объемы внешней миграции в российские регионы будут только возрастать, усиливая этнокультурную гетерогенизацию демографической структуры населения и обостряя связанные с этим проблемы.

**Постановка проблемы и методология исследования.** В различных исследованиях последних десятилетий миграционные процессы изучаются достаточно интенсивно как в России, так и за рубежом, однако решения проблемы продуктивного взаимодействия мигрантов и принимающего населения, пока не найдено. Особую актуальность эти вопросы приобретают в связи с развитием иностранных миграций. Модели поведения мигрантов в инокультурной среде разнообразны, часто не привычны и далеко не всегда соответствуют социальным нормам, которые приняты в принимающем обществе. Отклонения в поведении мигрантов зачастую провоцируются перспективой или угрозой потери национальной идентичности, а принимающее сообщество, в свою очередь, стремится закрыться от «пришельцев» и защитить себя от каких-либо трансформаций. Вместе с тем необходимость поиска взаимоприемлемых механизмов адаптации и интеграции иностранных мигрантов становится все более очевидной, особенно в свете мировых тенденций развития глобализационных процессов. Выработка практических рекомендаций по совершенствованию адаптационно-интеграционных процессов невозможна без теоретического осмысления и формирования методологической основы выбора оптимальной стратегии управления ими.

Данное исследование направлено на осмысление концептуальных подходов к анализу процессов адаптации и интеграции иностранных миг-

рантов. Заявленная проблематика вызывает постоянный интерес у представителей многих гуманитарных наук. Большое число текущих исследований миграциологов [6, 8, 9, 14] связано с анализом содержания понятия «интеграция мигрантов», его соотношению с такими категориями, как «ассимиляция» и «адаптация», рассмотрением социокультурных барьеров интеграции, учетом интеграционных процессов при разработке государственной миграционной политики.

Одна из самых востребованных тем – адаптация мигрантов на российском рынке труда. В частности, выявлено, что при трудоустройстве мигрантов слабо востребованы их профессиональные умения и навыки, не учитывается уровень образования, а спрос на труд мигрантов смещается в сторону всё более простой, не требующей квалификации работы [4]. Понимание трудовой миграции расширяется до экономической, а экономические мигранты условно делятся на «гастарбайтеров», предпринимателей-мигрантов и иностранных студентов [7]. Этой проблеме посвящен несколько заметных ежегодных российских научно-практических конференций, например, «Роль трудовой миграции в социально-экономическом и демографическом развитии посылающих и принимающих стран» в рамках проекта «Миграционные мосты в Евразии». В материалах 2015 года [13] опубликованы результаты исследований, связанных с регулированием трудовой миграции и оценкой вклада иностранных экономических мигрантов в российскую экономику, анализом процессов интеграции мигрантов в принимающее общество в контексте национальной безопасности России.

В ряде комплексных исследований, анализирующих последствия иностранной трудовой миграции [например, 21], рассматривается динамика поступления и трансформация структуры иностранной рабочей силы, обозначены страны – поставщики трудовых мигрантов в Россию, дан социально-демографический портрет современного иностранного работника в России. Определено, что с трудовой миграцией связаны новые вызовы и различные социально-политические риски, к которым, в первую очередь, следует отнести проблемы адаптации и интеграции мигрантов.

В данной статье особое внимание уделяется географическим аспектам изучения процессов адаптации и интеграции иностранных мигрантов. На наш взгляд, выявление пространственных аспектов адаптации и интеграции мигрантов, установление территориальных различий в этих процессах, весьма существенно и может быть полезно при планировании и осуществлении региональной миграционной политики. Анализ опыта географических исследований миграций демонстрирует их эффективность в случаях выявления региональных особенностей этнических миграций [17]. Географический анализ направлен на изучение моделей поведения, формирующихся в конкретных территориальных миграционных сообществах, объединяющих представителей разных национальностей, родившихся не в России и приехавших сюда по различным причинам. Таким образом, предмет географического исследования – территориальные аспекты адаптации и интеграции мигрантов. С нашей точки зрения, инос-

трантные мигранты в России представлены двумя группами - временные трудовые мигранты и иммигранты, прибывшие на постоянное место жительства. При этом следует согласиться с мнением В.А. Ионцева, о том, что не стоит смешивать понятия «адаптация» и «интеграция», и что интеграция для временных трудовых мигрантов не актуальна [8].

Представленные в статье теоретические концепты опираются на опубликованные материалы географического изучения процессов адаптации и интеграции мигрантов последних лет, а также на данные, полученные в результате собственных многолетних (с начала 1990-х гг. по настоящее время) конкретных социолого-географических исследований, проводимых сотрудниками научно-исследовательской лаборатории народонаселения и ГИС-технологий Северо-Кавказского федерального университета с участием авторов.

#### **Обсуждение результатов исследования.**

**Основные понятия и принципы географического исследования процессов адаптации и интеграции мигрантов.** Однозначного толкования категорий «адаптация» и «интеграция» в контексте миграций населения пока не выработано. Иногда эти термины употребляют как синонимы, иногда в них вкладывают некий антагонистический смысл. Кроме того, в научном дискурсе фигурируют еще и такие термины, как «приживаемость» и «ассимиляция». Предлагается, например, считать, что адаптация, приживаемость и ассимиляция означают различную степень вхождения отдельных групп мигрантов в социум принимающих территорий. Условно, интеграция может быть разделена на полную интеграцию, базирующуюся на ассимиляции мигрантов и частичную интеграцию, включающую в себя процессы адаптации и приживаемости [8]. На наш взгляд, понятия «адаптация мигрантов» и «интеграция мигрантов» тесно связаны между собой, описывая, по сути, один процесс, имеют общую родовую основу. В качестве такой основы могут выступать, например, понятия «вхождение», «включение», «инкорпорация». При этом мы предлагаем различать содержание понятия «социально-экономическая адаптация» и «этнокультурная интеграция».

*Социально-экономическая адаптация* – процесс взаимодействия мигрантов с новой социально-экономической средой, в ходе которого, с одной стороны, происходит отбор наиболее адекватных, с точки зрения мигрантов, моделей поведения, обеспечивающих успешность их жизненных стратегий, с другой – под их влиянием происходит трансформация региональных социально-экономических систем, появления в ней новых элементов. Мы считаем, что адаптация связана, в первую очередь, с реализацией потребностей и интересов, направленных на экономическое выживание людей. Мигрант может приспособиться к жизни в новых условиях, решить проблемы, связанные с материальным благосостоянием, но при этом пребывать в условиях социальной исключенности, сохранять прежние ценности и правила поведения.

*Этнокультурная интеграция* – процесс объединения иммигрантов с местным населением в единое целостное региональное сообщество с

общими региональными интересами. Это такое взаимодействие различных групп, при котором, с одной стороны, снимается излишняя акцентуация этнической принадлежности, а с другой – обеспечивается культурная сохранность этнических групп. Предполагается культурный обмен между общностями с сохранением и развитием особенностей взаимодействующих культур. Процессы интеграции предполагают взаимное движение навстречу друг другу мигрантов и местных жителей. Условия социокультурной интеграции со стороны мигрантов включают хорошее овладение языком принимающей стороны, стремление знать и принимать ценности местного сообщества, соответствовать ожиданиям и требованиям к ним, как к членам данной территориальной общности, устанавливать контакты с представителями других этнокультурных групп.

В свою очередь, в принимающем социуме необходимо формировать институты, ориентированные на социализацию мигрантов, их интеграцию в региональные сообщества; создавать равные, как и для местного населения, социальные условия и требования; блокировать проявления ксенофобий или мигрантофобий; формировать интеркультурные компетенции в социуме. Одновременно, необходимо понимать, что достижение интеграции – процесс длительный и не саморегулируемый. Необходима политическая воля, разработка стратегических положений и программ тактического управления с учетом региональной специфики. Следует также отметить, что в настоящее время институты адаптации мигрантов, а именно организации, занимающиеся приемом мигрантов, а также решением их проблем, являются исключением и существуют в единичных регионах. Однако в будущем такие институты должны развиваться для обеспечения лучших условий жизни, как мигрантов, так и местного сообщества.

Накопленный междисциплинарный опыт, связанный с поиском решения проблемы адаптации и интеграции мигрантов [3, 10, 11, 15, 16, 17], а также собственные исследования [1, 2, 18, 22], позволяют обосновать некоторые методологические принципы их изучения. Эти принципы основаны на географических исследовательских подходах и согласуются с классическим пониманием географического мышления, основанного на комплексности, территориальности, конкретности и глобальности [12].

*1. Принцип сочетания разных методов исследования.* Совместное использование социологических и статистических, количественных и качественных методов позволяет максимально комплексно проанализировать процессы, прямо или косвенно связанные с адаптацией и интеграцией мигрантов. Источниками информации при этом служат как объективные, статистические данные, материалы всевозможных докладов и отчетов, так и субъективные данные, полученные в ходе социологических исследований. При этом количественные социологические методы дополняются качественными исследованиями (анализ мигрантских историй, проведение фокус-групп, опросы экспертов, в качестве которых могут выступать представители властных структур, главы диаспор, крупные предприниматели, работники ФМС, служб занятос-

ти и т.д.). Возможно проведение исследований методом погружения в среду (включенного наблюдения). Опросы применяются с целью уточнения структуры миграционного сообщества, механизмов адаптации, оценки взаимоотношения в системе мигрант – местный житель или община/диаспора – окружающая среда/регион и т.д. При этом важно правильно выбрать ключевые территории. Это могут быть приграничные, полиэтничные районы, территории, через которые проходит значительный транзитный поток мигрантов, а также территории, расположенные на «входе» большое число мигрантов.

2. *Принцип учета факторов и условий протекания адаптационно-интеграционных процессов.* Ключевыми факторами адаптации и интеграции мигрантов выступают:

- структура миграционного потока (этнодемографические, профессионально-образовательные параметры, конфессионально-культурные представления, владение русским языком, и др.);
- география районов выхода мигрантов и их особенности (типы поселений, социально-экономические, политические, институциональные характеристики и др.);
- особенности мест вселения: (тип и величина населенного пункта, социально-экономическая ситуация, развитость институциональной среды, сложившиеся стратегии экономического поведения принимающего населения, культурные обычаи, опыт приема мигрантов и др.);
- мотивы и временные параметры миграции;
- возможности и перспективы социально-экономической мобильности.

3. *Принцип учета демографических процессов и демографического поведения на территории вселения* позволяет установить уровень потребностей в привлечении мигрантов, внутрирегиональные различия в качестве и количестве трудового ресурсного потенциала, миграционные настроения местного населения и др.

4. *Принцип учета этнической специфики миграционных процессов.* В подавляющем большинстве случаев иностранные мигранты – это этнические мигранты, отчего они еще больше становятся объектом пристального внимания со стороны местного населения. В этой связи показательны исследования, в которых предпринимается попытка анализа процесса адаптации через изучение сетевых структур, которые образуют разные этнические группы. Построение схем, отражающих структуру межэтнических связей и отношений позволяет выявить основных агентов коммуникации внутри сообществ, установить траектории формирования информационных цепочек, понять механизмы самоорганизации мигрантских этнических сообществ. Исследования показывают, что в зависимости от этнической принадлежности, стратегии, скорость и качество адаптационно-интеграционных процессов заметно различаются в разных этнических

группах складываются специфические сценарии адаптации [11]. Важным условием успешности адаптации выступает наличие консолидированной, интегрированной в принимающий социум этнической диаспоры, которая выступает в качестве своеобразного проводника, выполняющего не только функции поддержки, но и социального контроля и коррекции поведения вновь прибывших лиц [9].

5. *Принцип учета пространственной дифференциации социально-экономического развития территории вселения* обуславливает необходимость анализа влияния разных типов территории (сельская или городская местность, размер населенного пункта, центр или периферия, депрессивные, отсталые или экономически развитые территории и др.) на процесс адаптации отдельных групп мигрантов. Наиболее крупными центрами притяжения мигрантов в России являются города-миллионеры, которые и выступают в общественном мнении главной ареной этнических, социальных и миграционных конфликтов.

Иностранная рабочая сила распределяется по территории Российской Федерации крайне неравномерно. Очевидно, что мигранты (особенно трудовые) выбирают регионы опережающего экономического развития с дефицитом рабочей силы и более высоких заработков [21].

Основная масса иностранных мигрантов, по крайней мере, трудовых, предпочитают оседать в городах. На примере Германии выявлено, что такая пространственная концентрация в некоторых случаях приводит к возникновению так называемых «параллельных обществ» со своими системами норм и ценностей. Пространственное сосредоточение мигрантов в крупных городах является нередко одновременно следствием и одной из причин ряда социальных городских болезней:

– социально-экономической поляризации, выражающейся в росте спроса на высоко- и низкоквалифицированных работников в сфере услуг. И в то время как доходы первых растут, зарплаты вторых не хватает для обеспечения даже среднего уровня жизни. В качестве последствий для города выступают усиление структурной безработицы, возникновение социальных конфликтов;

– комплексной социальной пространственной деградации, когда на ограниченной кварталом или городским районом территории воспроизводится клубок социальных, экономических, психологических, экологических и др. проблем; возникает «круг бедности», в который попадают дети безработных, родителей-одиночек, иностранцев, бедных, выросших в относительно замкнутой социальной среде с плохими школами, малым числом досуговых заведений, высоким уровнем социальной напряженности и преступности [10].

Для оценки социального расслоения может быть использован целый ряд индикаторов, фактически описывающих профиль бедности городских районов (по социально-демографическим группам горожан, которые имеют наибольшую вероятность попасть в категорию бедных): прямые индикаторы социального неравенства (доходы, занятость); косвенные

индикаторы (средний размер семьи, уровень демографической нагрузки); цены на недвижимость (определяют престижность района, качество жизни в нем, косвенно свидетельствуют и об уровне доходов проживающего в нем населения); стоимость аренды жилья (отражает уровень востребованности района населением и его группами); доля мигрантов в общей численности населения (индикатор культурно-этнических и общесоциальных различий, так как традиционно мигранты труднее адаптируются, у них обычно выше демографическая нагрузка, вероятность попасть в категорию бедных, чаще отсутствует собственное жилье). Для отражения реальной картины дифференциации указанных параметров следует учесть полиаспектный характер расслоения в обществе, особенности разных методов его измерения [3]. Ряд исследований процессов адаптации и интеграции мигрантов в мировых центрах Европы показали, что важнейшую проблему в них на фоне низкой рождаемости, сокращения среднего размера семей, увеличения числа домохозяйств, уровня образования и притязаний собственного населения везде представляет приток мигрантов, вызванный спросом на рабочую силу, особенно низкой квалификации. Миграционную притягательность этих городов в целом трудно регулировать. По тем же причинам не менее трудно добиться быстрой адаптации мигрантов к городским экономическим и социокультурным условиям [3].

*б. Принцип учета региональных особенностей при формировании стратегий и моделей адаптации и интеграции иностранных мигрантов.* В данном контексте под моделью понимается совокупность наиболее распространенных элементов социально-экономического и социокультурного поведения мигрантов в региональном принимающем сообществе. Реализация данного принципа предполагает опору на все предыдущие методологические подходы.

*Модели адаптации и интеграции мигрантов.* По мнению М.С. Савоскул, возможны три модели адаптации мигрантов: изоляция, интеграция и переходная форма – трансграничная. Первая модель подразумевает изоляцию от принимающего социума и образование мигрантами закрытых сообществ, когда социальные связи с принимающей стороной сведены к минимуму и чаще всего происходят через посредников. Этой модели поведения в основном придерживаются трудовые мигранты, зачастую не владеющие распространенными в данной стране языками. Трансграничная модель предполагает активное сохранение социальных связей со страной исхода, но при этом мигранты вполне успешно интегрированы в принимающее общество. Эта модель достаточно широко распространена среди выходцев из стран постсоветского пространства. Многие мигранты нацелены на интеграцию в российское общество, но при этом часть семьи проживает в стране выхода, поэтому они оказываются гражданами двух стран; часть мигрантов формируют деловые и экономические связи со страной выхода, но с ориентацией на постоянное проживание в России. Для других мигрантов это может быть только этапом интеграции, т.е. в данный момент по разным причинам они вовлечены в социальные и эко-

номические связи со страной выхода, но уже готовы к сокращению этих связей и т.д. [16].

На примере Оренбургской области выявлены три внутрирегиональные модели адаптации трудовых мигрантов: крупногородская, городская и сельская. Крупногородская модель адаптации характеризуется обособленностью и развитостью связей с местной диаспорой. Городская модель распространена в больших городах приграничной зоны. В них этнические трудовые мигранты более «заметны» и часто оказывают большее влияние на социально-экономическое развитие. Роль диаспоры ослабевает. В сельской местности возможны, как минимум, две противоположные модели адаптации – либо максимальная изоляция (еще большая, чем в крупном городе), либо максимальная интеграция (большая, чем в относительно небольшом городе). В данном случае ключевую роль играет этнический фактор, которым определяются особенности занятости тех или иных групп мигрантов [11].

В соответствии с теорией действия, разрабатываемой в социальной географии немецким географом Б. Верленом [5], действия мигрантов определяют изменения в социально-экономическом развитии региона. Речь, в частности идет о появлении новых ее функций вследствие деятельности трудовых мигрантов. Применительно к мигрантам сторонники теории действия утверждают, что в ряде случаев институциональные государственные структуры утрачивают ведущую роль в процессе их интеграции, и главную роль в социальных и экономических отношениях между принимающей территорией и мигрантами начинают играть не политические и институциональные рамки принимающего общества, а сами мигранты, формирующие новые типы социального поведения [16].

Авторами данной статьи установлены три основные модели адаптации мигрантов – инертная, активная и девиантная, каждая из которых в свою очередь имеет различные модификации.

Инертная модель – формирование одного из распространенных для региона вселения типов образа жизни, копирование наиболее успешных типичных образцов поведения. Попав в новые условия, люди пытаются перенимать те поведенческие образцы, которые соответствуют наиболее успешным стратегиям, обеспечивают благополучные варианты жизнедеятельности. Этот путь более предпочтителен для местного населения, так как при этом не возникает или возникает в меньшей степени вероятность дискомфортных взаимоотношений. Вместе с тем данная модель не всегда обеспечивает успешное развитие событий для мигрантов и замедляет их адаптационную фазу.

Активная модель связана с внедрением в сложившуюся региональную систему жизнедеятельности новых, непривычных для данного сообщества способов и форм поведения. Часто переселенцы переносят на новую почву элементы образа жизни, уже выбранные ими в рамках прежнего опыта. В ряде случаев нестандартное, новационное поведение оказывается не только конкурентоспособным, но и более результативным. Такие процессы воспринимаются местным населением значительно болезнен-

нее. Непривычные и более успешные поведенческие модели зачастую вызывают раздражение, формируют негативное общественное мнение, провоцируют конфликтные ситуации. Особую остроту все это приобретает, если мигранты имеют иную этническую принадлежность. В этих случаях поведенческие стереотипы связываются с чертами национального характера и воспринимаются как чужеродные и негативные. Такая модель провоцирует развитие трайболистических тенденций, формирование изолированных миграционных коллективов, которые противопоставляются сложившимся старожильческим сообществам.

Девиантная модель адаптации связана с ослаблением жесткости социального контроля в новой среде, мигранты не всегда разборчивы в средствах, склонны к нелегальным способам заработка и вызывающему эпатажному поведению. Для данной модели характерны проявления гиперэтничности, распространение этнических мифологем и суррогатных этнических коммуникаций. Именно эти, наиболее болезненные для социального окружения формы поведения и являются причиной развития мигрантофобий и ксенофобий.

Интеграция в большинстве случаев понимается как процесс объединения разнородных компонентов в некую целостность. Интеграции мигрантов предполагает формирование «населенческой целостности», единой территориальной общности людей. Интеграционный потенциал разных миграционных групп населения неодинаков. Большую роль играют целевые установки мигрантов, готовность к социальным компромиссам, этническая комплементарность со старожильческими народами.

Достаточно приблизительно можно выделить три основные стадии интеграции иностранных мигрантов: предварительная интеграция (решение экономических проблем, освоение языка, норм бытового поведения, однако связи между «новым» и «старым» населением практически отсутствуют, напротив возможно сохранение связей с родными местами) симбиотическая интеграция (достаточно развитая языковая культура, частичное включение в региональный социально-экономический контекст, но при этом преобладание собственных интересов. На этой стадии достаточно явно превалируют этнокультурные связи, этническая поддержка, противопоставление своих общностей другим. Характерно отсутствие гражданства), настоящая интеграция (полноценные граждане, обладающие равными правами со старожилками, тесные связи со всеми этнокультурными группами, участие в политических, социальных и культурных проектах).

**Адаптационно-интеграционная политика.** Проведенные авторским коллективом исследования миграционной ситуации в регионах Северного Кавказа, образа жизни старожильческого населения и мигрантов, дают основания для выдвижения понятия региональной адаптационно-интеграционной политики как обязательной части миграционной политики. Под адаптационно-интеграционной политикой нами понимается организованная программно-целевая деятельность, включающая систему концептуальных положений и совокупность конкретных экономических,

демографических и социокультурных мер, способствующих активному включению мигрантов в региональное сообщество, препятствующие развитию негативных образов и репутаций мигрантов, направленных на повышение благосостояния и стабилизацию этнополитических отношений между народами, гарантирующих личную и этническую безопасность.

В качестве основных субъектов адаптационно-интеграционной политики могут выступать как органы государственной власти, так и общественные организации, этнические и конфессиональные ассоциации. Цель такой политики – планирование и реализация мероприятий, позволяющих регулировать местные адаптационно-интеграционные миграционные процессы в рамках общих принципов и законодательных актов, принятых на федеральном уровне. К основным принципам региональной адаптационно-интеграционной политики в полиэтничном регионе следует отнести: объективность, достоверность и научность; этническое и территориальное равноправие, соблюдение паритетов потребностей и интересов основных групп населения.

Грамотная адаптационно-интеграционная политика должна строиться, прежде всего, на объективной информации, отражающей истинное положение вещей как в целом на территории, так и в отдельных поселениях и районах. К числу сведений, необходимых для разработки основных мероприятий, следует относить: содержание региональных интересов старожильческого и миграционного населения, характер и динамику этнических структур, информацию об уровне миграционной привлекательности территории и её отдельных участков для разных групп населения, данные о внутрирегиональных различиях в качестве жизни населения, сведения о способах, стилях жизни и моделях поведения, характерных для разных групп населения в разрезе поселений, уровне социальной напряжённости, состоянии и степени развитости региональных сетей жизнеобеспечения и др. Получение и многоаспектный анализ достоверной информации возможны с помощью геоинформационного полимасштабного мониторинга (ГИС-мониторинга). ГИС-мониторинг представляет собой систему, имеющую сложную многоярусную структуру соподчиненных блоков и компонентов, обладающую возможностями построения пространственно-временных моделей, миграционных и адаптационно-интеграционных процессов, что создает предпосылки для разработки прогнозов и сценариев их изменения. В ГИС-мониторинге учитывается адекватность показателей различным территориальным уровням [19, 20]. Формирование массивов разнородной, пространственно ориентированной оперативной информации должно явиться основой составления регионального прогноза развития миграционной и социально-экономической ситуации. Построить и проиграть различные сценарии развития ситуации с достаточной степенью эффективности и достоверности позволяют методы математического и геоинформационного моделирования. Такая система мониторинга позволяет совершенствовать принципы принятия управленческих решений в области адаптационно-интеграционной миграционной политики.

### Выводы

1. Выработка практических рекомендаций по адаптации и интеграции мигрантов невозможна без теоретического осмысления этих процессов и формирования развитой методологической основы исследования. Географические подходы к изучению адаптационно-интеграционных процессов позволяют выявить их пространственно-временную неоднородность. Определение территориальных особенностей адаптационно-интеграционных процессов, порой весьма существенных в пределах одного региона и даже муниципального района, может быть весьма полезно при планировании и осуществлении региональной миграционной политики.
2. Различия в определении категорий «адаптация» и «интеграция» в контексте миграций населения связаны с общей неразработанностью понятийно-терминологического аппарата миграциологии. Рассматривая адаптацию и интеграцию как единый процесс, необходимо различать содержание понятий социально-экономическая адаптация и этнокультурная интеграция.
3. Опора на классические географические подходы в исследовании процессов адаптации и интеграции мигрантов очевидно свидетельствует об актуальности включения данной проблематики в круг общественно-географических интересов. При комплексной оценке адаптационно-интеграционных процессов следует использовать методологические принципы, выработанные в рамках географических исследований: сочетания разных методов исследования, учета факторов и условий протекания адаптационно-интеграционных процессов, учета демографических процессов и демографического поведения на территории вселения, учета этнической специфики миграционных процессов, учета пространственной дифференциации социально-экономического развития территории вселения, учета региональных особенностей при формировании стратегий и моделей адаптации и интеграции иностранных мигрантов.
4. Наиболее распространенное социально-экономическое поведение мигрантов в принимающем регионе рассматривается как модель адаптации мигрантов, и которую можно трактовать как определенную адаптационно-интеграционную стратегию мигрантских групп, выстроенную в соответствии с характерными особенностями внешней среды.
5. Выявленные ключевые модели адаптации мигрантов (инертная, активная и девиантная) и основные стадии интеграции иностранных мигрантов: предварительная, симбиотическая и настоящая, позволяют понять в общих чертах наиболее типичные механизмы протекания этих процессов на примере российской действительности.

6. Региональная адаптационно-интеграционная политика должна стать важной составной частью миграционной политики. Эффективным инструментом комплексной оценки и управления миграциями населения являются геоинформационные технологии, позволяющим обеспечить более высокое качество пространственного анализа и визуализации информации, создать качественную основу для разработки и реализации мероприятий в сфере адаптационно-интеграционной политики. Внедрение системы полимасштабного геоинформационного мониторинга процессов адаптации и интеграции мигрантов позволит отслеживать их динамику и осуществлять краткосрочное прогнозирование для разных территориальных уровней.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белозеров, В.С. Современные вызовы и риски трудовой миграции в Ставропольском крае [Текст] / В.С. Белозеров, Н.А. Щитова // Экология урбанизированных территорий. 2013. № 4. С. 27–30.
2. Белозеров, В.С. Этнические особенности миграционного поведения и адаптации населения в Ставропольском крае [Текст] / В.С. Белозеров, П.П. Турун, Н.А. Щитова, В.М. Эшроков // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2003. № 4. С. 52–57.
3. Битюкова, Д.П. Расселение иммигрантов как фактор социальной стратификации европейских столиц [Текст] / Д.П. Битюкова // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2013. № 2. С. 31–37.
4. Варшавская, Е.Я. Мобильность иностранных работников на российском рынке труда [Текст] / Е.Я. Варшавская, М.Б. Денисенко // Социологические исследования. 2014. № 4 (360). С. 63–73.
5. Верлен, Б. Общество, действие и пространство. Альтернативная социальная география [Текст] / Б. Верлен // Социологическое обозрение. 2001. Т. 1, № 2. С. 26–47.
6. Ивахнюк, И.В. Некоторые методологические и практические вопросы политики интеграции мигрантов в России [Текст] / И.В. Ивахнюк // Интеграция мигрантов: возможна ли она в современном обществе / Научная серия «Международная миграция населения: Россия и современный мир» / Гл. ред. серии Ионцев В.А. М.: Проспект, Вып. 29, 2016. С. 15–16.
7. Интеграция экономических мигрантов в регионах России. Формальные и неформальные практики [Текст] / Науч. ред. Н.П. Рыжова. Иркутск, 2009. 264 с.
8. Ионцев, В.А. Вопросы теории и практики адаптации и интеграции мигрантов на евразийском пространстве [Текст] / В.А. Ионцев, Д.М. Абрамян, А.А. Ергалиева // Миграционные процессы: проблемы адаптации и интеграции мигрантов: сборник материалов Международной научно-практической конференции / под ред. проф. д-ра геогр. наук В. С. Белозерова. Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2016. С. 5–10.
9. Ионцев, В.А. Модели интеграции мигрантов в современной России [Электронный ресурс] / В.А. Ионцев, И.В. Ивахнюк, CARIM-East RR 2013/12, Robert Schuman Centre for Advanced Studies, San Domenico di Fiesole (FI): European University Institute, 2013. URL: [http://www.carim-east.eu/media/CARIM-East-RR-2013-12\\_RU.pdf](http://www.carim-east.eu/media/CARIM-East-RR-2013-12_RU.pdf).

10. Карачурина, Л.Б. Пространственное размещение и социальная адаптация мигрантов в современной Германии: уроки для России [Текст] / Л.Б. Карачурина // Региональные исследования. 2008. № 1. С. 31–38.
11. Ляшенко, Е.В. Адаптация трудовых мигрантов в полиэтническом регионе (на примере Оренбургской области) [Текст] / Е.В. Ляшенко // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2011. № 6. С. 98–102.
12. Максаковский, В.П. Географическая культура [Текст]: учебное пособие для студентов вузов / В.П. Максаковский. М.: Изд. центр ВЛАДОС. 1998. 416 с.
13. Миграционные мосты в Евразии [Текст]: Материалы VII международной научно-практической конференции «Роль трудовой миграции в социально-экономическом и демографическом развитии посылующих и принимающих стран» (Москва – Ставрополь, 13-18 октября 2015 года) / под ред. чл.-корр. РАН Рязанцева С.В. М.: Изд-во «Экон-Информ», 2015. 499 с.
14. Мукомель, В.И. Интеграция мигрантов: вызовы, политика, социальные практики [Текст] / В.И. Мукомель // Мир России. 2011. № 1. С. 34–50.
15. Рязанцев, С.В. Трудовые мигранты из стран Центральной Азии в Москве: факты, рассказанные самими мигрантами (некоторые результаты качественного исследования) [Текст] / С.В. Рязанцев, Н. Хорие // Международная миграция населения на постсоветском пространстве в эпоху глобализации / Гл. ред. серии В.А. Ионцев. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012. С. 62–76.
16. Савоскул, М.С. Адаптация этнических мигрантов в регионах России [Текст] / М.С. Савоскул // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2012. № 2. С. 59–64.
17. Савоскул, М.С. Социально-географические и междисциплинарные подходы к исследованию миграции населения [Текст] / М.С. Савоскул // Социально-экономическая география: традиции и современность / Под ред. А.И. Шкириной, В.Е. Шувалова. М.: Смоленск: Ойкумена, 2009. С. 300–320.
18. Соловьев, И.А. Трансформации социально-экономической адаптации и интеграции мигрантов на Ставрополье в постсоветский период [Текст] / И.А. Соловьев, Н.А. Щитова, В.С. Белозеров // Миграционные процессы: проблемы адаптации и интеграции мигрантов: сборник материалов Международной научно-практической конференции / Под редакцией В.С. Белозерова. Ставрополь, 2015. С. 248–262.
19. Тикунов, В.С. Геоинформационный мониторинг: инструмент пространственно-временного анализа миграции населения [Текст] / В.С. Тикунов, В.С. Белозеров, Н.А. Щитова, А.Н. Панин, А.А. Черкасов // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2015. № 2. С. 33–39.
20. Тикунов, В.С. Полимасштабный геоинформационный мониторинг миграционных процессов: общие подходы [Текст] / В.С. Тикунов, В.С. Белозеров, А.Н. Панин, А.А. Черкасов // Наука. Инновации. Технологии. 2014. № 1. С. 135–144.
21. Флоринская, Ю. Ф. Миграция и рынок труда [Текст] / Ю.Ф. Флоринская, Н.В. Мкртчян, Т.М. Малева, М.К. Кириллова. М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. 108 с.
22. Щитова, Н.А. Опыт регионального исследования адаптационно-интеграционных стратегий иностранных мигрантов в Ставропольском крае [Текст] / Н.А. Щитова, В.С. Белозеров, И.А. Соловьев // Региональные исследования. 2014. № 3. С. 108–115.

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ, № 4, 2016

УДК 616-01/099

Бутова О.А. [Butova O.A.]

### ЦЕРЕБРАЛЬНАЯ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ И ДЕРМАТОГЛИФИЧЕСКАЯ КОНСТИТУЦИЯ ПОДРОСТКОВ С ЗАДЕРЖКОЙ ПСИХИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ

**Cerebral bioelectric activity and dermatoglyphics  
constitutions of teenagers time-lagged psychical  
development**

Анализ параметров электроэнцефалограмм подростков города Лермонтов Ставропольского края установил, что медленный «фундаментальный» тета ритм, обусловленный активацией кортикальных проекций на таламус, доминируя у подростков с задержкой психического развития, вызывает снижение функциональной активности нейронов головного мозга, эмоционально-мотивационное напряжение и негативные эмоции. Выявленный высокий уровень активности нейронов передних и центральных отделов головного мозга в высокочастотном бета-2 диапазоне, коррелирующий с уровнем серотонинэргической активации, характеризует задержку психомоторного развития, как мальчиков, так и девочек с задержкой психического развития. Описана своеобразная дерматоглифическая конституция подростков, фенотипически проявляющаяся при задержке психического развития максимальной представленностью радиальных петель у мальчиков, возрастом гребневого счета и дельтового индекса у девочек. Нейрофизиологически подростки с задержкой психического развития унифицировано характеризуются снижением функциональной активности нейронов и эмоционально-мотивационным напряжением, дерматоглифически мальчиков характеризует наличие редко встречающегося узора – радиальной петли, девочек – возрастание гребневой плотности пальцев правой и левой рук.

Analysis of the parameters of electroencephalogram in adolescents of the city of Lermontov, Stavropol territory found that slow “fundamental” theta rhythm dominating in adolescents with mental retardation and is caused by the activation of cortical projections to the thalamus, leads to a decrease in functional activity of neurons in the brain, emotional-motivational tension and negative emotions. The high level of activity of neurons of the anterior and central parts of the brain in high frequency rhythm beta-2 band, which correlates with the level of activation by dopamine and serotonin, characterizes the delay of psychomotor development for both boys and girls with mental retardation. Described a peculiar dermatoglyphics constitution adolescents, phenotypically manifests itself in delayed mental development of maximum representation of radial loops among boys, increase in ridge accounts and the Delta index in girls. Neurophysiological adolescents with mental retardation are characterized by a uniform decrease in functional activity of neurons and emotional-motivational tension, dermatoglyphics boys characterizes the presence of rarely occurring patterns: radial loop, girls – increase in ridge density of the fingers of the right and left hands.

**Ключевые слова:** биоэлектрическая активность нейронов, признаки дерматоглифики, подростки, задержка психического развития.

**Key words:** the bioelectric activity of the neurons, the symptoms of dermatoglyphics, teens, mental retardation.

Выяснение механизмов, обуславливающих колебательный контур физиологических функций организма с учетом периода онтогенеза, входит в круг актуальных проблем современной медико-биологической науки. Действие специфического комплекса раздражителей вызывает функциональную перестройку активности коры больших полушарий и подкорковых центров, при этом характер взаимодействия функциональных систем организма, направленных на их устойчивость в процессе адаптации, зависит от церебральной активности и вегетативной регуляции [2, 5]. В последние годы внимание исследователей уделяется поиску взаимообусловленности характеристик личности, отдельных заболеваний с особенностями дерматоглифической картины и электрической активности нейронов головного мозга [1, 9, 11, 12]. Поскольку кожа и нервная система имеют общий эмбриональный зачаток, а гормональный статус плода и обменные процессы, лежащие в основе его соматотипизации, образуют среду организма, модифицирующую реализацию генов дерматоглифических узоров в постнатальном периоде, постольку дерматоглифические узоры можно считать оригинальным маркером морфологической организации мозга [6]. Имеется ли взаимосвязь особенностей церебральной биоэлектрической активности и дерматоглифики при задержке психического развития, относящейся к разряду слабовыраженных отклонений в психическом развитии [8], характеризующейся в последние годы возрастанием встречаемости и, в большинстве случаев, обратимым развитием, возможным только в условиях специального обучения и воспитания [3]? В аспекте данного вопроса проведено исследование по анализу биоэлектрической активности нейронов головного мозга и признаков дерматоглифики у подростков с задержкой психического развития.

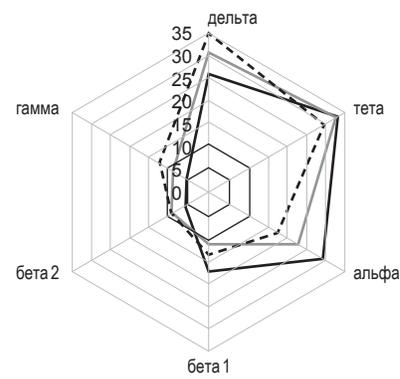
Материал и методы исследований. Исследования проведены с соблюдением этических норм, изложенных в Хельсинкской декларации и директивах Европейского сообщества (8/609ЕС). В реализации программы исследования на добровольной основе приняли участие 48 подростков (средний возраст –  $14,39 \pm 1,06$  лет), являющихся учащимися МБОУ СОШ № 5 г. Лермонтов Ставропольского края. Первая и третья группы сформированы из 24 подростков (мальчиков – 1) и (девочек – 3), обучающихся в общеобразовательном классе. 2-я и 4-я группы сформированы аналогично из 24 подростков, обучающихся в классе коррекционно-развивающего обучения с диагнозом задержка психического развития (ЗПР) конституционально-соматогенного происхождения, установленным врачом-психиатром в возрасте  $12,4 \pm 1,1$  лет. Биопотенциалы головного мозга регистрировались с помощью электроэнцефалографа «Нейровизор» (24-канальный ООО «Нейроботикс»), системы «Неокортекс-Про» с программным обеспечением «Биосенс». Анализу подвергались безартефактные отрезки ЭЭГ, полученные с применением Международной схемы расположения электродов «10–20», в стандартных отведениях, включающих основные зоны мозга правого и левого полушарий, с размещением объединенных референтных электродов на мочках ушей. Запись осуществлялась моно-

полярно в полосе пропускания 0–70 Гц, с использованием режекторного фильтра, настроенного на частоту 50 Гц. Получение дерматоглифических отпечатков осуществлено по общепринятой методике, анализ отпечатков проведен по Cummins, Midlo [6, 10]. Результаты исследования подвергались вариационно-статистической обработке при помощи пакета анализа Microsoft Office Excel 2003 и STATISTIKA 6.0. Доказательная база настоящего исследования основана на математическом анализе и физиологической трактовке 3456 числовых значений, характеризующих биоэлектрическую активность головного мозга и 736 узорных и количественных признаков дерматоглифики.

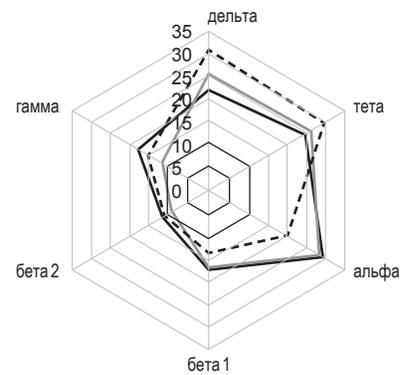
Результаты исследования. При анализе электроэнцефалографических данных (рис. 1) выявлено увеличение представительства низкоамплитудного дельта ритма у мальчиков общеобразовательного класса, максимально зарегистрированное в лобном Fp2 отведении с амплитудой  $18,92 \pm 0,30$  мкВ, характеризуя подверженность стрессовым ситуациям. Увеличением представительства низкоамплитудного тэта ритма, отражающего активность срединно-стволовых образований, характеризуются подростки с ЗПР, с максимальной регистрацией в теменно-затылочном P4 отведении ( $9,15 \pm 0,32$  мкВ) у мальчиков и лобно-боковом F7 отведении ( $8,53 \pm 0,19$  мкВ) у девочек. Анализ доминирующего средне амплитудного альфа ритма выявил увеличение его представительства в теменно-затылочной области мальчиков с ЗПР, с максимальной регистрацией в теменно-затылочном отведении P4 ( $8,72 \pm 1,5$  мкВ). Выраженность высоко амплитудного бета ритма, возрастающего при умственном напряжении и эмоциональном возбуждении, максимально выявлена в низкочастотном (бета-1) диапазоне в лобно-боковом отведении F8 ( $3,49 \pm 0,09$  мкВ) у мальчиков общеобразовательного класса. Высокочастотный бета-2-ритм, характеризующий резервные возможности коры головного мозга, преобладает в лобно-боковых отведениях мальчиков F8 ( $4,21 \pm 0,06$  мкВ) и девочек F8 ( $3,77 \pm 0,11$  мкВ) с ЗПР и теменно-затылочном отведении девочек P3 ( $1,92 \pm 0,21$  мкВ) общеобразовательного класса. Анализ гамма ритма, отражающего пейсмекерные колебания нейронов сигналом активирующей системы ретикулярной формации, выявил его максимальные значения в центрально-лобном отведении F4 ( $1,82 \pm 0,23$  мкВ) у мальчиков общеобразовательного класса.

Таким образом, у мальчиков общеобразовательного класса максимальная выраженность высокоамплитудного дельта ритма в лобной области выявляет состояние психоэмоционального стресса, а регистрация альфа ритма в теменно-затылочных областях соответствует локализации зоны его формирования. Зарегистрированные бета 1 у мальчиков и бета 2 ритмы у девочек общеобразовательного класса в лобно-теменных и теменно-височных областях представляются закономерными, поскольку связаны с соматическими, сенсорными и двигательными корковыми механизмами. У мальчиков и девочек с задержкой психического развития выявлена высокая активность в тэта диапазоне, указывающая на актива-

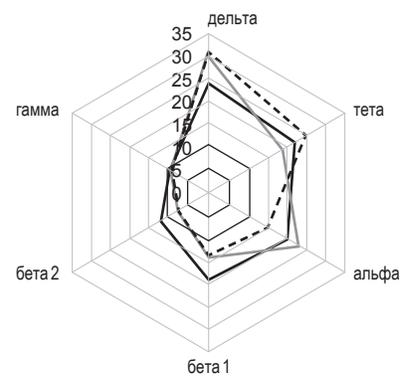
## 1 – группа



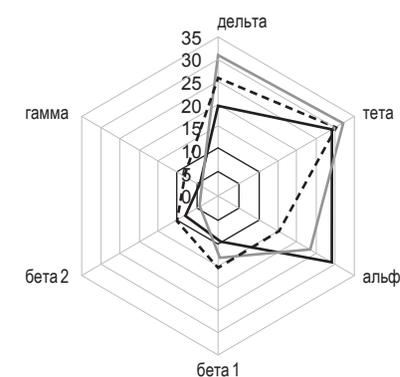
## 2 – группа



## 3 – группа



## 4 – группа



----- Л-Т  
 ————— Т-В  
 ————— Т-3

Рис. 1. Распределение ритмов электроэнцефалограмм по областям.

цию лимбико-кортикальной и ретикуло-кортикальной систем, что может привести к срыву адаптации и появлению патологических симптомов и состояний. Доминирующий альфа ритм тах представлен в теменно-затылочных, а тах – в лобно-теменных областях, отражая морфологическое созревание мозга подростков. Высокий уровень активности нейронов в бета-2 диапазоне, коррелирующий с уровнем серотонинэргической активации [4], максимально характеризует мальчиков с задержкой психического развития, выявляя задержку психомоторного развития. Выявленная минимальная активность гамма ритма в центрально-лобной области слева – зоне проекции области Брока, у подростков с задержкой психического развития, свидетельствует о возможном развитии моторной афазии. На фоне увеличения мощности волн низкочастотного диапазона, отражающего процессы активации коры больших полушарий со стороны лимбической системы подростков общеобразовательного класса, мальчиками выявлено увеличение гамма ритма, характеризующая интеграцию различных корковых областей в единое целое и являясь показателем его суммарной активации [7]. У подростков с задержкой психического развития наблюдается замена доминирующего альфа ритма на высокочастотную бета активность, которая характерна для тревожных расстройств.

Анализ волярной поверхности кистей рук установил отсутствие отклонений в признаках дерматоглифики. Максимальная встречаемость ульнарных петель (Lu), считающихся доминирующим дерматоглифическим узором в популяциях человека [6], характеризует девочек, как класса коррекционно-развивающего обучения (65 %), так и общеобразовательного класса (61 %). Завитковые узоры (W), характеризующие ускорение темпов пренатальной дифференцировки эктодермы, максимально представлены у мальчиков (30 %) общеобразовательного класса. Простой дуговой – бездельтовый узор (A), свидетельствующий о замедленности пренатальной дифференцировки эктодермы, максимально представлен у девочек, обучающихся в общеобразовательном классе (26 %). В целом, у подростков общеобразовательных классов выявлена дерматоглифическая конституция, фенотипически проявляющаяся преобладанием у девочек «женского» дугового узора, «мужского» завиткового узора у мальчиков и удаленностью ообобщённого расстояния пальцевых узоров (38,1). Выявленные особенности преобладания узорных типов у подростков общеобразовательного класса подтверждают сложившиеся представления о влиянии вектора «эндокринной формулы» плода, формирующейся на 36 день эмбриогеза, на процессы гребнеобразования [Бодмер Ч., 1971]. Так, гормональная система женского плода стимулирует накопление жидкости в эпидермальном слое, способствуя формированию уплотненной пальцевой подушечки с образованием «женского» дугового узора, а гормональная система мужского плода стимулирует накопление жидкости в дермальном слое пальцевой подушечки, обуславливая формирование завиткового «мужского» узора. Дерматоглифическая конституция подростков с задержкой психического развития фенотипически проявляется

близостью обобщённого расстояния пальцевых узоров (25,4) и максимальной представленностью редкого узорного типа – радиальной петли у мальчиков. Анализ количественных признаков дерматоглифики (табл. 1) установил, что максимальным значением дельтового индекса (Dli) характеризуются девочки с ЗПР ( $13,7 \pm 0,4$  с индивидуальными колебаниями от 5,0 до 19,0).

Величина гребневого счета, являющегося объективным признаком, зависит от размера центрального фрагмента пальцевого узора (расстояние «дельта-центр») и гребневой плотности. У подростков общеобразовательного класса выявлено увеличение тотального гребневого счета у мальчиков за счет увеличения гребневой плотности пальцев правой руки. У девочек с ЗПР увеличение тотального гребневого ( $168,6 \pm 8,3$ ) обусловлено увеличением гребневой плотности пальцев и правой, и левой рук. Индекс гребневой ширины, характеризующий отношение длины кисти руки к количеству гребешков на 1 см линии под прямым углом к направлению кожных гребешков, связан с размером и ростом кисти. Величина индекса гребневой ширины достоверно выше у подростков общеобразовательного класса, при этом у мальчиков – на правой руке, а у девочек – на обеих руках. Среди подростков общеобразовательного класса увеличением гребневого счета характеризуются мальчики, девочки – возрастанием индекса гребневой ширины, среди подростков с задержкой психического развития девочки характеризуются возрастанием гребневого счета и дельтового индекса.

### Заключение

Нейрофизиологический анализ установил, что тэта ритм – медленный «фундаментальный» ритм, прямо коррелирующий с вегетативной активностью, эмоциональными переживаниями и обусловленный активацией кортикальных проекций на таламус, доминируя у подростков с задержкой психического развития, обуславливает снижение функциональной активности нейронов головного мозга. Активацией корково-лимбических структур, входящих в состав архикортекса, по-видимому, обусловлено эмоционально-мотивационное напряжение и негативные эмоции подростков с задержкой психического развития. Высокий уровень активности нейронов в бета-2 диапазоне передних и центральных отделов головного мозга подростков с задержкой психического развития, коррелирующий с уровнем серотонинэргической активации, указывает на задержку их психомоторного развития. При задержке психического развития выявлена своеобразная дерматоглифическая конституция, фенотипически проявляющаяся максимальной представленностью редкого узорного типа (радиальная петля) у мальчиков, и возрастанием гребневого счета и дельтового индекса у девочек.

Если по нейрофизиологическим параметрам подростки с задержкой психического развития унифицированы характеризуются снижением функциональной активности нейронов головного мозга и эмоциональ-

Табл. 1. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПРИЗНАКИ ДЕРМАТОГЛИФИКИ

Группы	ГСп	ГСл	ТГС	Dli	ИГШп	ИГШл
1	$79,3 \pm 4,9$	$74,3 \pm 4,7$	$153,6 \pm 9,3$	$11,68 \pm 0,8$	$68,61 \pm 1,8$	$65,88 \pm 1,7$
2	$59,1 \pm 4,6$	$58,7 \pm 5,8$	$117,8 \pm 9,3$	$9,18 \pm 0,5$	$65,31 \pm 1,2$	$67,95 \pm 1,3$
3	$63,3 \pm 4,4$	$56,9 \pm 4,3$	$120,2 \pm 9,2$	$10,5 \pm 0,6$	$63,31 \pm 1,0$	$62,32 \pm 1,2$
4	$83,5 \pm 3,9$	$85,1 \pm 4,2$	$168,6 \pm 8,3$	$13,7 \pm 0,4$	$61,08 \pm 1,1$	$59,71 \pm 1,2$
P1	< 0,02	> 0,1	< 0,05	> 0,01	> 0,05	> 0,1
P2	< 0,05	< 0,01	< 0,01	> 0,1	> 0,1	> 0,1
P3	> 0,1	> 0,02	> 0,1	> 0,1	< 0,05	> 0,1
P4	< 0,02	< 0,05	> 0,01	< 0,001	< 0,05	< 0,001

Примечания: Г – гребневой счет (п-правой), (л-левой) рук; ТГС – тотальный гребневой счет; Dli – дельтовый индекс; ИГШ – индекс гребневой ширины (п-правой) и левой (л-левой) рук. P1 – достоверность различий у подростков общеобразовательного класса; P2 – достоверность различий у подростков коррекционно-развивающего класса; P3 – достоверность различий мальчиков; P4 – достоверность различий девочек.

но-мотивационным напряжением, то дерматоглифически мальчиков характеризует наличие редко встречающегося узора – радиальной петли, девочек – возрастание гребневой плотности пальцев обеих рук и доминирование дельтовых узоров. Доминирование дельтовых узоров в дерматоглифической картине женского организма указывает на возможность уклонения эмбрионального процесса гребнеобразования, свойственного женскому организму, способствующего формированию уплощенной пальцевой подушечки с образованием «женского» дугового узора. Кроме того, мальчиков характеризует представленность редкого узорного типа – радиальной петли, что представляет определенный интерес в аспекте маркерной информативности пальцевых узоров при задержке психического развития.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамова Т.Ф., Никитина Т.М., Изаак С.И., Кочеткова Н.И. Пальцевые дерматоглифы и физические особенности // Папиллярные узоры: идентификация и определение характеристик личности. М., 2012. С. 113–137.

2. Бутова О.А., Ермакова А.С. Характеристика биоэлектрической активности нейронов коры головного мозга женщин, перенесших острое нарушение мозгового кровообращения // Медицинский вестник Северного Кавказа. 2015. Т. 10. № 3. С. 235–238.
3. Вильшанская А.Д. Дефектологическое сопровождение учащихся с задержкой психического развития в условиях системы коррекционно-развивающего обучения // Дефектология. 2007. № 2. С. 50–57.
4. Георгиевская Н.А. Роль серотонинергической системы в изменении биоэлектрической активности мозга при различных видах аффективных расстройств у больных с церебральным инсультом: автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 2013. 27 с.
5. Губарева Л. И., Соловьев А.Г., Агаркова Е.В., Гутко Т.Н., Безнаева К.С. Психофизиологические особенности музыкально одаренных учащихся 12–20 лет // Наука. Инновации. Технологии. 2015. Вып. 4. С. 181–195.
6. Гусева И.С. Дерматоглифика как проявление конституции человека // Рос. морфол. ведомости. М. 1993. № 5–8. С. 37–42.
7. Данилова Н.Н., Ханкевич А.А. Гамма ритм в условиях различения временных интервалов // Вестн. Моск. унта. Сер. 14. Психология. 2001. № 1. С. 51–57.
8. Макарова О. А. Аспектный анализ задержки психического развития в отечественной психологии // Концепт. 2013. Спецвыпуск № 01. 0,8 п. л. URL: <http://e-koncept.ru/2013/13504.htm>. Гос. рег. Эл № ФС 77-49965. ISSN 2304-120X.
9. Engel J Jr, Bragin A, Staba R, Mody I. High-frequency oscillations: what is normal and what is not? // *Epilepsia*. 2009. Apr. 50(4). P. 598-604.
10. Cummins H., Midlo Ch. Palmar and plantar epidermal ridge configurations (dermatoglyphics) in european-americans // *Amer. J. Phys. Antropol.* 1961. V. 9. P. 157–189.
11. Modur P.N., Rigdon B. Diagnostic yield of sequential routine EEG and extended outpatient video-EEG monitoring. // *Clin Neurophysiol.* 2008. Jan. 119(1). P. 190–6.
12. Santoshkumar B., Chong J.J., Blume W.T., McLachlan R.S., Young G.B., Diosy D.C., Burneo J.G., Mirsattari S. M. Prevalence of benign epileptiform variants // *Clin Neurophysiol.* 2009 May; 120(5). P. 856–61.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ, №4, 2016

Ватиашвили Михаил Рубенович, кандидат географических наук, доцент, научный консультант по проектам в Грузинском государственном научно-техническом центре «Дельта» министерства обороны Грузии. Телефон: 8-963-391-27-48. E-mail: Mivv123@mail.ru

Горбенко Иван Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина. Телефон: +38-050-32-39-026. E-mail: gorbenkoi@iit.kharkov.ua .

Есина Марина Витальевна, аспирантка кафедры безопасности информационных систем и технологий, Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина. Телефон: +38-095-30-35-421. E-mail: rinayes20@gmail.com.

Пономарь Владимир Андреевич, аспирант кафедры безопасности информационных систем и технологий, Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина. Телефон: +38-098-45-83-131. E-mail: Laedaa@gmail.com.

Зайцева Ирина Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент, учитель лицея ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет». Телефон: 8(962)40-05-213. E-mail: zirinazirina2015@yandex.ru.

Исупов Константин Сергеевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры электронных вычислительных машин ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет». Телефон: 8(953)674-39-02. E-mail: ks\_isupov@vyatsu.ru.

Рассомахин Сергей Геннадиевич, доктор технических наук, доцент кафедры безопасности информационных систем и технологий Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. Телефон: 705-10-83. E-mail: rassomakhin@karazin.ua.

Малофей Александр Олегович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры тактико-специальной и огневой подготовки Ставропольского филиала Краснодарского университета МВД России. Телефон: 8(962)40-36-288. E-mail: yzorsv@gmail.com

Лавровская Тамара Валериевна, аспирант кафедры безопасности информационных систем и технологий ХНУ имени В. Н. Каразина. Телефон: 705-10-83. E-mail: lavrovskaya92@gmail.com.

Харечкина Юлия Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем Ставропольского государственного аграрного университета. Телефон: (8652)63-79-26

Веклич Сергей Геннадиевич, аспирант кафедры безопасности информационных систем и технологий Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. E-mail: s.veklych@gmail.com.

Малофей Олег Павлович, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры высшей алгебры и геометрии Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8(962)40-36-288. E-mail: yzorsv@gmail.com

Самойленко Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, докторант кафедры, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Телефон: 8-918-362-41-09. E-mail: 19sam@mail.ru.

Финько Олег Анатольевич, доктор технических наук, профессор, Краснодарское высшее военное училище им. генерала армии С.М. Штеменко. Телефон: 8-961-587-48-48. E-mail: ofinko@yandex.ru.

Цимбал Владимир Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем управления филиала Военной академии РВСН имени Петра Великого. Телефон: 8(985)14-17-909. E-mail: tsimbalva@mail.ru.

Сорокин Олег Игоревич, адъюнкт кафедры автоматизированных систем управления филиала Военной академии РВСН имени Петра Великого. Телефон: 8(916)06-16-733. E-mail: sorokin\_oleg89@mail.ru.

Лягин Максим Артурович, адъюнкт кафедры автоматизированных систем управления филиала Военной академии РВСН имени Петра Великого. Телефон: 8(916)37-49-888. E-mail: lma.mil@yandex.ru.

Бережной Андрей Александрович, адъюнкт кафедры автоматизированных систем управления филиала Военной академии РВСН имени Петра Великого. Телефон: 8(916)93-60-755. E-mail: aaberezhnoy@mail.ru.

Крючков Никита Викторович, адъюнкт кафедры автоматизированных систем управления филиала Военной академии РВСН имени Петра Великого. Телефон: (929)67-37-608. E-mail: nixon07.19@yandex.ru.

Червяков Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и математического моделирования Северо-Кавказского федерального университета. E-mail: k-fmf-primath@stavsu.ru

Ляхов Павел Алексеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и математического моделирования Северо-Кавказского федерального университета. E-mail: ljahov@mail.ru

Валуева Мария Васильевна, студентка 5 курса специальности «Прикладная математика и информатика» Северо-Кавказского федерального университета. E-mail: mriya.valueva@mail.ru

Хоптар Виталий Владимирович, начальник ВП МО РФ АО НПП «Полёт». Телефон: (831) 24-52-104. E-mail: vhoptar@mail.ru

Белюсов Анатолий Иванович, доктор экономических наук, профессор кафедры бухгалтерского учета и налогообложения Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8-905-445-20-59. E-mail: buhuchet-sgu@mail.ru

Близно Лилия Васильевна, кандидат экономических наук, декан юридического факультета Ставропольского кооперативного института. Телефон: 8-905-490-95-17. E-mail: buhuchet-sgu@mail.ru

Белоус Виктор Николаевич, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры ботаники, зоологии и общей биологии Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8-906-47-47-352. E-mail: viktor\_belous@bk.ru

Кухарук Максим Юрьевич, кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники, зоологии и общей биологии Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8-918-752-50-66. E-mail: kuth87@mail.ru

Гасумов Рамиз Алиевич, доктор технических наук, профессор кафедры строительства нефтяных и газовых скважин Северо-Кавказского федерального университета, заместитель председателя совета директоров ОАО «СевКавНИПИгаз». Телефон: (8652) 35-30-26. E-mail: Priemnaya@scnipigaz.ru.

Шихалиева Ирина Станиславовна, научный сотрудник ОАО «СевКавНИПИгаз». Телефон: 8-962-499-83-43. E-mail: Shihalievais@scnipigaz.ru

Искандерова Ирада Ильгам кызы, аспирант, младший научный сотрудник ОАО «СевКавНИПИгаз». Телефон: 8-961-440-66-49. E-mail: Shihalievais@scnipigaz.ru

Керимов Абдул-Гапур Гусейнович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 94-01-56, вн. (52-25). E-mail: gmpr-skfu@yandex.ru

Керимова Елизавета Гапуровна, студентка 5 курса кафедры геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 94-01-56, вн. (52-25). E-mail: gmpr-skfu@yandex.ru

Теленько Дмитрий Сергеевич, студент 5 курса кафедры геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 94-01-56, вн. (52-25). E-mail: gmpr-skfu@yandex.ru

Зенин Денис Игоревич, инженер-лаборант кафедры геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (8652) 94-01-56, вн. (52-25). E-mail: jared2haze@gmail.com

4. Закирян Роберт Гургенович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета. E-mail: zakinyan@mail.ru

Набродова Екатерина Геннадьевна, аспирант кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8-918-77-53-48-97. E-mail: Katyropova1991@yandex.ru

Диденко Анастасия Юрьевна, аспирант кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8-988-11-63-77-27. E-mail: anastyd@yandex.ru

Петренко Василий Иванович, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8-918-871-55-39. E-mail: petrenko-stavropol@rambler.ru.

Петренко Николай Николаевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8-918-759-17-96. E-mail: nnpetrenko@mail.ru.

Петренко Иван Николаевич, аспирант кафедры геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8-918-759-17-96. E-mail: petrenko-rng071@mail.ru.

Подосян Аксель Арутюнович, кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой экономической и социальной географии Ереванского государственного университета. Телефон: (+374)60710445. E-mail: aksel.potosyan@yandex.ru

Бутова Ольга Алексеевна, доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой анатомии и физиологии Северо-Кавказского федерального университета. Телефоны: (8652) 330-854. E-mail: olga\_butova@mail.ru

Разумов Виктор Владимирович, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры социально-экономической географии, геоинформатики и туризма Северо-Кавказского федерального университета. Телефон 8 (926) 3254401. E-mail: razumov\_vv@mail.ru,

Разумова Наталья Викторовна, кандидат географических наук, доцент, начальник сектора ОАО «Российские космические системы». Телефон: 8 9263254409. E-mail: razumova-nv@yandex.ru

Щитова Наталия Александровна, доктор географических наук, профессор кафедры социально-экономической географии, геоинформатики и туризма Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: +7(905)466-91-20. E-mail: stavgeo@mail.ru

Белозеров Виталий Семенович, доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой социально-экономической географии, геоинформатики и туризма Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: +7(962)451-77-88. E-mail: vsbelozerov@yandex.ru

Соловьев Иван Алексеевич, кандидат географических наук, доцент кафедры социально-экономической географии, геоинформатики и туризма Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: +7(905) 41-55-624. E-mail: soloivan@mail.ru

Чихичин Василий Васильевич, кандидат географических наук, доцент кафедры социально-экономической географии, геоинформатики и туризма Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: 8 (905) 496-26-10. E-mail: wawachi@yandex.ru.

## ABOUT THE AUTHORS

SCIENCE. INNOVATIONS. TECHNOLOGIES, №4, 2016

Vatiashvili Mikhail Rubenovich, candidate of geographical sciences, the senior lecturer, scientific consultant for projects in the Georgian state scientific and technological center "Delta" in Ministries of the Defence of Georgia. Phone: 8-963-391-27-48. E-mail: Mivv123@mail.ru

Gogbenko Ivan Dmitrievich, doctor of engineering sciences, full professor, Kharkiv National University named V. N. Karazin. . Phone: +38-050-32-39-026. E-mail: gorbenkoi@iit.kharkov.ua

Yesina Marina Vital'evna, postgraduate, department of information systems and technologies security, Kharkiv national university named V. N. Karazin. Phone: +38-095-30-35-421. E-mail: rinayes20@gmail.com.

Ponomar Vladimir Andreevich, postgraduate, department of information systems and technologies security, Kharkiv national university named V. N. Karazin. Phone: +38-098-45-83-131. E-mail: Laedaa@gmail.com.

Irina Zaytseva Vladimirovna, Ph.D in physico-mathematical sciences, docent, teacher in the North-Caucasus Federal University. Phone: 8(962)40-05-213. E-mail: zir-inazirina2015@yandex.ru

Isupov Konstantin Sergeevich, Ph.D. (computer science), leading researcher at the Department of electronic computing machines in the Vyatka State University. Phone: 8(953)674-39-02. E-mail: ks\_isupov@vyatsu.ru.

Rassomakhin Sergey Gennadiyevich, the doctor of engineering sciences, the associate professor at the department of safety of information systems and technologies of Karazin Kharkiv National University. Phone: 705-10-83. E-mail: rassomakhin@karazin.ua.

Malofey Aleksandr Olegovich, Ph.D., associate professor, professor of special-tactical and fire training of the Stavropol branch of the Krasnodar University of MIA of Russia. Phone: 8(962)40-36-288. E-mail: yzorsv@gmail.com.

Lavrovskaya Tamila Valerievna, postgraduate student of the security of information systems and technologies of V. N. Karazin Kharkiv National University. Phone: 705-10-83. E-mail: lavrovskaya92@gmail.com.

Kharechkina Julia Olegovna, Ph.D., assistant professor of information systems in the Stavropol State Agrarian University. Phone: (8652)63-79-26

Veklich Sergey Gennadiyevich, the postgraduate at the department of safety of information systems and technologies of Karazin Kharkiv National University. E-mail: s.veklych@gmail.com.

Malofey Oleg Pavlovich, PhD, professor of the department of higher algebra and geometry in the North Caucasus Federal University. Phone: 8(962)40-36-288. E-mail: yzorsv@gmail.com.

Samoylenko Dmitriy Vladimirovich, Ph.D, doctoral student of department, Mozhaisky Military Space Academy. Phone: 89183624109. E-mail: 19sam@mail.ru

Finko Oleg Anatolievich, Ph.D., doctor, professor of department, Branch of the Military Academy of Communications. Phone: +79615874848. E-mail: ofinko@yandex.ru.

Tsimbal Vladimir Anatolievich, the doctor of technical sciences, the professor of chair of the automated control systems of military academy. Phone: 8(985)14-17-909. E-mail: tsimbalva@mail.ru.

Lyagin Maxim Arturovich, post-graduate student of chair of the automated control systems of military academy. Phone: 8(916)37-49-888. E-mail: lma.mil@yandex.ru.

Sorokin Oleg Igorevich, post-graduate student of chair of the automated control systems of military academy. Phone: 8(916)06-16-733. E-mail: sorokin\_oleg89@mail.ru.

Berezhnoy Andrey Aleksandrovich, post-graduate student of chair of the automated control systems of military academy. Phone: 8(916)93-60-755. E-mail: aaberezhnoy@mail.ru.

Kruchkov Nikita Viktorovich, post-graduate student of chair of the automated control systems of military academy. Phone: (929)67-37-608. E-mail: nixon07.19@yandex.ru.

Hoptar Vitaliy Vladimirovich, chief of military acceptance of the MD RF of JSC "RPE "Weeded". Phone: 88312452104. E-mail: vhohtar@mail.ru

Chervyakov Nikolay Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, head of department of the applied mathematics and mathematical modeling in the North Caucasus Federal University. E-mail: k-fmf-primath@stavsu.ru

Lyakhov Pavel Alekseyevich, Ph. D., assistant professor, department of the applied mathematics and mathematical modeling, in the North Caucasus Federal University. E-mail: ljahov@mail.ru

Valueva Maria Vasilevna, student in applied mathematics and informatics in the North Caucasus Federal University. E-mail: mriya.valueva@mail.ru

Belous Viktor Nikolaevich, candidate of biological sciences, associate professor in the North-Caucasus Federal University.

Kukharuk Maxim Jurevich, candidate of biological sciences in the North-Caucasus Federal University.

Belousov Anatoliy Ivanovich, doctor of economics, professor of accounting and taxation of the North Caucasus Federal University. Phone: 8-905-445-20-59. E-mail: buhuchet-sgu@mail.ru

Blizno Liliya Vasil'yevna, PhD, dean of the faculty of law of the Stavropol Cooperative Institute. Phone: 8-905-490-95-17. E-mail: buhuchet-sgu@mail.ru

Gasumov Ramiz Alievich, doctor of technical Sciences, Professor of the Department of construction of oil and gas wells of the North-Caucasian Federal University, First Deputy Director General "SevKavNIPigaz".

Shikhaliyeva Irina Stanislavovna, Scientific associate of the JSC "SevKavNIPigaz". Phone: 8-962-499-83-43. E-mail: Shihalievais@scnipigaz.ru

Iskanderova Irada Ilgam kyzy, Postgraduate student, Junior scientific associate of the JSC "SevKavNIPigaz". Phone: 8-961-440-66-49. E-mail: Shihalievais@scnipigaz.ru

Kerimov Abdul-Gapur Guseinovich, doctor of technical sciences, docent, head of department of geophysical methods of prospecting and exploration of mineral deposits of the North Caucasus Federal University. Phone: (8652) 94-01-56, in. (52-25). E-mail: gmpr-skfu@yandex.ru

Zenin Denis Igorevich, engineer-assistant of the department of geophysical methods of prospecting and exploration of mineral deposits of the North Caucasus Federal University. Phone: (8652) 94-01-56, in. (52-25). E-mail: jared2haze@gmail.com

Kerimova Elizaveta Gapurovna, student of department of geophysical methods of prospecting and exploration of mineral deposits of the North Caucasus Federal University. Phone: (8652) 94-01-56, in. (52-25). E-mail: gmpr-skfu@yandex.ru

Telenko Dmitri Sergeevich, student of department of geophysical methods of prospecting and exploration of mineral deposits of the North Caucasus Federal University. Phone: (8652) 94-01-56, in. (52-25). E-mail: gmpr-skfu@yandex.ru

Zakinyan Robert Gurgenovich, doctor of physics and mathematics, professor of the department of general and theoretical physics of the North Caucasus Federal University. E-mail: zakinyan@mail.ru

Didenko Anastasiya Urevna, graduate student of the department of the general and theoretical physics of the North Caucasus Federal University. Phone: 8-988-116-37-27. E-mail: anastyd@yandex.ru

Nabrodova Ekaterina Gennadevna, graduate student of the department of the general and theoretical physics of the North Caucasus Federal University. Phone: 8-918-77-53-48-97. E-mail: katypopova@yandex.ru

Petrenko Vasiliy Ivanovich, Doctor of geologo-mineral science, professor of design and operation of oil and gas fields in the North Caucasus Federal University. Phone: 8-918-871-55-39. E-mail: petrenko-stavropol@rambler.ru.

Petrenko Nickolay Nickolaevich, Candidate of tehn. Sciences, assistant of the department of development and exploitation of oil and gas fields in the North Caucasus Federal University. Phone: 8-918-759-17-96. E-mail: nnpetrenko@mail.ru.

Petrenko Ivan Nickolaevich, graduate student of geophysical methods for prospecting and exploration of mineral deposits in the North Caucasus Federal University. Phone: 8-918-759-17-26. E-mail: petrenko-rng071@mail.ru.

Podosyan Aksel' Arutyunovich, candidate of geographical sciences, associate professor, head of the department of economic and social geography of Yerevan State University. Phone: (+374) 60710445. E-mail: aksel.potosyan@yandex.ru

Butova Olga Alekseevna, doctor of medical sciences, professor, head of department of anatomy and physiology of the North-Caucasian Federal University. Phone: (8652) 330-854; 8-928-303-43-67. E-mail: olga\_butova@mail.ru

Razumov Victor Vladimirovich, Doctor of geographical sciences, professor of department of social and economic geography, geoinformatics and tourism of the North Caucasus Federal University. Phone: 8 (926) 3254401. E-mail: razumov\_vv@mail.ru,

Razumova Natalia Victorovna, doctor of geographical sciences, associate professor, head of division, JSC Russian Space Systems. Phone: 8 9263254409. E-mail: razumova-nv@yandex.ru

Shchitova Natalia Alexandrovna, the doctor of geographical sciences, professor of social and economic geography, geoinformatics and tourism of the North Caucasus Federal University. Phone: +7 (905) 466-91-20. E-mail: stavgeo@mail.ru

BelozeroV Vitaly Semenovich, doctor of geographical sciences, professor, head of department of social and economic geography, geoinformatics and tourism of the North Caucasus Federal University. Phone: +7 (962) 451-77-88. E-mail: vsbelozeroV@yandex.ru

Solovyov Ivan Alexeyevich, the candidate of geographical sciences, associate professor of social and economic geography, geoinformatics and tourism of the North Caucasus Federal University. Phone: +7(905) 41– 55–624. E-mail: soloivan@mail.ru

Chihichin Vasily Vasil'yevich, candidate of geographical science, assistant professor of the department of social and economic geography, geoinformatics and tourism at the North Caucasus Federal University. Phone: 8 (905) 496-26-10. E-mail: wawachi@yandex.ru.

## CONTENTS

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ, №4, 2016

### ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

<b>Vatiashvili M.R.</b>	The method of hail interruption near protected area, based on preliminary impact hails cloud and hails cloudy systems . . . . .	7
<b>Gorbenko I.D., Yesina M.V., Ponomar V.A.</b>	Blind electronic signature on elliptic curves method: conditions and requirements . . . . .	25
<b>Zaitseva I.V.</b>	Software implementation of research algorithm on stability of mathematical model of self-organization of the labour market . . . . .	35
<b>Isupov K.S.</b>	Algorithms for estimating modular numbers in floating-point arithmetic. . . . .	43
<b>Lavrovskaya T.V., Rassomakhin S.G., Malofey A.O.</b>	Methods of analysis of linear integer decoding pseudo-random codes . . . . .	57
<b>Malofey A.O., Kharechkina J.O.</b>	Interference of parallel phase-frequency-modulated signals with double phase-shift manipulation . . . . .	63
<b>Rassomakhin S.G., Veklich S.G., Malofey O.P.</b>	The library of reference models of the physical layer signals . . . . .	67
<b>Samoylenko D.V, Finko O.A.</b>	Ensuring the integrity of information in an autonomous group of unmanned aerial vehicles by methods of modular arithmetic. . . . .	77

<b>Tsimbal V.A., Sorokin O.I., Lyagin M.A., Berezhnoy A.A., Kruchkov N.V., Hoptar V.V.</b>	Rules of the automated synthesis final markovskoy a chain describing finishing of the multipack-age message in connection "point-point" . . . . .	91
<b>Chervyakov N.I., P.A. Lyakhov, M.V. Valueva, O.V. Krivolapova.</b>	Comparative analysis of adders hardware imple-mentation on FPGA . . . . .	99
<b>НАУКИ О ЗЕМЛЕ</b>		
<b>Belous V.N., Kukharuk M.J.</b>	Plant communities on bedrock out-crops in the north-western part of the Stavropol Upland . . . . .	109
<b>Belousov A.I., Blizno L.V.</b>	Optimization of use of natural assets in environmental-oriented accounting and analytical systems . . . . .	127
<b>Gasumov R.A., Shikhaliyeva I.S., Iskanderova I.I.</b>	Investigation of pressure loss during the of gas-liquid flow in vertical pipes . . . . .	139
<b>Kerimov A-G.G., Zenin D.I., Kerimova E.G., Telenko D.S.</b>	Application of the technology "Intelligent well" to control the exploitation of underground gas stor-age . . . . .	153
<b>Nabrodova E.G., Didenko A.U., Zakinayn R.G.</b>	To rate spread in-ternal gravity waves . . . . .	161
<b>Petrenko V.I., Petrenko N.N., Petrenko I.N.</b>	Gasevaporated moisture as the geologic-geo-chtmical phenomenon of the planetary scale . . . . .	169
<b>Potosyan A.H.</b>	Rural areas as a prerequisite for the efficient use of the territories of mountainous regions (on the pattern of the Republic of Armenia) . . . . .	193

<b>Razumov V.V., Razumova N.V.</b>	Hydrometeorological hazards on radiation contaminated territories of the East Ural region of Russia . . . . .	199
<b>Shchitova N.A., Soloviev I.A., Belozarov V.S.</b>	Problems of adap-tation of foreign migrant workers (an example of Stavropol territory) . . . . .	217
<b>Shchitova N.A., Chihichin V.V.</b>	Theoretical and methodological as-pects of geographical studies processes of adap-tation and integration of foreign workers . . . . .	225
<b>БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ</b>		
<b>Butova O.A.</b>	Cerebral bioelectric activity and dermatoglyphics constitutions of teenagers time-lagged psychical development . . . . .	239
<b>ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ . . . . .</b>		
		247
<b>ABOUT THE AUTHORS . . . . .</b>		
		251

**Научное издание**

**НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ**

2016

Выпуск 4

Корректор — М.И. Толмачев.

Компьютерная верстка — О.Г. Полевич.

Подписано в печать 28.12.2016. Формат 70 × 108 1/16.  
Гарнитура Times New Roman. Бумага офсетная. Усл. печ. л.  
25,38. Тираж 1 000 экз.

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