

Министерство образования и науки
Российской Федерации

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал
Северо-Кавказского федерального
университета

ISSN 2308–4758

18+



Выпуск № 3, 2018 г.

Выходит 4 раза в год

	«Наука. Инновации. Технологии» Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета
Учредитель	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет»
Главный редактор	д-р геогр. наук, профессор В. С. Белозеров
Редакционный совет	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. Храмцов, д-р техн. наук, профессор, академик РАН; Ю. Ю. Балега, д-р физ.-мат. наук, академик РАН (САО РАН, п. Нижний Архыз); С. В. Рязанцев, д-р экон. наук, член-корр. РАН (ИСПИ РАН, г. Москва); В. С. Тикуннов, д-р геогр. наук, профессор (МГУ им. Ломоносова, г. Москва); С. Пестрак, профессор (Институт Жана Лямура университета Лотарингии, г. Нанси, Франция)
Редакционная коллегия	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. Диневич, д-р физ.-мат. наук, профессор (Тель-Авивский университет, г. Тель-Авив); К. В. Ерин, д-р физ.-мат. наук, профессор; А. И. Жакин, д-р физ.-мат. наук, профессор (Юго-Западный гос. университет, г. Курск); А. Р. Закинян, канд. физ.-мат. наук, доцент; А. О. Иванов, д-р физ.-мат. наук, профессор (Уральский федеральный университет им. Б. Ельцина); А. А. Коляда, д-р физ.-мат. наук, доцент (Белорусский гос. университет, г. Минск); 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. Молодилова, 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); Х. А. А. Кдаис, канд. техн. наук, профессор (Иорданский университет науки и технологии, Амман)
Свидетельство о регистрации	выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) ПИ № ФС77–52723 от 8.02.2013
Подп. индекс	Объединенный каталог. ПРЕССА РОССИИ. Газеты и журналы: 94011
Журнал включен	в БД «Российский индекс научного цитирования». Журнал «Вестник Ставропольского государственного университета» перерегистрирован в журнал «Наука. Инновации. Технологии» в связи с переименованием учредителя.
Журнал	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.
Адрес Телефон Сайт E-mail	редакции и издателя: 355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1 (8652) 33–07–32 www.ncfu.ru nit_ncfu@mail.ru
ISSN	2308–4758

	«Science. Innovations. Technologies» North Caucasus Federal University
Founder	Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «North Caucasus Federal University»
Editor in chief	V. S. Belozеров, Doctor of Geographical Sciences, professor
Editorial Council	A.A. Levitskaya, chairman, Rector SKFU, PhD. Philology Sciences, Associate Professor; A.A. Likhovid, Vice Chairman, Doctor of Geographical Sciences, Professor; V.S. Belozеров, Chief Editor, Doctor of Geographical Sciences, professor; M.Ch. Zalikhonov, 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)
Editorial Board	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 Sciences, 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. Polyan, 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); H. Qdais, Ph.D in environmental engineering, professor (Jordan University of science and technology, Amman)
Certificate	ПИ № ФС77–52723 dated February 8th 2013.
The Index	The Journal is included in the DB «Russian index of the scientist quoting».
The journal	«Bulletin of the Stavropol state University» renamed in the journal «Science. Innovations. Technologies» due to renaming of the founder.
The journal	is recommended by the State Commission for Academic Degrees and Titles for publishing the dissertation research results
Adress	355009, Stavropol, Pushkin street, 1
Phone	8 (8652) 33–07–32
Site	www.ncfu.ru
E-mail	nit_ncfu@mail.ru
ISSN	2308–4758

СОДЕРЖАНИЕ

«Наука. Инновации. Технологии», № 3, 2018

ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

01.01.02	Дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление	
Маторин С.И. Белов С.П. Жихарев А.Г.	Учет общесистемных закономерностей при моделировании сложных систем средствами системно-объектного подхода Accounting for system-wide regularities in the modeling of complex systems by means of the system-object approach	7
Редькина Т.В.	Построение законов сохранения для нелинейных уравнений, связанных с оператором рассеяния Дирака Construction of conservation laws for nonlinear equations connected with the Dirac scattering operator	21
Яновская О.С. Сурнева О.Б.	Нелинейное уравнение, обладающее оператором рассеяния третьего порядка Nonlinear equation with the third order scattering operator	37
01.01.07	Вычислительная математика	
Наац И.Э. Наац В.И. Ярцева Е.П.	Методы аппроксимации функции обобщенными полиномами в задачах численного анализа, связанных с вычислениями на приближенных данных Methods of approximation of functions by generalized polynomials in numerical analysis problems related to calculations on approximate data	53
01.04.07	Физика конденсированного состояния	
Савотченко С.Е.	Связанные солитонные состояния, локализованные вблизи дефекта в нелинейной среде Bound soliton states localized near defect in a nonlinear medium	65

01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника

Яновский А.А.,

Симоновский А.Я. Частота образования пузырьков пара в двухслойной среде магнитная-немагнитная жидкость

Frequency of formation of vapor bubbles in a two-layer medium magnetic – nonmagnetic liquid 79

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

25.00.17 Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

Верисокин А.Е. Сокращение сроков освоения скважины после проведения гидроразрыва пласта

Reduction of well stimulation period after hydraulic fracturing 99

Шестерень А.О. Мероприятия по повышению эффективности эксплуатации скважин периодического газлифта

Activities to increase the efficiency of periodicals artificial wells 115

25.00.23 Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов

Дегтярева Т.В. Лиховид А.А.

Лиховид Н.Г. Геохимическая дифференциация литогенной основы ландшафтов Большого Кавказа

Geochemical differentiation of the lithogenic base of the landscapes of the Greater Caucasus 125

Зуев Р.В.,
Сигида С.И.

Биотопическая приуроченность *chilopoda* и *diplopoda* фауны Центрального Предкавказья

Habitat preference of chilopoda and diplopoda of the fauna of the Central Ciscaucasia. 141

25.00.24 Экономическая, социальная, политическая и рекреационная география

Зольникова Ю.Ф. Изучение климата Кавказских Минеральных Вод как рекреационного ресурса в конце XIX – начале XX в.

The study of the climate of the caucasian mineral waters as a recreational resource in the late XIX – early XX centuries 155

- Черкасов А.А.** Этническая карта Карачаево-Черкесской Республики: вторая половина XX начало XXI века
Чернова И.В. The ethnic card of the karachayevocherkes republic: the second half XX the beginning of the XXI century 165
- 25.00.36 Геоэкология**
- Бондарь Е.В., Скрипчинский А.В., Седых Р. Ю.** Разработка методических приемов оценки земельных участков сельскохозяйственного назначения с применением риск-ориентированного подхода на основе геоинформационных систем
Bondar E.V., Skripchinskiy A.V., Sedykh R.Y. Development of methodical methods for assessing agricultural land plots using a risk-based approach based on geoinformation systems 181
- Ларина О.Г., Овчаров С.Н., Калиниченко А.Ю.** Физико-химический анализ формирования пористой структуры и эксплуатационных свойств термомодифицированных сорбентов для очистки сточных вод
 Development of methodical methods for assessing agricultural land plots using a risk-based approach based on geoinformation systems 181
- 25.00.29 Физика атмосферы и гидросферы**
- Ватиашвили М.Р.** Обзор методов противорадовой защиты в регионе Центрального Кавказа
Vatiashvili M.R. Physico-chemical analysis of the formation of porous structure and performance properties of thermally modified sorbents for wastewater purification 209
- Шаповалов В.А.** Численное моделирование формирования градин в облаках при естественном развитии и активном воздействии кристаллизующим реагентом
Shapovalov V.A. Numerical simulation of the formation of hailstones in the clouds at the natural development and at the active influence with the help of crystallizing reagent 227

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ, ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
И ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ**

УДК

681.3;681.518+658.511

Маторин С.И.*, «Белгородский университет кооперации,
Белов С.П., экономики и права»,
Жихарев А.Г. г. Белгород, Россия,
* matorin@bsu.edu.ru

**УЧЕТ ОБЩЕСИСТЕМНЫХ
ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРИ
МОДЕЛИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ
СРЕДСТВАМИ СИСТЕМНО-ОБЪЕКТНОГО
ПОДХОДА**

Введение: актуальность исследования обусловлена отсутствием обоснования общесистемных законов и принципов с единых позиций в рамках традиционной теоретико-множественной теории систем, на основе которой построены существующие методологии анализа и синтеза систем.

Методы исследования: результаты, полученные в рамках настоящей статьи, являются продолжением научно-исследовательской работы по созданию формализованной теории имитационного моделирования процессов и систем. Ранее авторами были разработаны формальные основы исчисления функциональных объектов с применением исчисления объектов Абади-Кардели. Были введены такие термины, как: потоковый и узловой объекты. Определены формальные основы состояний потоковых и узловых объектов, а также их взаимосвязи. Помимо реализации процедур синтеза и анализа систем, полученные результаты открыли перспективы формализованного учета в системно-объектных моделях общесистемных принципов и закономерностей. В работе с использованием вышеупомянутого исчисления объектов Абади-Кардели уточняется определение системы в рамках системно-объектного подхода «Узел-Функция-Объект», а также предложена формализация понятий «системообразующий фактор» и «адаптация системы».

Результаты исследования и обсуждение: представленные формализмы использованы для учета общесистемных закономерностей при построении графоаналитических

моделей организационно-деловых и производственно-технологических процессов в терминах «Узел-Функция-Объект». Описанный подход позволяет распределить известные общесистемные закономерности на три группы: связанные со структурными свойствами систем, связанные с их функциональными свойствами и с субстанциальными свойствами, что обосновывает иерархическую зависимость между ними. Формально показано, что принцип организационной непрерывности выполняется только при соблюдении принципа моноцентризма, понимаемого расширенно. Исследованы возможности системно-объектного, системно-структурного, объектно-ориентированного подходов и нотации BPMN учитывать общесистемные закономерности в графоаналитических моделях.

Выводы:

авторами сделан вывод, что системно-объектный подход «Узел-Функция-Объект», позволяет учитывать с единых позиций существующие общесистемные законы и принципы в большей степени, чем другие подходы. Что, в свою очередь, открывает новые перспективы имитационного моделирования процессов и систем, а именно: процессов адаптации и эволюции систем. Ключевые слова: системный подход «Узел-Функция-Объект», общесистемные закономерности, графоаналитическое моделирование.

**Matorin S.I.*,
Belov S.P.,
Zhikharev A.G.**

«Belgorod University of cooperation,
Economics and law»,
Belgorod, Russia,
* matorin@bsu.edu.ru

ACCOUNTING FOR SYSTEM-WIDE REGULARITIES IN THE MODELING OF COMPLEX SYSTEMS BY MEANS OF THE SYSTEM-OBJECT APPROACH

Introduction:

the relevance of the study is due to the lack of justification of system-wide laws and principles from a unified position within the framework of the traditional set theory of systems, on the basis of which existing methodologies of analysis and synthesis of systems are constructed.

Research methods:

the results obtained within the framework of this article are a continuation of the research work on the creation of a formalized theory of simulation modeling of processes and systems. Earlier, the authors developed formal bases for the calculation of functional objects using the Abad-Kardeli calculus. There were introduced such terms as: stream and node objects. The formal foundations of the states of flow and core objects, as well as their interrelations, are determined. In addition to implementing the procedures for synthesis and analysis of systems, the results obtained opened the prospects for formalized accounting in system-object models of system-wide principles and regularities. In work with the above-mentioned calculation of Abadi-Kardeli objects, the definition of the system within the system-object approach "Node-Function-Object" is clarified, and a formalization of the concepts "system-forming factor" and "system adaptation" is proposed.

Results of the study
and their discussion:

the presented formalisms were used to take into account system-wide regularities in the construction of graphoanalytical models of organizational-business and industrial-technological processes in terms of "Node-Function-Object". The described approach makes it possible to distribute known system-wide regularities into three groups: related to the structural properties of systems related to their functional properties and to substantial properties, which justifies the hierarchical dependence between them. Formally, it is shown that the principle of organizational continuity is fulfilled only if the principle of monocentrism is observed, understood broadly. The possibilities of system-object, system-structural, object-oriented approaches and BPMN notation to consider system-wide regularities in graphoanalytical models are investigated.

Conclusions:

the authors concluded that the system-object approach "Node-Function-Object" allows to take into account from one position the existing system-wide laws and principles to a greater extent than other approaches. That, in turn, opens up new prospects for simulation of processes and systems, namely: the processes of adaptation and evolution of systems.

Key words:

system approach "Node-Function-Object", general-regular regularities, graphoanalytical modeling.

Введение

В настоящее время при моделировании сложных систем (организационно-деловых и производственно-технологических процессов) широко применяются различные графические языки, например, средства системно-структурного или системно-функционального анализа DFD, IDEF0, IDEF3; средство объектного анализа UML; нотация BPMN (гибрид UML и IDEF3). Хотя эти средства/языки часто позиционируются как средства системного анализа, в их документации и примерах их использования не отмечаются возможности и последствия учета, так называемых, общесистемных закономерностей [1], большинство из которых были установлены во времена бурного развития системных исследований. В рамках традиционной теоретико-множественной теории систем эти закономерности только констатируются и описываются, но не обосновываются с единой позиции концептуальными средствами системного подхода ни по отдельности, ни во взаимодействии между собой [2]. Эти закономерности и их взаимосвязи получили обоснование в рамках системно-объектного подхода «Узел-Функция-Объект» (УФО-подход) [3, 4].

Метод исследования

В рамках УФО-подхода система s представляется в виде специального объекта исчисления объектов Абади-Кардели [5, 6] (называемого нами «узловым объектом»), состоящего из полей и методов:

$$s = [us, fs, Os],$$

где: us –

узел, формально представляет собой поле узлового объекта для описания объектов еще одного специального вида (называемых нами «потокowymi объектами»), соответствующую

- щих множеству функциональных связей данной системы $us \leftrightarrow Ls? \cup Ls!$, где $Ls?$ – множество входящих интерфейсных потоковых объектов, соответствующих входящим связям системы s , $Ls!$ – множество исходящих интерфейсных потоковых объектов, соответствующих исходящим связям системы s . Причем: $Ls? \cup L$ и $Ls! \subset L$, т.е. относятся к множеству всех связей L (потоковых объектов).
- fs** – функция, формально представляет собою метод узлового объекта, описывающий функцию системы s , т.е. процесс преобразования входящих интерфейсных потоковых объектов (входящих связей системы) $Ls?$ в выходящие $Ls!$. Далее, в соответствии с принятой в теории объектов манерой обозначений, метод узлового объекта будем представлять в следующем виде: $fs(Ls?)Ls!$, где **fs** – метод узлового объекта (функция/процесс системы s) с областью определения $Ls?$ и областью значений $Ls!$, соответственно;
- Os** – объект, формально представляющий собою множество полей узлового объекта для описания объектных (субстанциальных) характеристик системы s . Множество полей для описания объектных характеристик системы состоит из трех подмножеств: $Os = Os? \cup Os!$, где $Os?$ – множество полей, которое содержит интерфейсные входные характеристики узлового объекта (системы s), $Os!$ – множество полей, которое содержит интерфейсные выходные характеристики узлового объекта (системы s), Os_f – множество полей, которое содержит передаточные характеристики узлового объекта (системы s).

Таким образом, в полном соответствии с содержательным определением системы как функционального объекта, функция которого обусловлена функцией объекта более высокого яруса (т.е. надсистемы) [7], система s , формально представляется в виде следующего выражения:

$$s = [(Ls?, Ls!); fs(Ls?)Ls!; (Os?, Os!, Os_f)].$$

Упомянутое в определении системы явление обуславливания функции системы функцией надсистемы рассматривается как функциональный запрос надсистемы на систему с определенной функцией (внешняя детерминанта системы). Эта детерминанта формально описывается полем us узлового объекта, соответствующего данной системе, т.е. множеством потоковых объектов, соответствующих функциональным связям системы ($Ls?$, $Ls!$). Внешняя детерминанта системы есть причина ее возникновения, цель ее существования и главный определитель ее структурных, функциональных

и субстанциальных свойств. Таким образом, она рассматривается в качестве универсального системообразующего фактора. Функционирование же системы под влиянием внешней детерминанты является ее внутренней детерминантой, так как непосредственно определяет ее внутренние свойства (структурные, функциональные и субстанциальные свойства подсистем). Эта детерминанта формально описывается методом **fs** узлового объекта, соответствующего данной системе, т. е. в следующем виде: **fs(Ls?)Ls!**. Кроме того, функционирование системы в соответствии с внешней детерминантой устанавливает между системой и надсистемой отношение поддержания функциональной способности более целого. Таким образом, можно уточнить формальное выражение для принятого определения системы следующим образом:

$$s = [us \Rightarrow fs \Rightarrow Os] \text{ и } [(Ls?, Ls!) \Rightarrow fs(Ls?)Ls! \Rightarrow (Os?, Os!, Osf)].$$

Процесс приближения внутренней детерминанты (**fs(Ls?)Ls!**) системы к ее внешней детерминанте (**Ls? $\cup$ Ls! $\leftrightarrow$ us**) представляет собой адаптацию системы к запросу надсистемы [7]. Полностью адаптированной считается система, у которой внутренняя детерминанта полностью соответствует внешней, т. е. **fs $\leftrightarrow$ us**. Такая система функционирует в полном соответствии с функциональным запросом надсистемы. Сама адаптация представляет собой процесс приближения текущего функционирования системы к требуемому, т. е. **fs_{тек} $\rightarrow$ fs $\leftrightarrow$ us**. Узел **us** определяет область определения и область значений функции (**Dfs = Ls?** и **Efs = Ls!**) системы **s**. Параметры преобразования/отображения **fs:Ls? $\rightarrow$ Ls!** определяются объективными характеристиками **Os** системы **s**, задающими конкретные параметры приема системой входных потоков (**Os?**), параметры выполнения процесса **fs** (**Osf**) и параметры выдачи системой выходных потоков (**Os!**). Таким образом, приближение **fs_{тек}** к **fs** обусловлено соответствующим изменением **Os = Os? $\cup$ Os! $\cup$ Osf**.

Для анализа возможностей системно-объектного подхода учитывать общесистемные закономерности необходимо эти закономерности описать, используя приведенные выше понятия.

Результаты исследования и их обсуждение

Структурные (узловые) закономерности систем.

Принцип коммуникативности (система связана множеством коммуникаций с окружающей средой). В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается, в первую очередь, на контекстной диаграмме в виде функциональных (внешних) связей системы, которые далее замыкаются через внутренние (поддерживающие) связи данной системы на диаграммах декомпозиции разного уровня. Системно-объектный подход требует обязательного наличия хотя бы одного входа и, хотя бы одного выхода у любой системы на любом уровне иерархии.

Системно-структурные (системно-функциональные) средства графоаналитического моделирования также обеспечивают учет принципа коммуникативности на контекстной диаграмме. Однако, для диаграмм декомпозиции существуют оговорки. Например, системы, представляемые своими процессами, в IDEF0 и IDEF3 могут не иметь входных связей [8]. Объектно-ориентированные средства моделирования учитывают данный принцип с точки зрения контекста в некоторой степени только на диаграмме вариантов использования в виде связей с акторами. При этом не все из них являются потоковыми объектами и нет обязательного требования наличия и входа, и выхода [9]. Нотация BPMN вообще не предусматривает контекстного уровня описания системы и представляемые на BPD диаграммах связи так же, как и в языке UML, могут не представлять входных и выходных потоков моделируемых систем [10].

Принцип иерархичности (система на любом ярусе иерархии является частью системы более высокого яруса, т.е. надсистемы). Данный принцип работоспособен только при выполнении принципа коммуникативности, что хорошо согласуется с содержательной трактовкой этих принципов в терминах системно-объектного подхода [3]. В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода [11, 12] данный принцип учитывается в виде иерархии диаграмм декомпозиции произвольного числа уровней.

Системно-структурные средства графоаналитического моделирования также обеспечивают учет принципа иерархичности в виде иерархии диаграмм. Объектно-ориентированные средства моделирования учитывают данный принцип только для так называемых внешних систем (систем-классов) в виде диаграммы классов. Для систем-явлений (объектов) данный принцип не учитывается. Нотация BPMN предусматривает только три уровня иерархии, т.е. не учитывает данный принцип в полном объеме.

Принцип моноцентризма (по Богданову [13]: устойчивая система обладает одним центром). С точки зрения авторов, трактующих данный принцип более широко [14], принцип моноцентризма работоспособен только при выполнении принципа иерархичности, что также хорошо согласуется с содержательной трактовкой этих принципов. В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается в виде контекстной диаграммы с одной системой.

Системно-структурные средства графоаналитического моделирования также обеспечивают учет принципа моноцентризма в виде контекстной диаграммы с одним процессом. Объектно-ориентированные средства моделирования, как и нотация BPMN данный принцип не учитывают.

Принцип организационной непрерывности (констатирует факт наличия между всякими двумя системами звеньев, вводящих их в одну «цепь ингрессии»). Используя упомянутые выше термины и обозначения данный принцип можно представить в виде следующего выражения: $\forall (us_i \wedge us_j) \exists L_{ij}; L_{ij} \in (Ls_i \wedge Ls_j)$, где us_i – узел системы s_i ; us_j – узел системы s_j ; L_{ij} – множество (цепочка) связей между s_i и s_j ; Ls_i – множество связей s_i ; Ls_j – множество связей s_j . Можно показать, что данный принцип, также установленный Богдановым [13], выполняется только в условиях моноцентризма, понимаемого расширенно [14], т.е.: $\forall (us_i \wedge us_j) \exists L_{ij}; L_{ij} \in (Ls_i \wedge Ls_j) \Leftrightarrow \forall us_i \wedge \exists! us^*$.

Пусть система s_i является частью иерархии систем так, что: $us_i \in us^{i_1} \in us^{i_2} \in us^{i_3} \in \dots \in us^n$, т.е. самый верхний уровень данной иерархии представляет собой систему s^n . Система s_j является частью иерархии систем так, что: $us_j \in us^{j_1} us^{j_2} \in us^{j_3} \in \dots \in us^m$, т.е. самый верхний уровень данной иерархии представляет собой систему s^m . Допустим, что $\forall us \exists ! us^*: us^* \ni us$ не верно (принцип моноцентризма не выполняется), т.е. $us^n \notin us^*$ и $us^m \notin us^*$. Тогда $\forall (us_i \wedge us_j): Ls_i \cap Ls_j = \emptyset$ Следовательно, L_{ij} не является множеством связей между всякими двумя системами, т.е. принцип организационной непрерывности не выполняется. Полученный вывод можно рассматривать как дополнительный аргумент в пользу расширенного понимания моноцентризма.

В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается путем прослеживания связей между системами в рамках всей модели.

Системно-структурные средства графоаналитического моделирования также обеспечивают учет данного принципа путем прослеживания в модели связей между процессами. Объектно-ориентированные средства моделирования позволяют проследить связи только в рамках одного прецедента, так как прецеденты зачастую не связаны между собой. Нотация BPMN обеспечивает учет данного принципа путем прослеживания связей в рамках одной BPD-диаграммы.

Принцип обратной связи (устойчивость в сложных динамических системах достигается за счёт замыкания петель обратных связей). Данный принцип работоспособен только при выполнении принципа коммуникативности, что также хорошо согласуется с содержательной трактовкой этих принципов. В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается в виде двухсторонних связей и на контекстной диаграмме, и на диаграммах декомпозиции в соответствии с правилом замкнутости, входящим в концепцию системной теории, основанной на системно-объектном подходе [4].

Системно-структурные средства графоаналитического моделирования и нотация BPMN также обеспечивают учет данного принципа в виде двухсторонних связей. Объектно-ориентированные средства моделирования данный принцип не учитывают.

Принцип внешнего дополнения (восходящие к системному центру воздействия координируемых элементов подвергаются своеобразному «обобщению», а нисходящие от системного центра координационные импульсы подвергаются «специфицированию» в зависимости от характера локальных процессов за счет обратных связей от этих процессов). Данный принцип работоспособен только при выполнении принципа иерархичности с учетом принципа обратной связи. В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается возможностью содержательной декомпозиции материальных и информационных потоков при декомпозиции

процессов и объектов, поскольку в концепцию системно-объектного подхода входит содержательная категориальная классификация потоков связей [14].

Системно-структурные средства графоаналитического моделирования также обеспечивают учет данного принципа в виде возможности содержательной декомпозиции материальных и информационных потоков, но содержательная классификация потоков не определена. Объектно-ориентированные средства моделирования и нотация BPMN данный принцип не учитывают, так как не рассматривают связи как потоки объектов.

Принцип взаимно-дополнительных соотношений/комплиментарности (устойчивость системы достигается взаимно-дополнительными связями между её элементами в виде замкнутых контуров обратных связей). Данный принцип работоспособен только при выполнении принципа обратной связи. По сути дела, это один и тот же принцип. По мнению авторов, принцип обратной связи следует рассматривать как потенциальную возможность существования обратных связей, а принцип комплиментарности как реализацию (экстенцию) такой возможности для обеспечения устойчивости системы. В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается, как принцип обратной связи, в виде двухсторонних связей и на контекстной диаграмме, и на диаграммах декомпозиции в соответствии с правилом замкнутости, входящим в концепцию системной теории, основанной на системно-объектном подходе [4].

Системно-структурные средства графоаналитического моделирования и нотация BPMN также обеспечивают учет данного принципа в виде двухсторонних связей. Объектно-ориентированные средства моделирования данный принцип не учитывают.

Функциональные закономерности систем.

Гипотеза семиотической непрерывности (система есть образ её среды, т.е. система как элемент окружающей среды отражает некоторые существенные ее свойства). Согласно системно-объектного подхода главной составляющей среды, окружающей систему, является ее надсистема. Эта надсистема «отображает» свою функциональность на функциональность системы с помощью функционального запроса на систему с определенной функцией (внешней детерминанты) и, таким образом, система своим функционированием (внутренней детерминантой) «отражает» некоторые функциональные (т.е. самые существенные) свойства своей надсистемы. При этом функциональный запрос надсистемы (внешняя детерминанта системы) представляет собой набор связей запрашиваемой системы с другими системами, т.е. узел данной системы. Данное представление семиотической непрерывности позволяет рассматривать данную закономерность не как гипотезу, а как основу всех общесистемных закономерностей, связанных с функциональными характеристиками систем. Очевидно, что гипотеза семиотической непрерывности справедлива только при выполнении принципа иерархичности. В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается таким образом, что функциональный запрос надсистемы к системе (т.е. самое существенное ее свойство) отображается в виде требуемых функциональных связей системы, т.е. в виде узла, на любом уровне иерархии.

Системно-структурные средства графоаналитического моделирования также обеспечивают учет данного принципа в виде требуемых функциональных связей процессов на различных уровнях иерархии, представляющих собой результат функционирования процесса на вышестоящем уровне. Объектно-ориентированные средства моделирования данный принцип могут учесть только на единственной диаграмме вариантов использования в виде связей с акторами. Нотация BPMN данные принцип не учитывает.

Принцип прогрессирующей механизации (части системы в ходе ее развития специализируются или становятся фиксированными по отношению к определенным функциям или механизмам). Данный принцип работоспособен только при условии справедливости гипотезы семиотической непрерывности. В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается таким образом, что подсистемы на диаграммах декомпозиции любого уровня возникают как следствия существования граничных связей, т.е. связей верхнего уровня иерархии.

Системно-структурные средства графоаналитического моделирования также обеспечивают учет данного принципа таким образом, что подпроцессы на различных уровнях иерархии возникают как следствия существования граничных связей вышестоящего уровня. Объектно-ориентированные средства моделирования данный принцип не учитывают. Нотация BPMN может учесть данный принцип только до третьего уровня вложенности.

Принцип актуализации функций (объект выступает как организованный лишь в том случае, если свойства его частей (элементов) проявляются как функции сохранения и развития этого объекта), работающий аналогично принципу самоорганизации (процесс поступательной функционализации элементов системы). Данный принцип и принцип прогрессирующей механизации описывают одно и то же явление функционального соответствия элементов системы разного уровня иерархии, но с разных сторон: прогрессирующая механизация – с верха в низ, актуализация функций – с низу в верх. Соответственно данный принцип работает только при выполнении предыдущего, так как существование любой системы обусловлено функциональным запросом надсистемы на систему с определенной функцией. В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается таким образом, что подсистемы на иерархии диаграмм любого уровня декомпозиции являются поддерживающими частями систем верхнего уровня.

Системно-структурные средства графоаналитического моделирования также обеспечивают учет данного принципа таким образом, что подпроцессы на различных уровнях иерархии поддерживают функционирование процесса на вышестоящем уровне. Объектно-ориентированные средства моделирования данный принцип не учитывают. Нотация BPMN может учесть данный принцип только до третьего уровня вложенности.

Закон иерархических компенсаций (в системе рост разнообразия на верхнем уровне иерархии обеспечивается его ограничением на более низких уровнях) и закон необходимого разнообразия (для создания системы, способной справиться с решением проблемы, обладающей определенным разнообразием, необходимо обеспечить, чтобы система имела большее разнообразие возможностей, чем разнообразие решаемой проблемы). Данные законы работоспособны только при условии выполнения принципа прогрессирующей механизации. Эти две закономерности соотносятся друг с другом также как принципы прогрессирующей механизации и актуализации функций. В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода последние два закона учитываются таким образом, что в модели системы процессы верхнего уровня соответствуют более общим разнообразным функциям. Процессы нижнего уровня соответствуют более специальным ограниченным функциям.

Таким же образом учитывают данные законы системно-структурные средства графоаналитического моделирования и нотация BPMN. Объектно-ориентированные средства моделирования данный принцип не учитывают.

Субстанциальными (объектные) закономерности систем.

Принцип совместимости (условием взаимодействия между системами является наличие у них относительной совместимости, то есть относительной качественной и организационной однородности). Данный принцип работоспособен только при условии выполнения принципа организационной и гипотезы семиотической непрерывности. В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается установленными правилами системной композиции, базовой иерархией связей и классификацией узлов [3].

Принцип эквифинальности (способность системы достигать состояния, которое не зависит от времени и начальных условий, а зависит только от параметров системы). При этом узловая характеристика системы **us** рассматривается как ее важнейший параметр, т.к. представляет собой функциональный запрос надсистемы, определяющий причину и смысл существования данной системы. Данный принцип работоспособен только при условии выполнения принципа самоорганизации, т.е. «эквифинальное» состояние достигается за счет поступательной функционализации элементов системы, направляемой ее внешней детерминантой **us**. В процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода данный принцип учитывается в виде диаграмм декомпозиции, состояние которых зависит только от контекстных диаграмм, отображающих функциональный запрос на систему с определенной функцией. Закон минимума (устойчивость системы определяется устойчивостью ее самого слабого звена). По мнению авторов, устойчивость системы в значительной степени зависит от того насколько данная система адаптирована к запросу надсистемы. Таким образом, устойчивая система **s** – это система, для которой: $Os \leftrightarrow fs(Ls?)Ls! \leftrightarrow us$, т.е. система, полностью адаптированная к запросу надсистемы. Степень устойчивости **s** определится степенью адаптированности/устойчивости s_j , которая представляет собой самое слабое звено, так s_j не до конца адаптирована к функциональному запросу

су со стороны s . Данный закон работоспособен только при условии выполнения принципа самоорганизации, так как именно за счет механизма самоорганизации происходит адаптация элементов системы к их функциональным запросам. Учет данного принципа в процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода обеспечивается возможностью описания процесса адаптации системы к запросу надсистемы за счет изменения объектных характеристик.

Закон расхождения (различные части однородной системы подвержены действию сил, различающихся по качеству и величине, вследствие чего они изменяются различно) и ему противоположный закон опыта (единообразное воздействие на некоторое множество элементов уменьшает разнообразие состояний этого множества). Эти законы работоспособны только при условии выполнения принципа прогрессирующей механизации при разных (или одинаковых) функциональных запросах к разным системам. Учет данных законов в процессе графоаналитического моделирования средствами УФО-подхода обеспечивается возможностью описания процесса адаптации системы к запросу надсистемы за счет изменения объектных характеристик.

В стандарты системно-структурного, объектно-ориентированного графоаналитического моделирования и нотацию BPMN учет субстанциальных закономерностей не заложен.

Выводы

Исследованы возможности системно-объектного, системно-структурного (системно-функционального), объектно-ориентированного подходов и нотации BPMN учитывать общесистемные закономерности в графоаналитических моделях. Показано, что подход «Узел–Функция–Объект» [15, 16], позволяет это делать в большей степени, чем другие подходы.

Благодарность: **Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-07-00356а.**

Библиографический список

1. Общая теория систем URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Общая_теория_систем (20.04.2018).
2. Прангишвили И.В. Системный подход и общесистемные закономерности. М.: СИНТЕГ, 2000.
3. Маторин С.И., Зимовец О.А., Жихарев А.Г. Общесистемные принципы в терминах системно-объектного подхода «Узел-Функция-Объект» // Труды ИСА РАН. 2016. №1. Т. 66. С. 10-17.
4. Sergey I. Matorin, Aleksandr G. Zhikharev Calculation of The Function Objects as The Systems Formal Theory Basis // Advances in Intelligent Systems and Computing 679, pp. 182-191.
5. Abadi Martin and Luca Cardelli A Theory of Objects. Springer-Verlag. 1996.

6. Zhikharev, A.G., Matorin, S.I., Zaitseva, N.O. About perspectives of simulation technological processes functioning with using system-object approach node-function-object // International Journal of Applied Engineering Research, 10(12), pp. 31363-31370.
7. Мельников Г.П. Системология и языковые аспекты кибернетики. М.: Сов.радио, 1978.
8. Черемных С.В., Семёнов И.О., Ручкин В.С. Моделирование и анализ систем: IDEF-технологии: практикум. М.: Финансы и статистика, 2006.
9. Буч Г., Рамбо Д., Джекобсон А. Язык UML. Руководство пользователя / Пер. с англ. М.: ДМК, 2000.
10. Выдержки из перевода спецификации к нотации BPMN компании DIRECTUM [Электронный ресурс]. URL: <http://www.DIRECTUM-Journal.ru/docs/1624827.html>.
11. Matorin, S.I., Zimovets, O.A., Zhikharev, A.G. The elements of general theory of the systems in terms of system-object approach of «unit-function-object» // International Journal of Applied Engineering Research 10(24), pp. 44831-44837.
12. Zhikharev, A.G., Matorin, S.I., Kuprieva, I.A., Kulumbaev, E.B., Smirnova, S.B. The language of the description of the functional objects // Journal of Engineering and Applied Sciences, 12(Special issue 6), pp. 7859-7864.
13. Богданов А.А. Тектология: Всеобщая организационная наука. Сост., предисловие и комментарии Г.Д. Гловели, послесловие В.В. Попкова. М.: Финансы, 2003.
14. Маторин С.И., Соловьева Е.А. Детерминантная модель системы и системологический анализ принципов детерминизма и бесконечности мира // HTI. Сер. 2. 1996. N8. С. 1-8.
15. Matorin, S.I., Zhikharev, A.G., Korchagina, K.V., Saitseva, T.V. About the development of new tools system-object simulation process and traffic // International Journal of Applied Engineering Research. 10 (24), pp. 45292-45296.
16. Zhikharev A.G., Matorin S.I., Zimovets O.A., Zhikhareva M.S., Rakov V.I. The simulation modeling of systems taking into account their internal parameters change // International Journal of Pharmacy & Technology, vol. 8 (4), pp. 26933-26945.

References

1. Obshhaya teoriya sistem URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Obshhaya_teoriya_sistem (20.04.2018) (General theory of systems. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/General_theory_systems (04/20/2018)).
2. Prangishvili I.V. Sistemnyj podkhod i obshhesistemnye zakonomernosti. M.: SINTEG, 2000 (Prangishvili I.V. System approach and system-wide regularities. Moscow: SYNTHEG, 2000)
3. Matorin S.I., Zimovets O.A., Zhikharev A.G. Obshhesistemnye printsipy v terminakh sistemno-ob"ektного podkhoda «Uzel-Funktsiya-Ob"ekt» // Trudy ISA RAN. 2016. №1. Tom 66. S. 10-17 (Matorin SI, Zimovets OA, Zhikharev AG System-wide principles

- in terms of the system-object approach "Node-Function-Object" // Proceedings of the ISA RAS. 2016. №1. Volume 66. P. 10-17).
4. Sergey I. Matorin, Aleksandr G. Zhikharev Calculation of The Function Objects as The Systems Formal Theory Basis // Advances in Intelligent Systems and Computing 679, pp. 182-191.
 5. Abadi Martin and Luca Cardelli A Theory of Objects. Springer-Verlag. 1996.
 6. Zhikharev, A.G., Matorin, S. I., Zaitseva, N.O. About the perspectives of the simulation technology processes using the system-object approach node-function-object // International Journal of Applied Engineering Research, 10 (12), pp. 31363-31370
 7. Mel'nikov G.P. Sistemologiya i yazykovye aspekty kibernetiki. M.: Sov.radio, 1978 (Melnikov G.P. Systemology and linguistic aspects of cybernetics. Moscow: Sov.radio, 1978)
 8. ChErernnykh S.V., Semyonov I.O., Ruchkin V.S. Modelirovanie i analiz sistem: IDEF-tekhnologii: praktikum. M.: Finansy i statistika, 2006 (Cheremnykh SV, Semenov IO, Ruchkin VS Modeling and analysis of systems: IDEF-technologies: practical. Moscow: Finances and Statistics, 2006).
 9. Buch G., Rambo D., Dzhekbson A. YAzyk UML. Rukovodstvo pol'zovatelya / Per. s angl. M.: DMK, 2000 (Buch G., Rambo D., Jacobson A. Language of the UML. User's Manual. with English. Moscow: DMK, 2000)
 10. Vyderzhki iz perevoda spetsifikatsii k notatsii BPMN kompanii DIRECTUM [EHlektronnyj resurs]. URL: <http://www.DIRECTUM-Journal.ru/docs/1624827.html> (Extracts from the translation of the specification to BPMN notation from DIRECTUM [Electronic resource]. - URL: <http://www.DIRECTUM-Journal.ru/docs/1624827.html>)
 11. Matorin, S.I., Zimovets, O.A., Zhikharev, A.G. The elements of the general theory of the systems in terms of the system-object approach of the "unit-function-object" // International Journal of Applied Engineering Research 10 (24), pp. 44831-44837
 12. Zhikharev, A.G., Matorin, S.I., Kuprieva, I.A., Kulumbaev, E.B., Smirnova, S.B. The Journal of Engineering and Applied Sciences, 12 (Special issue 6), pp. 7859-7864
 13. Bogdanov A.A. Tektologiya: Vseobshhaya organizatsionnaya nauka. Sost., predislovie i kommentarii G.D. Gloveli, posleslovie V.V. Popkova. M.: Finansy, 2003 (Bogdanov AA Tectology: General Organizational Science. Comp., Foreword and Commentary G.D. Gloveli, afterword of V.V. Popkov. Moscow: Finance, 2003)
 14. Matorin S.I., Solov'eva E.A. Determinantnaya model' sistemy i sistemologicheskij analiz printsipov determinizma i beskonечnosti mira // NTI. Ser. 2. 1996. N8. S. 1-8 (Matorin SI, Solovyova EA The determinant model of the system and the systemological analysis of the principles of determinism and the infinity of the world // STI. Ser. 2. 1996. N8. Pp. 1-8)
 15. Matorin, S.I., Zhikharev, A.G., Korchagina, K.V., Saitseva, T.V. About the development of new tools system-object simulation process and

traffic // International Journal of Applied Engineering Research. 10 (24), pp. 45292-45296

16. Zhikharev A.G., Matorin S.I., Zimovets O.A., Zhikhareva M.S., Rakov V.I. The International Journal of Pharmacy & Technology, vol. 8 (4), pp. 26933-26945

**Рукопись поступила в редакцию: 26.07.2018,
принята к публикации 26.08.2018**

Об авторах

Маторин Сергей Игоревич, доктор технических наук, профессор, Researcher ID – 0, Scopus ID-6602150407, профессор кафедры информационных систем и технологий Белгородского университета кооперации, экономики и права, Телефон: 8 (4722) 26-38-31, E-mail: matorin@bsu.edu.ru

Белов Сергей Павлович, доктор технических наук, профессор, Researcher ID – A-6008-2014, Scopus ID – 56402764300, профессор кафедры организации и технологии защиты информации Белгородского университета кооперации, экономики и права, Телефон: 8 (4722) 26-38-31, E-mail: belovssergei@gmail.com

Жихарев Александр Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, Researcher ID - L-6141-2016, Scopus ID – 56736375800, доцент кафедры информационных и робототехнических систем Белгородского государственного национального исследовательского университета. Телефон: 8 (4722) 30-13-76, E-mail: zhikharev@bsu.edu.ru

About author

Matorin Sergey Igorevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Researcher ID - 0, Scopus ID – 6602150407, Chair of Information Systems and Technologies, Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, Phone: 8 (4722) 26-38-31, E-mail: matorin@bsu.edu.ru

Belov Sergey Pavlovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Researcher ID - A-6008-2014, Scopus ID – 56402764300, Chair of Organization and Information Security Technologies, Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, Phone: 8 (4722) 26-38-31, E-mail: belovssergei@gmail.com

Zhikharev Alexander Gennadievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Researcher ID - L-6141-2016, Scopus ID – 56736375800, Associate Professor of the Information Department and robotic systems of Belgorod State National Research University, Phone: 8 (4722) 30-13-76, E-mail: zhikharev@bsu.edu.ru

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ, ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
И ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ**

УДК 517.957

Редькина Т.В.

Северо-Кавказский федеральный университет,
г. Ставрополь, Россия. TVR59@mail.ru

**ПОСТРОЕНИЕ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ
ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ,
СВЯЗАННЫХ С ОПЕРАТОРОМ
РАССЕЯНИЯ ДИРАКА**

Введение:

проблема интегрируемости нелинейных уравнений в частных производных даже для второго порядка не всегда является очевидным фактом, так как нахождение общего решения возможно только в редких случаях. Доказательство интегрируемости можно обосновать разными способами: с помощью получения большого числа частных решений, сведение к какой-нибудь точно решаемой редукции, а так же построение бесконечного числа первых интегралов.

**Материалы
и методы
исследований:**

использованы методы теории солитонов для уравнений обладающих парой Лакса. Для построения законов сохранения используется уравнение изоспектральной деформации с самосопряженным дифференциальным оператором Дирака первого и второго рода. При условии, что функции, входящие в коэффициенты, имеют быстро убывающий характер решение представлено в виде ряда, разложенного по отрицательным степеням спектрального параметра.

**Результаты
исследования:**

Исследованы уравнения на собственные значения с операторами Дирака первого и второго рода. Найдено счетное число первых интегралов. Приведены примеры нелинейных уравнений в частных производных, полученных с помощью операторного уравнения нулевой кривизны, у которых оператор рассеяния совпадает с оператором Дирака. Доказано, что такие уравнения обладают счетным числом первых интегралов.

**Обсуждение и
заключения:**

автором сделан вывод, что среди полученных законов сохранения присутствует Гамильтониан, все интегралы движения находятся в инволюции относительно скобок Пуассона. Это говорит о том, что нелинейные уравнения в частных производных являются гамильтоновыми, что приводит к их полной интегрируемости.

Ключевые слова:

оператор Дирака, уравнение изоспектральной деформации, нелинейные уравнения в частных производных, интегралы движения, уравнение Гамильтона, скобки Пуассона, первые интегралы, законы сохранения.

Redkina T.V.

North-Caucasian Federal University, Stavropol, Russia

**CONSTRUCTION OF CONSERVATION LAWS
FOR NONLINEAR EQUATIONS CONNECTED WITH
THE DIRAC SCATTERING OPERATOR**

- Introduction:** the problem of integrability of nonlinear partial differential equations, even for the second order, is not always an obvious fact, since finding a general solution is possible only in rare cases. The proof of integrability can be justified in many ways: by obtaining a large number of particular solutions, reducing to some exactly solvable reduction, and also constructing an infinite number of first integrals.
- Materials and methods of research:** methods of the theory of solitons for equations possessing a Lax pair were used. To construct the conservation laws, we use the equation of isospectral deformation with a self-adjoint differential Dirac operator of the first and second kind. Under the condition that the functions occurring in the coefficients have a rapidly decreasing nature, the solution is represented in the form of a series expounded in negative powers of the spectral parameter.
- Results of the study:** Eigenvalue equations with Dirac operators of the first and second kind are investigated. A countable number of first integrals is found. Examples of nonlinear partial differential equations obtained with the help of an operator equation of zero curvature are given for which the scattering operator coincides with the Dirac operator. It is proved that such equations have a countable number of first integrals.
- Discussion and conclusion:** the author concluded that among the conservation laws obtained there is a Hamiltonian, all integrals of the motion are in involution with respect to the Poisson brackets. This suggests that nonlinear partial differential equations are Hamiltonian, which leads to their complete integrability. **Key words:** Dirac operator, equation of isospectral deformation, nonlinear partial differential equations, integrals of motion, Hamilton's equation, Poisson brackets, first integrals, conservation laws.

Введение

Для нелинейных уравнений в частных производных не существует классификации, позволяющей сказать, интегрируемо оно или нет. Теория солитонов [3, 4, 5], рассматривающая модели, обладающие операторной парой Лакса, имеет богатый арсенал доказательств интегрируемости: метод обратной задачи рассеяния, метод Пенлеве, обладание счетным числом законов сохранения и др.

В силу следствий из теоремы Лакса все собственные значения λ самосопряженного оператора L являются интегралами движения [1, 2]. Рассмотрим возможность построения законов сохранения, используя уравнение

изоспектральной деформации с оператором Дирака первого и второго рода

$$L_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} + \begin{pmatrix} q_1(x, t) & 0 \\ 0 & q_2(x, t) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$L_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} + \begin{pmatrix} q_1(x, t) & q_2(x, t) \\ q_2(x, t) & -q_1(x, t) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $q_1(x, t), j = 1, 2$ – некоторые непрерывные функции, заданные на компактном носителе $[a, b]$ (в общем случае носитель может быть как ограниченным так и $[-\infty, +\infty]$).

Материалы и методы исследований

Рассмотрим уравнение на собственные значения сначала для оператора первого типа

$$\text{т. е.} \quad \left[\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} + \begin{pmatrix} q_1(x, t) & 0 \\ 0 & q_2(x, t) \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \varphi_1(x, \lambda) \\ \varphi_2(x, \lambda) \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} \varphi_1(x, \lambda) \\ \varphi_2(x, \lambda) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $\lambda - \text{const}$ – спектральный параметр,

$(\varphi_1(x, \lambda), \varphi_2(x, \lambda))^T$ – собственная вектор-функция (T – транспонирование).

Матричная запись (3) эквивалентна системе двух линейных уравнений

$$\begin{aligned} \varphi_{2x} + q_1(x, t)\varphi_1 &= \lambda\varphi_1, \\ q_2(x, t)\varphi_2 - \varphi_{1x} &= \lambda\varphi_2, \end{aligned}$$

которое можно свести к одному уравнению, выполнив дифференцирование и подстановку

$$(\lambda - q_1(x, t))\varphi_{2xx} + q_{1x}(x, t)\varphi_{2x} + (\lambda - q_1(x, t))^2[\lambda - q_2(x, t)]\varphi_2 = 0. \quad (4)$$

Равенство зависит от спектрального параметра λ , поэтому будем искать решение в виде

$$\varphi_2 = e^{i\lambda x + \Phi(x, t, \lambda)}, \quad (5)$$

где $\Phi(x, t, \lambda)$ – неизвестная функция, удовлетворяющая уравнению (4)

$$\varphi_{2x} = e^{i\lambda x + \Phi(x, t, \lambda)}(i\lambda + \Phi_x(x, t, \lambda)), \quad (6)$$

$$\varphi_{2xx} = e^{i\lambda x + \Phi(x, t, \lambda)}[(i\lambda + \Phi_x(x, t, \lambda))^2 + \Phi_{xx}(x, t, \lambda)], \quad (7)$$

Подставляя эти значения в (4), сокращая на φ_2 , получим:

$$(\lambda - q_1(x, t))[(i\lambda + \Phi_x)^2 + \Phi_{xx}] + q_{1x}(x, t)(i\lambda + \Phi_x) + (\lambda - q_1(x, t))^2[\lambda - q_2(x, t)] = 0.$$

Распишем полученное нелинейное соотношение по степеням параметра λ :

$$\begin{aligned} \lambda^2 [2i\Phi_x - q_1(x, t) - q_2(x, t)] + \lambda [\Phi_{xx} + \Phi_x^2 + q_1^2(x, t) + 2q_2(x, t)q_1(x, t) + iq_{1x}(x, t) - \\ - 2iq_1(x, t)\Phi_x] + q_{1x}(x, t)\Phi_x - q_1(x, t)\Phi_{xx} - q_1(x, t)\Phi_x^2 - q_2(x, t)q_1^2(x, t) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Равенство не содержит функции $\Phi(x, t, \lambda)$, поэтому решаем полученное уравнение относительно $\Phi_x(x, t, \lambda)$. Представим Φ_x в виде ряда по степеням λ :

$$\Phi_x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{R_n(x, t)}{(2i\lambda)^n}.$$

Подставим это выражение в уравнение (8), так как $\lambda \neq 0$, то уравнение распадается по степеням λ на систему, тогда можно найти R_n из условий:

$$\begin{aligned} \lambda^2 : \quad 2iR_0(x, t) - q_2(x, t) - q_1(x, t) &= 0, \\ R_0(x, t) &= -\frac{i}{2}[q_2(x, t) + q_1(x, t)]; \\ \lambda : \quad R_1(x, t) + R_0^2(x, t) + R_{0x}(x, t) + q_1^2 &+ 2q_1q_2 - 2iR_0(x, t)q_1 + iq_{1x} = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

после подстановки известной функции имеем

$$\begin{aligned} R_1(x, t) - \frac{1}{4}[q_2 + q_1]^2 - \frac{i}{2}[q_{2x} - q_{1x}] + q_1q_2 &= 0, \\ R_1(x, t) &= \frac{1}{4}[q_2 - q_1]^2 + \frac{i}{2}[q_{2x} - q_{1x}], \\ \lambda^0 : \quad \frac{1}{2i}R_2 + \frac{1}{2i}[2R_1R_0 + R_{1x} - 2iR_1q_1] - q_1^2q_2 - R_0^2q_1 - R_{0x}q_1 + R_0q_{1x} &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

из этого равенства можно найти $R_2(x, t)$

$$\begin{aligned} R_2 - i\frac{1}{4}[q_2 - q_1]^2[q_2 + q_1] + q_{2x}q_2 - q_{1x}q_1 + \frac{i}{2}[q_{2xx} - q_{1xx}] &= 0, \\ R_2 &= \frac{i}{4}[q_2 - q_1]^2[q_2 + q_1] - \frac{i}{2}[q_{2xx} - q_{1xx}] - q_{2x}q_2 + q_{1x}q_1, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\lambda^{-1} : \quad R_3 + R_1^2 + 2R_0R_2 + R_{2x} - 2iR_2q_1 + 2iR_1q_{1x} - 4iR_0R_1q_1 - 2iR_{1x}q_1 = 0$$

после подстановки ранее найденных коэффициентов имеем

$$\begin{aligned}
& R_3 + \frac{1}{16}[q_2 - q_1]^2(5q_2^2 + 6q_1q_2 + 5q_1^2) + 2iq_{2x}q_2^2 - 2iq_{1x}q_1^2 - \frac{1}{2}[3q_2 + q_1]q_{2xx} + \\
& + \frac{1}{2}[q_2 + 3q_1]q_{1xx} - \frac{1}{4}(5q_{2x}^2 + 2q_{2x}q_{1x} - 7q_{1x}^2) - \frac{i}{2}[q_{2xxx} - q_{1xxx}] = 0, \\
& R_3 = \frac{i}{2}[q_{2xxx} - q_{1xxx}] - 2iq_{2x}q_2^2 + 2iq_{1x}q_1^2 + \frac{1}{2}[3q_2 + q_1]q_{2xx} - \frac{1}{2}[q_2 + 3q_1]q_{1xx} + \\
& + \frac{1}{4}(5q_{2x}^2 + 2q_{2x}q_{1x} - 7q_{1x}^2) - \frac{1}{16}[q_2 - q_1]^2(5q_2^2 + 6q_1q_2 + 5q_1^2), \\
& \dots \\
& \lambda^{-n}: R_{n+2}(x, t) + \sum_{k=0}^{n+1} R_k R_{n+1-k} + R_{(n+1)x} - 2iq_1 \left(R_{n+1} + \sum_{k=0}^n R_k R_{n-k} + R_{nx} \right) + 2iq_{1x}R_n = 0.
\end{aligned} \quad (12)$$

Из последнего уравнения получим рекуррентную формулу вычисления всех коэффициентов ряда $\Phi_x(x, t, \lambda)$:

$$R_{n+2}(x, t) = 2iR_{n+1}q_1 - \sum_{k=0}^{n+1} R_k R_{n+1-k} + 2iq_1 \sum_{k=0}^n R_k R_{n-k} - R_{(n+1)x} - 2iq_{1x}R_n + 2iR_{nx}q_1. \quad (13)$$

В классе уравнений с локальными решениями, сохраняющиеся величины выражаются в виде пространственных интегралов от подходящих полиномиальных комбинаций $q_j(x, t)$ ($j = 1, 2$) и их производных. Существование этих величин получается как дополнительное следствие того факта, что существуют данные рассеяния, не зависящие от времени. В результате имеем следующие сохраняющиеся величины

$$J_0(x, t) = -\frac{i}{2} \int_a^b [q_2(x, t) + q_1(x, t)] dx, \quad (14)$$

$$J_1(x, t) = \int_a^b \left(\frac{1}{4}[q_2 - q_1]^2 + \frac{i}{2}[q_{2x} - q_{1x}] \right) dx = \frac{1}{4} \int_a^b [q_2 - q_1]^2 dx, \quad (15)$$

$$J_2(x, t) = \frac{1}{2} \int_a^b \left(\frac{i}{2}[q_2 - q_1]^2[q_2 + q_1] - i[q_{2xx} - q_{1xx}] + (q_1^2 - q_2^2)_x \right) dx = \frac{i}{4} \int_a^b [q_2 - q_1]^2 [q_2 + q_1] dx, \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
J_3(x, t) = & \int_a^b \left(\frac{i}{2}[q_{2xxx} - q_{1xxx}] + 2iq_{1x}q_1^2 + \frac{1}{2}[3q_2 + q_1]q_{2xx} - \frac{1}{2}[q_2 + 3q_1]q_{1xx} - \right. \\
& - 2iq_{2x}q_2^2 + \frac{1}{4}(5q_{2x}^2 + 2q_{2x}q_{1x} - 7q_{1x}^2) - \frac{1}{16}[q_2 - q_1]^2(5q_2^2 + 6q_1q_2 + 5q_1^2) \Big) dx = \\
& = -\frac{1}{16} \int_a^b \left(4(q_{2x} - q_{1x})^2 + [q_2 - q_1]^2(5q_2^2 + 6q_1q_2 + 5q_1^2) \right) dx.
\end{aligned} \quad (17)$$

ряд полученных первых интегралов можно продолжить до бесконечности,

$$J_{n+2}(x, t) = \int_a^b \left(2iR_{n+1}q_1 - \sum_{k=0}^{n+1} R_k R_{n+1-k} - R_{(n+1)x} - 2iq_{1x}R_n + 2iR_{nx}q_1 + \right.$$

$$+2iq_1 \sum_{k=0}^n R_k R_{n-k} \Big) dx = \int_a^b \left(2iR_{n+1}q_1 - \sum_{k=0}^{n+1} R_k R_{n+1-k} + 2iq_1 \sum_{k=0}^n R_k R_{n-k} + 4iR_{nx}q_1 \right) dx, \quad (18)$$

таким образом, получаем счетное число законов сохранения. Сформулируем полученный вывод в виде теоремы.

ТЕОРЕМА 1. *Нелинейные уравнения, обладающие парой Лакса с оператором рассеяния Дирака первого рода*

$$L_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} + \begin{pmatrix} q_1(x, t) & 0 \\ 0 & q_2(x, t) \end{pmatrix},$$

обладают счетным числом интегралов движения вида (14) - (18), где R_0, R_1 определяются по формулам (9), (10), а остальные функции по рекуррентной формуле (13).

Аналогичные действия выполним для оператора Дирака второго рода (2)

$$\text{т.е.} \quad \left[\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} + \begin{pmatrix} q_1(x, t) & q_2(x, t) \\ q_2(x, t) & -q_1(x, t) \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \varphi_1(x, \lambda) \\ \varphi_2(x, \lambda) \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} \varphi_1(x, \lambda) \\ \varphi_2(x, \lambda) \end{pmatrix}, \quad \lambda - \text{const},$$

уравнение изоспектральной деформации сводится к системе двух линейных уравнений

$$\begin{aligned} \varphi_{2x} + q_1(x, t)\varphi_1 + q_2(x, t)\varphi_2 &= \lambda\varphi_1, \\ q_2(x, t)\varphi_1 - \varphi_{1x} - q_1(x, t)\varphi_2 &= \lambda\varphi_2. \end{aligned}$$

Систему можно свести к одному уравнению, выполнив дифференцирование и подстановку

$$\begin{aligned} [\lambda - q_1]\varphi_1 &= \varphi_{2x} + q_2\varphi_2, \\ [\lambda - q_1]^2 \varphi_{1x} &= [\lambda - q_1](\varphi_{2xx} + q_{2x}\varphi_2 + q_2\varphi_{2x}) + q_{1x}[\varphi_{2x} + q_2\varphi_2], \\ [\lambda - q_1][q_2^2\varphi_2 - \varphi_{2xx} - q_{2x}\varphi_2] - q_{1x}[\varphi_{2x} + q_2\varphi_2] &= [\lambda - q_1]^2[\lambda + q_1]\varphi_2. \end{aligned} \quad (19)$$

Будем искать решение в виде (5), (6), (7). Подставляя эти значения в (19), сокращая на φ_2 , получим:

$$[\lambda - q_1][q_2^2 - (i\lambda + \Phi_x)^2 - \Phi_{xx} - q_{2x}] - q_{1x}[i\lambda + \Phi_x + q_2] = [\lambda - q_1]^2[\lambda + q_1].$$

Распишем полученное нелинейное соотношение по степеням параметра λ :

$$\begin{aligned}
 & -2i\lambda^2\Phi_x + \lambda(q_2^2 + q_1^2 - \Phi_x^2 - \Phi_{xx} - q_{2x} + 2iq_1\Phi_x - iq_{1x}) - \\
 & -q_1[q_2^2 - \Phi_x^2 - \Phi_{xx} - q_{2x}] - q_{1x}[\Phi_x + q_2] = q_1^3.
 \end{aligned} \quad (20)$$

Равенство не содержит функции $\Phi(x, t, \lambda)$, поэтому решаем полученное уравнение относительно $\Phi_x(x, t, \lambda)$. Будем искать Φ_x в виде степенного ряда по отрицательным степеням $2i\lambda$. Так как в равенстве (20) имеется только один старший член со второй степенью λ , то чтобы ему были подобны необходимо положить, что первый член разложения имеет множитель $(2i\lambda)^{-1}$, поэтому:

$$\Phi_x = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_n(x, t)}{(2i\lambda)^n} \quad (21)$$

Подставим это выражение в уравнение (20)

$$\begin{aligned}
 & \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{i}{2} \frac{R_n(x, t)}{(2i\lambda)^{n-2}} + \frac{1}{(2i\lambda)^{n-1}} \left[q_1 R_n + \frac{i}{2} R_{nx} \right] + \frac{q_1 R_{nx} - q_{1x} R_n}{(2i\lambda)^n} \right) - q_1 [q_2^2 - q_{2x}] + \\
 & + \left[q_1 + (2i\lambda) \frac{i}{2} \right] \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{R_n}{(2i\lambda)^n} \right)^2 - (2i\lambda) \frac{i}{2} [q_2^2 + q_1^2 - q_{2x} - iq_{1x}] - q_{1x} q_2 = q_1^3,
 \end{aligned}$$

так как $\lambda \neq 0$, то уравнение распадается по степеням $2i\lambda$ на систему из которой можно найти R_n .

$$2i\lambda : \quad \frac{i}{2} R_1 - \frac{i}{2} [q_2^2 + q_1^2 - q_{2x} - iq_{1x}] = 0,$$

откуда находим $R_1(x, t)$

$$R_1(x, t) = q_2^2 + q_1^2 - q_{2x} - iq_{1x}. \quad (22)$$

$$(2i\lambda)^0 : \quad \frac{i}{2} R_2 + q_1 R_1 + \frac{i}{2} R_{1x} - q_1 [q_2^2 - q_{2x}] - q_{1x} q_2 = q_1^3,$$

после подстановки ранее найденного значения функции $R_1(x, t)$ остается одна неизвестная функция $R_2(x, t)$

$$\frac{i}{2} R_2 + \frac{i}{2} [2q_2 q_{2x} - q_{2xx} - iq_{1xx}] - q_{1x} q_2 = 0,$$

которая примет вид

$$R_2 = q_{2xx} + iq_{1xx} - 2q_2 [q_{2x} + iq_{1x}]. \quad (23)$$

$$(2i\lambda)^{-1}: \quad \frac{i}{2}R_3 + q_1R_2 + \frac{i}{2}R_{2x} + q_1R_{nx} - q_{1x}R_n + \frac{i}{2}R_1^2 = 0,$$

после подстановки ранее найденных коэффициентов имеем

$$\begin{aligned} R_3 = & 4q_1q_{1x}(q_2 + iq_1) - (q_2 + iq_1)_{xx} + 2q_{2x}(q_2^2 + q_1^2 + [q_2 + iq_1]_x) + \\ & + 2q_2[q_2 + iq_1]_{xx} - (q_2^2 + q_1^2)^2 - q_{2x}^2 - q_{1x}^2. \end{aligned} \quad (24)$$

Замечая общую закономерность, можно записать для любой степени $(2i\lambda)^{-n}$ уравнение системы

$$(2i\lambda)^{-n}: \quad \frac{i}{2}R_{n+2} + q_1R_{n+1} + \frac{i}{2}R_{(n+1)x} + q_1R_{nx} - q_{1x}R_n + \frac{i}{2}\sum_{k=1}^{n+1}R_kR_{n+1-k} + q_1\sum_{k=1}^nR_kR_{n-k} = 0.$$

Из этого уравнения получим рекуррентную формулу вычисления коэффициентов разложения функции $\Phi_x(x, t, \lambda)$ в ряд (21):

$$R_{n+2}(x, t) = 2iq_1\left(R_{n+1} + R_{nx} + \sum_{k=1}^n R_kR_{n-k}\right) - R_{(n+1)x} - 2iq_{1x}R_n - \sum_{k=1}^{n+1} R_kR_{n+1-k}. \quad (25)$$

Для уравнений с быстро убывающими решениями, существует последовательность сохраняющихся величин вида:

$$J_1(x, t) = \int_a^b [q_2^2 + q_1^2 - q_{2x} - iq_{1x}] dx = \int_a^b [q_2^2 + q_1^2] dx, \quad (26)$$

$$J_2(x, t) = \int_a^b (q_{2xx} + iq_{1xx} - 2q_2[q_{2x} - iq_{1x}]) dx = 2i \int_a^b q_2q_{1x} dx, \quad (27)$$

$$\begin{aligned} J_3(x, t) = & \int_a^b (4q_1q_{1x}(q_2 + iq_1) - (q_2 + iq_1)_{xxx} + 2q_{2x}(q_2^2 + q_1^2 + [q_2 + iq_1]_x)) dx + \\ & + \int_a^b [2q_2[q_2 + iq_1]_{xx} - (q_2^2 + q_1^2)^2 - q_{2x}^2 - q_{1x}^2] dx = - \int_a^b [(q_2^2 + q_1^2)^2 + q_{2x}^2 + q_{1x}^2] dx. \end{aligned} \quad (28)$$

Ряд полученных первых интегралов можно продолжить до бесконечности,

$$\begin{aligned} J_{n+2}(x, t) = & \int_a^b \left(2iq_1 \left(R_{n+1} + R_{nx} + \sum_{k=1}^n R_kR_{n-k} \right) - R_{(n+1)x} - 2iq_{1x}R_n - \sum_{k=1}^{n+1} R_kR_{n+1-k} \right) dx = \\ = & \int_a^b \left(2iq_1 \left(R_{n+1} + R_{nx} + \sum_{k=1}^n R_kR_{n-k} \right) - 2iq_{1x}R_n - \sum_{k=1}^{n+1} R_kR_{n+1-k} \right) dx, \end{aligned} \quad (29)$$

таким образом, получаем счетное число законов сохранения. Сформулируем полученный вывод в виде теоремы.

ТЕОРЕМА 2. *Нелинейные уравнения, обладающие парой Лакса с оператором рассеяния Дирака (2), обладают счетным числом интегралов движения вида (26)–(29), где R_1, R_2 определяются по формулам (22), (23), а остальные функции по рекуррентной формуле (25).*

В качестве примера рассмотрим нелинейное уравнение в частных производных [6]

$$p_{xxt}p - p_x p_{xt} = 4p^3 p_t, \quad (30)$$

имеющее операторную структуру нулевой кривизны $L_{1t} - A_x + [L_1, A] = 0$ с операторами $L_1 - (1)$ и A вида

$$A = \frac{1}{4\lambda} \begin{pmatrix} -2p_t & p^{-1}p_{xt} \\ -p^{-1}p_{xt} & 2p_t \end{pmatrix},$$

где $p(x, t)$ – некоторая функция,
 λ – произвольный параметр.

СЛЕДСТВИЕ 1. Нелинейное уравнение (30) обладает счетным числом законов сохранения

$$I_1(x, t) = \int_a^b p^2(x, t) dx; \quad (31)$$

$$I_3(x, t) = -\int_a^b [p^4(x, t) + p_x^2] dx; \quad (32)$$

$$I_{2n+3}(x, t) = -\int_a^b \left(2ip[R_{2n+2} + \sum_{k=1}^{2n} R_k R_{2n+1-k} + 2R_{(2n+1)x}] + \sum_{k=1}^{2n-1} R_k R_{2n+2-k} \right) dx, \quad (33)$$

где многочлены $R_n(x, t)$ определяются по формулам

$$R_1(x, t) = p^2(x, t) + ip_x(x, t); \quad R_2(x, t) = -ip_{xx}(x, t); \quad (34)$$

$$R_{n+2}(x, t) = 2i[p_x R_n - R_{n+1}p - p \sum_{k=1}^{n-1} R_k R_{n-k} - R_{nx}p] - \sum_{k=1}^n R_k R_{n+1-k} - R_{(n+1)x}. \quad (35)$$

Доказательство. Для построения уравнения (30), использовался частный случай самосопряженного оператора Дирака первого рода, когда $q_2(x, t) = -q_1(x, t) = p(x, t)$. В результате уравнение (4) примет простой вид

$$[\lambda + p(x, t)]\varphi_{2xx} - p_x(x, t)\varphi_{2x} - [\lambda + p(x, t)]^2(p(x, t) - \lambda)\varphi_2 = 0. \quad (36)$$

После подстановки в (8) значения (6), (7) и расписывая по степеням λ функцию $\Phi_x(x, t, \lambda)$, получаем (34), (35). Проинтегрировав полу-

ченные коэффициенты находим: для четных значений n подынтегральные выражения образуют полную производную и поэтому обращаются в нуль, а нечетные дают законы сохранения (31) – (33).

Вторым примером может служить нелинейное уравнение в частных производных [6, 7]

$$\bar{p}_t - ip_{xx} + 2ip(p^2 + \bar{p}^2) = 0, \quad (37)$$

имеющее операторную структуру нулевой кривизны

$L_{2t} - A_x + [L_2, A] = 0$ с операторами L_2 – (2) и A вида

$$A = i \begin{pmatrix} -\bar{p}_x - 2p\lambda & p_x + p^2 + \bar{p}^2 - 2\bar{p}\lambda + 2\lambda^2 \\ p_x - p^2 - \bar{p}^2 - 2\bar{p}\lambda - 2\lambda^2 & \bar{p}_x + 2p\lambda \end{pmatrix},$$

где $q_1(x, t) = \bar{q}_2(x, t) = p(x, t)$ – комплекснозначная функция, $\bar{p}(x, t)$ – обозначено комплексное сопряжение.

СЛЕДСТВИЕ 2. *Нелинейное уравнение (37) обладает счетным числом законов сохранения*

$$I_1(x, t) = \int_a^b [p^2 + \bar{p}^2] dx, \quad I_2(x, t) = 2i \int_a^b \bar{p} p_x dx, \quad (38)$$

$$I_3(x, t) = - \int_a^b [p_x^2 + \bar{p}_x^2 + (p^2 + \bar{p}^2)^2] dx, \quad (39)$$

$$I_{n+2}(x, t) = \int_a^b \left(2ip \left(R_{n+1} + R_{nx} + \sum_{k=1}^n R_k R_{n-k} \right) - 2ip_x R_n - \sum_{k=1}^{n+1} R_k R_{n+1-k} \right) dx, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (40)$$

где многочлены $R_n(x, t)$ определяются по формулам

$$R_1 = \bar{p}^2 + p^2 - \bar{p}_x - ip_x; \quad R_2(x, t) = -ip_{xx}(x, t);$$

$$R_{n+2} = 2ip \left(R_{n+1} + \sum_{k=1}^n R_k R_{n-k} + R_{nx} \right) - R_{(n+1)x} - 2ip_x R_n - \sum_{k=1}^{n+1} R_k R_{n+1-k}.$$

Используя связь $p(x, t) = u(x, t) + iv(x, t)$ уравнение (37) можно записать в виде системы

$$\begin{aligned} u_t + v_{xx} - 4v(u^2 - v^2) &= 0, \\ v_t + u_{xx} - 4u(u^2 - v^2) &= 0, \end{aligned} \quad (41)$$

где $u(x, t) = \operatorname{Re} p(x, t), \quad v(x, t) = \operatorname{Im} p(x, t).$

СЛЕДСТВИЕ 3. *Нелинейная система уравнений (41) обладает счетным числом законов сохранения*

$$I_1(x, t) = 2 \int_a^b [u^2 - v^2] dx, \quad I_2(x, t) = 2 \int_a^b (uv_x - vu_x) dx, \quad (42)$$

$$I_3(x, t) = 4 \int_a^b \left(\frac{1}{2} [u_x^2 - v_x^2] + (u^2 - v^2)^2 \right) dx, \quad (43)$$

$$I_{n+2}(x, t) = \int_a^b \left(2(iu - v) \left(R_{n+1} + R_{nx} + \sum_{k=1}^n R_k R_{n-k} \right) + 2(v - iu)_x R_n - \sum_{k=1}^{n+1} R_k R_{n+1-k} \right) dx, \quad (44)$$

где многочлены $R_x(x, t)$ определяются по формулам

$$R_1 = u^2 - v^2 + (1+i)(v-u)_x; \quad R_2 = (1+i)([u-v]_{xx} - 2(u-iv)[u-v]_x);$$

$$R_{n+2} = 2(iu - v) \left(R_{n+1} + R_{nx} + \sum_{k=1}^n R_k R_{n-k} \right) + 2(v - iu)_x R_n - \sum_{k=1}^{n+1} R_k R_{n+1-k} - R_{(n+1)x}.$$

Результаты исследований и их обсуждение

Факт гамильтоновости не является очевидным, но найденная счетная последовательность законов сохранения говорит о том, что среди первых интегралов должен присутствовать гамильтониан.

Начнем с быстро убывающего случая. Фазовое пространство M является вещественным линейным бесконечномерным пространством координаты (q_1, q_2) , которые задаются парами функций $q_1(x)$ и $q_2(x)$ из $L(R)$, убывающих при $|x| \rightarrow \infty$. Наглядно можно считать, что переменная x играет роль номера координат; при фиксированном x значения $q_1(x)$ и $q_2(x)$ пробегают двумерное вещественное пространство R^2 с вещественными координатами (q_1, q_2) .

В соответствии с общим определением вариационных производных

$$\delta F(q_1, q_2) = F(q_1 + \delta q_1, q_2 + \delta q_2) - F(q_1, q_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\delta F}{\delta q_1} \delta q_1 + \frac{\delta F}{\delta q_2} \delta q_2 \right) dx,$$

с точностью до членов более высокого порядка малости по δq_1 и δq_2 , для функционалов вида $F(q_1, q_2)$.

Таким образом, вариационные производные $\frac{\delta F}{\delta q_1}$, $\frac{\delta F}{\delta q_2}$ являются, вообще говоря, обобщенными функциями.

Гладкие вещественно-аналитические функционалы составляют алгебру наблюдаемых на фазовом пространстве M . Введем на этой алгебре пуассонову структуру посредством скобки Пуассона

$$\{F, G\} = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\delta F}{\delta q_1} \frac{\delta G}{\delta q_2} - \frac{\delta F}{\delta q_2} \frac{\delta G}{\delta q_1} \right) dx. \quad (45)$$

Введенная таким образом операция, очевидно, удовлетворяет свойству скобок Пуассона: антисимметрии и тождеству Якоби. Формула (45) обобщает на бесконечномерный случай обычную скобку Пуассона

для функции на фазовом пространстве R^{2n} с вещественными координатами.

Координаты $q_1(x)$ и $q_2(x)$ на M можно рассматривать как функционалы, однако их вариационные производные являются обобщенными функциями

$$\frac{\delta u(x)}{\delta u(y)} = \delta(x-y), \quad \frac{\delta v(x)}{\delta v(y)} = \delta(x-y), \quad (46)$$

а $\frac{\delta u(x)}{\delta v(y)}$ и $\frac{\delta v(x)}{\delta u(y)}$ — исчезают, здесь $\delta(x-\lambda) - \delta$ — функция Дирака.

Подставляя формально (46) в выражение (45) получим соотношение

$$\{u(x), u(y)\} = \{v(x), v(y)\} = 0, \quad \{u(x), v(y)\} = \delta(x-y),$$

которые можно положить в определение пуассоновой структуры, из этих формул также получаем выражение

$$\frac{\delta F}{\delta u} = \{F, v(x)\}, \quad \frac{\delta F}{\delta v} = \{F, u(x)\}.$$

Каждая H порождает однопараметрическую группу преобразований на фазовом пространстве M , задаваемую гамильтоновыми уравнениями движения

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \{H, u\} = -\frac{\delta H}{\delta v}, \quad \frac{\partial v}{\partial t} = \{H, v\} = \frac{\delta H}{\delta u}.$$

Гамильтониан H (иногда его называют интегралом энергии) для системы (41) совпадает с третьим законом сохранения (43), найденным в предыдущем пункте следствие 3.

$$\frac{1}{4} I_3 = H = \int_a^b \left(\frac{1}{2} [u_x^2 - v_x^2] + (u^2 - v^2)^2 \right) dx. \quad (47)$$

Выполняя определение вариационной производной, получаем

$$v_t = \frac{\delta H}{\delta u} = \frac{\partial H}{\partial u} + \sum_{k=1}^n (-1)^k \frac{d^k}{dx^k} \frac{\partial H}{\partial u_{kx}} = 4u^3 - 4uv^2 - u_{xx} = 4u(u^2 - v^2) - u_{xx},$$

$$u_t = -\frac{\delta H}{\delta v} = -\left(\frac{\partial H}{\partial v} + \sum_{k=1}^n (-1)^k \frac{d^k}{dx^k} \frac{\partial H}{\partial v_{kx}} \right) = -(4v^3 - 4u^2v + v_{xx}) = 4v(u^2 - v^2) - v_{xx}.$$

Доказана следующая

ТЕОРЕМА 3. Система уравнений в частных производных (41) обладает гамильтоновым формализмом: переменные поля u и v образуют простой набор канонических переменных

$$\{u(x), v(y)\} = \delta(x-y),$$

скобка Пуассона имеет вид (45), функционал Гамильтона (47).

Наряду с H рассмотрим функционалы (42)

$$I_1(x, t) = 2 \int_a^b [u^2 - v^2] dx, \quad I_2(x, t) = 2 \int_a^b \left(\frac{\partial v}{\partial x} u - \frac{\partial u}{\partial x} v \right) dx.$$

ТЕОРЕМА 4. *Функционалы (42) – (44) удовлетворяют равенствам*

$$\{H, I_1\} = \{H, I_2\} = \{I_1, I_2\} = 0.$$

Доказательство. Проведем простую проверку

$$\begin{aligned} \{H, I_1\} &= \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\delta H}{\delta u} \frac{\delta I_1}{\delta v} - \frac{\delta H}{\delta v} \frac{\delta I_1}{\delta u} \right) dx = 4 \int_{-\infty}^{\infty} \left([-4u(u^2 - v^2) - u_{xx}]v - [4v(v^2 - u^2) + v_{xx}]u \right) dx = \\ &\quad \text{(приведем подобные и выделим полные производные)} \\ &= 4 \int_{-\infty}^{\infty} (u_{xx}v + u_x v_x - u_x v_x - v_{xx}u) dx = 4 \int_{-\infty}^{\infty} (u_x v - v_x u)_x dx = 0, \end{aligned}$$

аналогично два других случая

$$\begin{aligned} \{H, I_2\} &= \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\delta H}{\delta u} \frac{\delta I_2}{\delta v} - \frac{\delta H}{\delta v} \frac{\delta I_2}{\delta u} \right) dx = \\ &= -4 \int_{-\infty}^{\infty} ([4u(u^2 - v^2) - u_{xx}]u_x + [4v(v^2 - u^2) + v_{xx}]v_x) dx = \\ &= 4 \int_{-\infty}^{\infty} \left(2v^2 u^2 - u^4 - v^4 + \frac{1}{2}(u_x^2 - v_x^2) \right)_x dx = 0, \\ \{I_1, I_2\} &= \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\delta I_1}{\delta u} \frac{\delta I_2}{\delta v} - \frac{\delta I_1}{\delta v} \frac{\delta I_2}{\delta u} \right) dx = 16 \int_{-\infty}^{\infty} (-uu_x + vv_x) dx = 8 \int_{-\infty}^{\infty} (v^2 - u^2)_x dx = 0, \end{aligned}$$

т. е. эти функционалы находятся в инволюции. Система уравнений обладает бесконечным набором инволютивных интегралов движения (44), что приводит к ее полной интегрируемости.

Гамильтонов формализм для пары функции $u(x)$ и $v(x)$ системы уравнений (41) проще и естественнее; переменные поля $u(x)$ и $v(x)$ образуют простой набор канонических переменных

$$\{u(x), v(y)\} = \delta(x - y)$$

Фазовое пространство состоит из пар функций (u, v) . Скобка Пуассона имеет вид (45).

Рассмотрим теперь уравнение (37) на комплексную функцию. В записи автоматически подразумевается, что комплексно сопряженное равенство так же выполняется

$$p_t + i\bar{p}_{xx} - 2i\bar{p}(p^2 + \bar{p}^2) = 0,$$

поэтому имеется пара функций $(p, \bar{p})$, которые являются координатами на M и их вариационные производные являются обобщенными функциями

$$\frac{\delta p(x)}{\delta p(y)} = \delta(x - y), \quad \frac{\delta \bar{p}(x)}{\delta \bar{p}(y)} = \delta(x - y). \quad (48)$$

Для системы (37), вполне обосновано это название, гамильтониан H совпадает с третьем законом сохранения (39), найденным выше следствие 2.

$$H = \frac{i}{2} I_3(x, t) = -\frac{i}{2} \int_a^b [p_x^2 + \bar{p}_x^2 + (p^2 + \bar{p}^2)^2] dx. \quad (49)$$

Применяя вариационную производную, получаем

$$\bar{p}_t = \frac{\delta H}{\delta p} = \frac{\partial H}{\partial p} + \sum_{k=1}^n (-1)^k \frac{d^k}{dx^k} \frac{\partial H}{\partial p_{kx}} = -\frac{i}{2} (-2p_{xx} + 4p(p^2 + \bar{p}^2)) = ip_{xx} - 2ip(p^2 + \bar{p}^2),$$

причем, комплексно сопряженное выражение будет выражаться через тот же гамильтониан, так как он является самосопряженным.

ТЕОРЕМА 5. *Уравнение в частных производных (37) обладает гамильтоновым формализмом: переменные поля $p, \bar{p}$ образуют простой набор канонических переменных*

$$\{p(x), \bar{p}(y)\} = \delta(x - y),$$

скобка Пуассона имеет вид (45), функционал Гамильтона (49).

ТЕОРЕМА 6. *Функционалы (38) – (40) удовлетворяют равенствам*

$$\{H, I_1\} = \{H, I_2\} = \{I_1, I_2\} = 0.$$

Доказательство выполняется постой проверкой.

Выводы

В статье проведено доказательство полной интегрируемости нелинейных уравнений в частных производных, полученных с помощью операторного уравнения нулевой кривизны, для этого

1. Рассмотрено уравнение изоспектральной деформации с самосопряженным дифференциальным оператором Дирака первого и второго рода. При условии, что функции, входящие в коэффициенты, имеют быстро убывающий характер проведено построение решения, разложенного в степенной ряд по отрицательным степеням спектрального параметра.
2. Получено счетное число первых интегралов.
3. Доказано, что среди полученных законов сохранения присутствует Гамильтониан.
4. Все интегралы движения находятся в инволюции относительно скобок Пуассона.

Библиографический список

1. Гельфанд И.М., Дикий Л.А. Резольвенты и гамильтоновы системы // Функц. Анализ и его прилож. 11, № 2, 1977. С. 11–27.
2. Гриневич П.Г. Преобразование рассеяния для двумерного оператора Шредингера с убывающим на бесконечности потенциалом // Успехи мат. Наук. Т. 55, вып. 6 (336). 2000.
3. Лакс П.Д. Интегралы нелинейных эволюционных уравнений и уединенные волны. // Математика, 13: 5. М.: Мир, 1969. С. 128–150.
4. Ньюэлл А. Солитоны в математике и физике / пер. с англ. И.Р. Габитова и др.; под ред. А.В. Михайлова. М.: Мир, 1989. 323 с.
5. Лэм Дж. Введение в теорию солитонов / под ред. В.Е. Захарова. М.: Мир, 1983. 294 с.
6. Редькина Т.В. Нелинейные уравнения, интегрируемые методами солитонной математики. Пары Лакса с самосопряженным оператором Дирака и с несамосопряженными операторами рассеяния. / LAP LAMBERT Academic Publishing. AV Akademikerverlag GmbH & Co. KG. Deutschland. 2013. 153 P.
7. Новикова О.В. Исследование нелинейного комплексного дифференциального уравнения в частных производных, обладающего парой Лакса: дис. ... кандидата физ.-мат. наук. Воронеж, 2015.

References

1. Gel'fand I.M., Dikij L.A. Rezol'venty I gamil'tonovy sistemy (Resolvents and Hamiltonian systems) // Funkc. Analiz I ego prilozh. 11, № 2, 1977. S. 11-27 (in Russ).
2. Grinevich P.G. Preobrazovanie rasseyaniya dlya dvumernogo operatora Shredingera s ubyvyayushchim na beskonechnosti potencialom (The scattering transformation for a two-dimensional Schrödinger operator with a potential decreasing at infinity) // Uspehi mat. Nauk. T. 55, vyp. 6 (336). 2000 (in Russ).

3. Laks P.D. Integraly nelinejnyh ehvolyucionnyh uravnenij i uedinennye volny (Integrals of nonlinear evolution equations and solitary waves) // Matematika, 13: 5. M.: Mir, 1969. S. 128-150. (in Russ).
4. N'yuehl A. Solitony v matematike i fizike (Solitons in mathematics and physics) // Perevod s angl. I.R. Gabitova i dr.; Pod red. A.V. Mihajlova. M.: Mir, 1989. 323 s. (in Russ).
5. Lehm Dzh. Vvedenie v teoriyu solitonov (Introduction to the theory of solitons) // Pod red. V.E. Zaharova. M.: Mir, 1983. 294 s. (in Russ)
6. Red'kina T.V. Nelinejnye uravneniya, integriruemye metodami solitonnoj matematiki. Pary Laksa s samosopryazhennym operatorom Diraka i nesamosopryazhennymi operatorami rasseyaniya (Nonlinear equations integrable by the methods of soliton mathematics. Lax pairs with a self-adjoint Dirac operator and with nonselfadjoint scattering operators) // LAP LAMBERT Academic Publishing. AV Akademikerverlag GmbH Co. KG. Deutschland. 2013. 153 p. (in Russ).
7. Novikova O.V. Issledovanie nelinejnogo kompleksnogo differentsial'nogo uravneniya v chastnyh proizvodnyh, obladayushchego paroj Laksa (Investigation of a nonlinear complex partial differential equation with a Lax pair) // Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata fiz.-mat. Nauk. Voronezh 2015 (in Russ).

Поступила в редакцию 30.05.2018, принята к публикации 26.08.2018

Сведения об авторе

Редькина Татьяна Валентиновна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и математического моделирования Северо-Кавказского федерального университета. Researcher ID: Q-7020-2018. Телефон: 8-918-744-92-67 Email: TVR59@mail.ru.

About the author

Redkina Tatyana Valentinovna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor, associate professor of the Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling of the North Caucasus Federal University. Researcher ID: Q-7020-2018. Phone: 8-918-744-92-67 Email: TVR59@mail.ru.

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ, ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
И ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ**

УДК 517.957

**Яновская О.С.,
Сурнева О.Б.**

Северо-Кавказский федеральный университет,
г. Ставрополь, Россия
olenka_yan@mail.ru

**НЕЛИНЕЙНОЕ УРАВНЕНИЕ,
ОБЛАДАЮЩЕЕ ОПЕРАТОРОМ
РАССЕЯНИЯ
ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА**

Введение:

большинство дифференциальных уравнений, связанных с солитонной математикой, получены с помощью операторного уравнения Лакса или уравнения нулевой кривизны, которые являются условием совместности пары линейных дифференциальных систем. Глубоко и всесторонне изучен случай, когда для получения таких уравнений использовались системы второго порядка. Повышение порядка систем ведет к сильно переопределенным условиям. В работе изучается возможность использовать линейные системы третьего порядка.

**Материалы и
методы
исследований:**

использованы методы построения уравнений в частных производных с применением операторного уравнения Лакса с дифференциальными операторами первого порядка и матричными коэффициентами 3×3 .

**Результаты
исследования:**

определены необходимые и достаточные условия, накладываемые на параметры и функции, входящие в матрицы-коэффициенты, при которых коммутатор двух дифференциальных операторов представляет оператор умножения. Показано, что уравнение Лакса сводится к системе девяти уравнений, порядок которой можно понизить и свести к одному нелинейному уравнению в частных производных.

**Обсуждение
и заключения:**

авторами продемонстрированы два примера вывода нелинейных уравнений и определение их пары Лакса. В первом примере главный дифференциальный коэффициент рассматривается в виде нижнетреугольной матрицы, а во втором случае постоянная матрица имеет диагональный вид. В результате получены уравнения второго порядка с логарифмической нелинейностью.

**Ключевые
слова:**

нелинейные уравнения в частных производных, операторное уравнение Лакса, пара Лакса, условие совместности системы дифференциальных уравнений.

Yanovskaya O.S., North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia
Surneva O.B. olenka_yan@mail.ru

NONLINEAR EQUATION WITH THE THIRD ORDER SCATTERING OPERATOR

- Introduction:** most of the differential equations associated with soliton mathematics are obtained using the Lax operator equation or the zero-curvature equation, which are the compatibility condition for a pair of linear differential systems. The case in which second-order systems were used to obtain such equations was studied in depth and comprehensively. Increasing the order of systems leads to highly overdetermined conditions. The possibility of using third-order linear systems is being studied.
- Materials and methods of research:** methods for constructing partial differential equations using the Lax operator equation with differential operators of the first order and matrix coefficients of 3×3 were used.
- Research results:** necessary and sufficient conditions imposed on the parameters and functions included in the matrix coefficients, under which the commutator of two differential operators represents the multiplication operator. It is shown that the Lax equation reduces to a system of nine equations, the order of which can be reduced and reduced to one nonlinear partial differential equation.
- Discussion and conclusions:** the authors demonstrated two examples of the derivation of nonlinear equations and the determination of their Lax pair. In the first example, the main differential coefficient is considered as a lower triangular matrix, and in the second case the constant matrix has a diagonal form. As a result, second-order equations with a logarithmic nonlinearity are obtained.
- Keywords:** nonlinear partial differential equations, Lax operator equation, Lax pair, compatibility condition for a system of differential equations.

Введение

Большинство известных нелинейных уравнений, обладающих парой Лакса [1, 7], являются либо точно интегрируемые или уравнения, допускающие богатые классы точных решений. Поэтому наибольший интерес с практической точки зрения вызывают те исследования, которые способствуют развитию новых математических методов анализа нелинейных систем уравнений и в частности теорию, связанную с идеями солитонной математики.

Малоисследованным, но очень обширным классом уравнений являются многокомпонентные уравнения. Для этих уравнений полных списков пока не найдено. Вместе с тем, уравнения этого типа важны с прикладной точки зрения. Покажем, как предложенная схема модифицируется на случай многокомпонентных нелинейных уравнений, в частности, уравнений 3-х волнового взаимодействия [2, 3, 4]. Постановка задачи в этом случае может быть сформулирована следующим образом.

Операторное уравнение Лакса имеет вид

$$L_t = [L, A] = LA - AL, \quad (1)$$

где операторы могут быть различной природы (дифференциальные, интегральные, матрицы, проектирующие и др.). Идея, лежащая в основе работы Лакса [6], заключается в том, что нелинейное уравнение (1) является условием совместности системы линейных уравнений:

$$L\varphi = \mu\varphi, \quad (2)$$

$$\varphi_t = -A\varphi, \quad (3)$$

для оператора L поставлена спектральная задача (φ – собственная функция, μ – собственное значение оператора L), оператор A определяет эволюцию собственных функций по времени t .

Рассмотрим частный случай [5], когда L, A дифференциальные операторы первого порядка, заданные в пространстве вектор-функций и имеющие вид

$$L = \alpha \frac{\partial}{\partial x} + U, \quad A = \beta \frac{\partial}{\partial x} + V, \quad (4)$$

где $\alpha = (\alpha_{ij}), \beta = (\beta_{ij}), i, j = 1, 2, 3$ – постоянные матрицы 3×3 , $U = (v_{ij}(x, t)), i, j = 1, 2, 3$ – матрицы 3×3 с компонентами, зависящими от x и t .

Лемма 1. *Правая часть уравнения Лакса (1) представляет собой дифференциальный оператор второго порядка вида:*

$$[L, A] = [\alpha, \beta] \frac{\partial^2}{\partial x^2} + ([U, \beta] + [V, \alpha]) \frac{\partial}{\partial x} + [U, V] + \alpha V_x - \beta U_x.$$

Следствие. Если матрицы α, β, V, U удовлетворяют следующим условиям

$$[\alpha, \beta] = 0, \quad [U, \beta] + [\alpha, V] = 0, \quad (5)$$

то коммутатор представляет оператор умножения

$$[L, A] = [U, V] + \alpha V_x - \beta U_x. \quad (6)$$

Лемма 2. *Условия (5) выполняются тогда и только тогда, когда параметры $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, i, j = 1, 2, 3$, удовлетворяют равенствам*

$$\alpha_{ij}\beta_{ji} + \alpha_{ik}\beta_{ki} - \beta_{ij}\alpha_{ji} - \beta_{ik}\alpha_{ki} = 0, \quad i, j, k = 1, 2, 3, \quad i \neq j \neq k, \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^3 [\alpha_{ij} \beta_{jk} - \beta_{ij} \alpha_{jk}] = 0, \quad i, k = 1, 2, 3, \quad i \neq k, \quad (8)$$

а функциональные компоненты $u_{ij}(x, t)$, $v_{ij}(x, t)$, $i, k = 1, 2, 3$, удовлетворяют равенствам

$$u_{ij} \beta_{ji} + u_{ik} \beta_{ki} - \beta_{ij} u_{ji} - \beta_{ik} u_{ki} + \alpha_{ij} v_{ji} + \alpha_{ik} v_{ki} - v_{ij} \alpha_{ji} - v_{ik} \alpha_{ki} = 0, \quad (9)$$

$$i, j, k = 1, 2, 3, \quad i \neq j \neq k$$

$$\sum_{j=1}^3 [u_{ij} \beta_{jk} - \beta_{ij} u_{jk} + \alpha_{ij} v_{jk} - v_{ij} \alpha_{jk}] = 0, \quad i, k = 1, 2, 3, \quad i \neq k. \quad (10)$$

Материалы и методы исследований

Лемма 3:

Если параметры матриц $\alpha = (\alpha_{ij})$, $\beta = (\beta_{ij})$, $i, j = 1, 2, 3$ и функциональные матрицы $U = (u_{ij}(x, t))$, $V = (v_{ij}(x, t))$, $ij = 1, 2, 3$ такие, что

$$\alpha_{12} = \alpha_{13} = \alpha_{23} = 0, \quad -\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{33}, \quad (11)$$

$$\beta_{12} = \beta_{13} = \beta_{23} = 0, \quad \beta_{11} = 3k\alpha_{11}, \quad \beta_{22} = \beta_{33} = k\alpha_{11},$$

$$\beta_{21} = k\alpha_{21}, \quad \beta_{31} = k\alpha_{31}, \quad \beta_{32} = k\alpha_{32}, \quad (12)$$

остальные $\alpha_{11}, \alpha_{21}, \alpha_{31}, \alpha_{32}, k$ – произвольные параметры отличные от нуля, а функции $u_{ij}(x, t) \neq 0$, $i, j = 1, 2, 3$ удовлетворяют связям:

$$u_{33} = u_{22} + \frac{2}{k} v_{11}, \quad (13)$$

$$v_{11} = -v_{22} = v_{33}, \quad v_{1j} = ku_{1k}, \quad v_{j1} = ku_{j1} + \frac{\alpha_{k1}}{2\alpha_{11}} (2v_{11} + k(u_{22} - u_{11})), \quad j = 2, 3,$$

$$v_{23} = ku_{23}, \quad v_{32} = ku_{32} + \frac{\alpha_{32}}{2\alpha_{11}} (2v_{11} + k(u_{22} - u_{11})), \quad (14)$$

тогда выполняются условия (7) – (10).

Теорема 1:

Операторное уравнение Лакса с дифференциальными операторами первого порядка (4) с коэффициентами, удовлетворяющими леммам 1, 2, 3, эквивалентно нелинейному уравнению с частными производными

$$\frac{\alpha_{21}\alpha_{32}}{2\alpha_{11}k}(u_{13}-\ln u_{13})_{zz}=\left(\frac{\alpha_{31}^2}{\alpha_{11}}-\frac{\alpha_{32}^2\alpha_{21}^2}{4\alpha_{11}^3}\right)u_{13z}+\frac{\alpha_{32}^2\alpha_{21}^2}{4\alpha_{11}^3}u_{13z}\ln u_{13}+\frac{\alpha_{31}u_{13zz}}{k u_{13}}-\alpha_{32}\alpha_{21}\frac{u_{13xz}}{u_{13}}, \quad (15)$$

$$\text{где} \quad 2k\alpha_{11}\frac{\partial}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}. \quad (16)$$

Доказательство: Коэффициенты операторов (4) удовлетворяют леммам 1,2,3, для нахождения результата уравнения Лакса (1) воспользуемся равенством

$$u_{ijt}=u_{i1}v_{1j}+u_{i2}v_{2j}+u_{i3}v_{3j}-v_{i1}u_{1j}-v_{i2}u_{2j}-v_{i3}u_{3j}+\alpha_{i1}v_{1jx}+\alpha_{i2}v_{2jx}+\alpha_{i3}v_{3jx}- \\ -\beta_{i1}u_{1jx}-\beta_{i2}u_{2jx}-\beta_{i3}u_{3jx}, \quad i,j=1,2,3. \quad (17)$$

Легко заметить, что можно выделить группы производных и для более компактной записи в уравнениях ввести следующую замену переменных (16).

Уравнение Лакса (1) даст систему:

$$u_{11z}=\left(\frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}u_{12}+\frac{\alpha_{31}}{2\alpha_{11}}u_{13}\right)(2v_{11}+k(u_{22}-u_{11}))+\alpha_{11}v_{11x}-k\alpha_{11}u_{11x}, \quad (1-I)^*$$

$$u_{12z}=\left(u_{13}\frac{\alpha_{32}}{2\alpha_{11}}-u_{12}\right)(2v_{11}+k(u_{22}-u_{11})), \quad (2-I)$$

$$-u_{13z}=(2v_{11}+k(u_{22}-u_{11}))u_{13}, \quad (3-I)$$

$$u_{21z}=\left[u_{21}+(u_{22}-u_{11})\frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}+\frac{\alpha_{31}}{2\alpha_{11}}u_{23}\right](2v_{11}+k(u_{22}-u_{11}))-\frac{\alpha_{21}}{2}k(u_{22}+u_{11})_x, \quad (4-I)$$

$$u_{22z}=\left(u_{23}\frac{\alpha_{32}}{2\alpha_{11}}-\frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}u_{12}\right)(2v_{11}+k(u_{22}-u_{11}))+\alpha_{11}v_{11x}+k\alpha_{11}u_{22x}, \quad (5-I)$$

$$u_{23z}=-\frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}u_{13}(2v_{11}+k(u_{22}-u_{11})), \quad (6-I)$$

$$u_{31z}=\left(u_{32}\frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}-u_{21}\frac{\alpha_{32}}{2\alpha_{11}}+\frac{\alpha_{31}}{2\alpha_{11}k}[2v_{11}+k(u_{22}-u_{11})]+u_{31}\right)(2v_{11}+k(u_{22}-u_{11}))+ \\ +\frac{\alpha_{32}\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}(2v_{11}+k(u_{22}-u_{11}))_x-\frac{\alpha_{31}}{2}k(u_{22}+u_{11})_x, \quad (7-I)$$

$$u_{32z}=\left[v_{11}\frac{\alpha_{32}}{k\alpha_{11}}-\frac{\alpha_{31}}{2\alpha_{11}}u_{12}\right](2v_{11}+k(u_{22}-u_{11}))-2\alpha_{32}v_{11x}-\frac{\alpha_{32}}{2}k(3u_{22}-u_{11})_x, \quad (8-I)$$

$$u_{22z}+\frac{2}{k}v_{11z}-\alpha_{11}v_{11x}=-\left(\frac{\alpha_{31}}{2\alpha_{11}}u_{13}+u_{23}\frac{\alpha_{32}}{2\alpha_{11}}\right)(2v_{11}+k(u_{22}-u_{11}))+\alpha_{11}ku_{22x}. \quad (9-I)$$

* Введена новая нумерация в системе из девяти уравнений. Первая цифра означает порядковый номер в системе, вторая цифра обозначает этап преобразований. В дальнейшем не все уравнения в системе могут участвовать в преобразованиях.

Система (1–I) – (9–I) содержит связь девяти неизвестных функций, функцию $u_{13}(x, z)$ будем считать отличной от нуля вместе с ее производными и постараемся выразить остальные неизвестные функции через нее.

Разделим третье уравнение (3–I) системы на u_{13} , откуда находим

$$v_{11} = \frac{k}{2}(u_{11} - u_{22}) - \frac{1}{2}(\ln u_{13})_z. \quad (18)$$

Подставим полученное выражение для функции v_{11} в оставшиеся равенства системы. Шестое уравнение полученной системы легко интегрируется, и функция u_{23} явно выражается через функцию u_{13}

$$u_{23} = \frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}u_{13}, \quad (19)$$

постоянная интегрирования, для простоты дальнейшего изложения, принята равной нулю (во всех дальнейших шагах этот факт больше не оговаривается).

Уравнение (2–I), с учетом (18), является линейным относительно u_{12} , при этом функция u_{13} считается известной, после его интегрирования, находим

$$u_{12} = -\frac{\alpha_{32}}{2\alpha_{11}}u_{13} \ln u_{13}. \quad (20)$$

Подставим полученные значения в остальные уравнения системы:

$$u_{11z} = u_{13z} \left(\frac{\alpha_{32}\alpha_{21}}{4\alpha_{11}^2} \ln u_{13} - \frac{\alpha_{31}}{2\alpha_{11}} \right) - \alpha_{11} \frac{k}{2}(u_{11} + u_{22})_x - \frac{1}{2}\alpha_{11}(\ln u_{13})_{zx}, \quad (1-II)$$

$$u_{21z} = -(\ln u_{13})_z \left[u_{21} + (u_{22} - u_{11}) \frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}} + \frac{\alpha_{31}\alpha_{21}}{4\alpha_{11}^2}u_{13} \right] - \frac{\alpha_{21}}{2}k(u_{22} + u_{11})_x, \quad (4-II)$$

$$u_{22z} = \frac{k}{2}\alpha_{11}(u_{11} + u_{22})_x - \frac{1}{2}\alpha_{11}(\ln u_{13})_{zx} - \frac{\alpha_{32}\alpha_{21}}{4\alpha_{11}^2}u_{13z}(1 + \ln u_{13}), \quad (5-II)$$

$$u_{31z} = -(\ln u_{13})_z \left(u_{32} \frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}} - u_{21} \frac{\alpha_{32}}{2\alpha_{11}} - \frac{\alpha_{31}}{2\alpha_{11}k}(\ln u_{13})_z + u_{31} \right) - \frac{\alpha_{32}\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}(\ln u_{13})_{zx} - \frac{\alpha_{31}}{2}k(u_{22} + u_{11})_x, \quad (7-II)$$

$$u_{32z} = -(\ln u_{13})_z \left[\frac{\alpha_{32}}{2\alpha_{11}}(u_{11} - u_{22}) - \frac{\alpha_{32}}{2k\alpha_{11}}(\ln u_{13})_z \right] - \frac{\alpha_{31}\alpha_{32}}{4\alpha_{11}^2}u_{13z} \ln u_{13} + \alpha_{32}(\ln u_{13})_{zx} - \frac{1}{2}\alpha_{32}k(u_{11} + u_{22})_x, \quad (8-II)$$

$$u_{11z} - \frac{1}{k}(\ln u_{13})_{zz} + \alpha_{11} \frac{1}{2}(\ln u_{13})_{zx} = \left(\frac{\alpha_{31}}{2\alpha_{11}} + \frac{\alpha_{21}\alpha_{32}}{4\alpha_{11}^2} \right)u_{13z} + \alpha_{11} \frac{k}{2}(u_{11} + u_{22})_x. \quad (9-II)$$

Если вычесть из (1–II) (9–II), то группа элементов $\alpha_{11}k(u_{22} + u_{11})_x$ выражается только через функцию u_{13} ,

$$\alpha_{11}k(u_{11} + u_{22})_x = \left(\frac{\alpha_{32}\alpha_{21}}{4\alpha_{11}^2} \ln u_{13} - \frac{\alpha_{31}}{\alpha_{11}} - \frac{\alpha_{21}\alpha_{32}}{4\alpha_{11}^2} \right) u_{13z} - \frac{1}{k} (\ln u_{13})_{zz}. \quad (21)$$

Выполним подстановку найденного выражения, тогда в (1–III), (5–III), (9–III) выделились полные производные по переменной z . Тем самым функции u_{11} , u_{22} однозначно определились через u_{13}

$$u_{11} = \frac{\alpha_{32}\alpha_{21}}{8\alpha_{11}^2} u_{13} \ln u_{13} + \frac{1}{2k} (\ln u_{13})_z - \frac{1}{2} \alpha_{11} (\ln u_{13})_x, \quad (22)$$

$$u_{22} = -\frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_{31}}{\alpha_{11}} + \frac{\alpha_{21}\alpha_{32}}{4\alpha_{11}^2} \right) u_{13} - \frac{\alpha_{32}\alpha_{21}}{8\alpha_{11}^2} (1 + \ln u_{13}) u_{13} - \frac{1}{2k} (\ln u_{13})_z - \frac{1}{2} \alpha_{11} (\ln u_{13})_x, \quad (23)$$

В результате осталось только три нетривиальных равенства

$$u_{21z} = \frac{\alpha_{21}}{2k\alpha_{11}} (\ln u_{13})_{zz} - u_{21} (\ln u_{13})_z + \frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}} \left(\frac{\alpha_{31}}{\alpha_{11}} + \frac{\alpha_{21}\alpha_{32}}{2\alpha_{11}^2} \right) u_{13z} + \frac{\alpha_{21}}{2k\alpha_{11}} (\ln u_{13})_z^2, \quad (4-IV)$$

$$u_{31z} = -(\ln u_{13})_z \left(u_{32} \frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}} - u_{21} \frac{\alpha_{32}}{2\alpha_{11}} - \frac{\alpha_{31}}{2\alpha_{11}k} (\ln u_{13})_z + u_{31} \right) - \frac{\alpha_{32}\alpha_{21}}{2\alpha_{11}} (\ln u_{13})_{zx} - \frac{\alpha_{31}}{2\alpha_{11}} \left(\frac{\alpha_{32}\alpha_{21}}{4\alpha_{11}^2} \ln u_{13} - \frac{\alpha_{31}}{\alpha_{11}} - \frac{\alpha_{21}\alpha_{32}}{4\alpha_{11}^2} \right) u_{13z} + \frac{\alpha_{31}}{2\alpha_{11}k} (\ln u_{13})_{zz}, \quad (7-IV)$$

$$u_{32z} = \frac{\alpha_{32}}{2k\alpha_{11}} (\ln u_{13})_{zz} + \alpha_{32} (\ln u_{13})_{zx} + \frac{\alpha_{32}}{2\alpha_{11}} \left(\frac{\alpha_{31}}{2\alpha_{11}} + \frac{\alpha_{21}\alpha_{32}}{4\alpha_{11}^2} \right) u_{13z} - \frac{\alpha_{32}}{4\alpha_{11}} \left(\frac{\alpha_{31}}{\alpha_{11}} + \frac{\alpha_{32}\alpha_{21}}{\alpha_{11}^2} \right) u_{13z} \ln u_{13}. \quad (8-IV)$$

Равенство (4–IV) является линейным относительно u_{21} , его решение имеет вид

$$u_{21} = \frac{\alpha_{21}}{2k\alpha_{11}} u_{13z} + \frac{\alpha_{21}}{4\alpha_{11}} \left(\frac{\alpha_{31}}{\alpha_{11}} + \frac{\alpha_{21}\alpha_{32}}{2\alpha_{11}^2} \right) u_{13}. \quad (24)$$

Интегрирование (8–IV) определяет функцию u_{32} :

$$u_{32} = \frac{\alpha_{32}}{2\alpha_{11}} \left(\frac{\alpha_{31}}{\alpha_{11}} + \frac{3\alpha_{21}\alpha_{32}}{4\alpha_{11}^2} \right) u_{13} - \frac{\alpha_{32}}{4\alpha_{11}} \left(\frac{\alpha_{31}}{\alpha_{11}} + \frac{\alpha_{32}\alpha_{21}}{\alpha_{11}^2} \right) u_{13} \ln u_{13} + \frac{\alpha_{32}}{2k\alpha_{11}} (\ln u_{13})_z + \alpha_{32} (\ln u_{13})_x. \quad (25)$$

В результате функция u_{31} осталась произвольной, поэтому доопределим ее так

$$u_{31} = \frac{\alpha_{21}\alpha_{32}}{4k\alpha_{11}^2} (u_{13} - \ln u_{13})_z. \quad (26)$$

Выполним подстановку в последнее оставшееся равенство (7–IV) и получим (15).

На первый взгляд уравнение (15) удовлетворяет всем требованиям, но если умножить все члены на u_{13} , то тогда можно выполнить интегрирование по комбинированной переменной z , что приводит к уравнению первого порядка.

Теорема 2: *Операторное уравнение Лакса (1) с дифференциальными операторами первого порядка (4) с коэффициентами, удовлетворяющими леммам 1, 2, 3, эквивалентно нелинейному уравнению с частными производными*

$$\frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}^2} u_{12z} + \frac{1}{k\alpha_{11}} (\ln u_{12})_{zz} = k\alpha_{11} (\ln u_{12})_{xx}. \quad (27)$$

Доказательство: Очевидно, что исходная система имеет вид (1–I), ..., (9–I) предыдущей теоремы. Для того чтобы ход построения уравнения отличался от предыдущего случая, положим

$$u_{13} = 0, \quad (28)$$

при этом (6–I) дает $u_{23z} = 0$ тогда положим $u_{23} = 0$.

В системе остаются равенства

$$u_{11z} = \frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}} u_{12} (2v_{11} + k(u_{22} - u_{11})) + \alpha_{11} v_{11x} - k\alpha_{11} u_{11x}, \quad (1-II)$$

$$u_{12z} = -u_{12} (2v_{11} + k(u_{22} - u_{11})), \quad (2-II)$$

$$u_{21z} = \left[u_{21} + (u_{22} - u_{11}) \frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}} \right] (2v_{11} + k(u_{22} - u_{11})) - \frac{\alpha_{21}}{2} k(u_{22} + u_{11})_x, \quad (4-II)$$

$$u_{22z} = -\frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}} u_{12} (2v_{11} + k(u_{22} - u_{11})) + \alpha_{11} v_{11x} + k\alpha_{11} u_{22x}, \quad (5-II)$$

$$u_{31z} = \left(u_{32} \frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}} - u_{21} \frac{\alpha_{32}}{2\alpha_{11}} + \frac{\alpha_{31}}{2\alpha_{11}k} [2v_{11} + k(u_{22} - u_{11})] + u_{31} \right) (2v_{11} + k(u_{22} - u_{11})) + \frac{\alpha_{32}\alpha_{21}}{2\alpha_{11}} (2v_{11} + k(u_{22} - u_{11}))_x - \frac{\alpha_{31}}{2} k(u_{22} + u_{11})_x, \quad (7-II)$$

$$u_{32z} = \frac{\alpha_{31}}{2\alpha_{11}} u_{12z} - \frac{\alpha_{32}}{k\alpha_{11}} (\ln u_{12})_z v_{11} - \alpha_{32} (2v_{11} + k[u_{22} - u_{11}])_x - \frac{\alpha_{32}}{2} k(u_{22} + u_{11})_x, \quad (8-II)$$

$$u_{22z} + \frac{2}{k} v_{11z} = \alpha_{11} v_{11x} + \alpha_{11} k u_{22x}. \quad (9-II)$$

Функцию $u_{12}(x, z)$ будем считать отличной от нуля вместе с ее производными и постараемся выразить остальные неизвестные функции через нее.

Разделим третье уравнение (2–II) системы на u_{12} , откуда находим

$$-(\ln u_{12})_z = 2v_{11} + k(u_{22} - u_{11}). \quad (29)$$

Приравнявая (5–II) и (9–II), получаем

$$v_{11} = -\frac{\alpha_{21}k}{4\alpha_{11}}u_{12}, \quad (30)$$

равенство (29) определяет разность функций $u_{22} - u_{11}$

$$u_{22} - u_{11} = \frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}u_{12} - \frac{1}{k}(\ln u_{12})_z. \quad (31)$$

С учетом найденных значений система переписывается в виде

$$u_{11z} = -\frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}u_{12z} - \frac{\alpha_{21}k}{4}u_{12x} - k\alpha_{11}u_{11x}, \quad (1-III)$$

$$u_{21z} = -\left(\frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}\right)^2 u_{12z} - (\ln u_{12})_z \left[u_{21} - \frac{\alpha_{21}}{2k\alpha_{11}}(\ln u_{12})_z \right] - \frac{\alpha_{21}}{2}k(u_{22} + u_{11})_x, \quad (4-III)$$

$$u_{22z} = \frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}u_{12z} - \frac{\alpha_{21}k}{4}u_{12x} + k\alpha_{11}u_{22x}, \quad (5-III)$$

$$u_{31z} = -(\ln u_{12})_z \left(u_{32} \frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}} - u_{21} \frac{\alpha_{32}}{2\alpha_{11}} - \frac{\alpha_{31}}{2\alpha_{11}k}(\ln u_{12})_z + u_{31} \right) - \frac{\alpha_{32}\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}(\ln u_{12})_{zx} - \frac{\alpha_{31}}{2}k(u_{22} + u_{11})_x, \quad (7-III)$$

$$u_{32z} = \left(\frac{\alpha_{31}}{2\alpha_{11}} + \frac{\alpha_{21}\alpha_{32}}{4\alpha_{11}^2} \right) u_{12z} + \alpha_{32}(\ln u_{12})_{zx} - \frac{\alpha_{32}}{2}k(u_{22} + u_{11})_x, \quad (8-III)$$

Разность (5–III) и (1–III) позволяет найти сумму производных u_{22} , u_{11}

$$u_{22x} + u_{11x} = -\frac{1}{k^2\alpha_{11}}(\ln u_{12})_{zz} - \frac{\alpha_{21}}{2k\alpha_{11}^2}u_{12z}, \quad (32)$$

при подстановки в (4–III), остается связь между u_{21} , u_{12} которая дает

$$u_{21} = \frac{\alpha_{21}}{2k\alpha_{11}} \frac{u_{12z}}{u_{12}}. \quad (33)$$

Равенство (8–III), после использования (32), позволяет найти функцию u_{12}

$$u_{32} = \left(\frac{\alpha_{31}}{2\alpha_{11}} + \frac{\alpha_{21}\alpha_{32}}{2\alpha_{11}^2} \right) u_{12} + \alpha_{32}(\ln u_{12})_x + \frac{\alpha_{32}}{2} \frac{1}{k\alpha_{11}}(\ln u_{12})_z. \quad (34)$$

В результате порядок системы снижен до трех

$$u_{11z} = -\frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}u_{12z} - \frac{\alpha_{21}k}{4}u_{12x} - k\alpha_{11}u_{11x}, \quad (1-IV)$$

$$u_{22z} = \frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}u_{12z} - \frac{\alpha_{21}k}{4}u_{12x} + k\alpha_{11}u_{22x}, \quad (5-IV)$$

$$(u_{12}u_{31})_z = -\frac{\alpha_{32}\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}u_{12zx} + \frac{\alpha_{31}}{2k\alpha_{11}}u_{12zz} - \frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}\frac{\alpha_{21}\alpha_{32}}{2\alpha_{11}^2}u_{12}u_{12z}, \quad (7-IV)$$

причем последнее равенство интегрируется и дает возможность определить u_{31}

$$u_{31} = \frac{\alpha_{31}}{2k\alpha_{11}}\frac{u_{12z}}{u_{12}} - \frac{\alpha_{32}\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}\frac{u_{12x}}{u_{12}} - \frac{\alpha_{21}^2\alpha_{32}}{8\alpha_{11}^3}u_{12} \quad (35)$$

Последняя пара (1-IV), (5-IV) после перекрестного дифференцирования и избавиться от функции u_{11} , дает одно равенство на функцию u_{12}

$$\frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}^2}u_{12zz} + \frac{1}{k\alpha_{11}}(\ln u_{12})_{zzz} = k\alpha_{11}(\ln u_{12})_{zxx},$$

которое можно понизить на порядок и получить (27).

Результаты исследований и их обсуждение

Обсудим некоторые следствия, являющиеся результатом доказанных теорем

Следствие. Уравнение в частных производных (27) обладает парой Лакса (4) с матричными коэффициентами 3×3 , α_{21} , α_{11} , k – произвольные параметры $\alpha_{31} = \alpha_{32} = 1$, остальные элементы матричных коэффициентов имеют вид (11), (12), функциональные члены выражаются через $u_{12}(x, t)$ и имеют вид:

$$u_{11} = \frac{1}{2k}(\ln u_{12})_z - \frac{\alpha_{21}}{4\alpha_{11}}u_{12} - \frac{1}{2}\alpha_{11}(\ln u_{12})_x, \quad u_{13} = 0, \quad u_{21} = \frac{\alpha_{21}}{2k\alpha_{11}}\frac{u_{12z}}{u_{12}}, \quad u_{23} = 0,$$

$$u_{31} = \frac{1}{2k\alpha_{11}}\frac{u_{12z}}{u_{12}} - \frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}\frac{u_{12x}}{u_{12}} - \frac{\alpha_{21}^2}{8\alpha_{11}^3}u_{12}, \quad u_{22} = -\frac{1}{2}\alpha_{11}(\ln u_{12})_x + \frac{\alpha_{21}}{4\alpha_{11}}u_{12} - \frac{1}{2k}(\ln u_{12})_z,$$

$$u_{32} = \left(\frac{1}{2\alpha_{11}} + \frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}^2} \right) u_{12} + (\ln u_{12})_x + \frac{1}{2k\alpha_{11}}(\ln u_{12})_z, \quad v_{11} = -v_{22} = v_{33} = -\frac{\alpha_{21}k}{4\alpha_{11}}u_{12},$$

$$u_{33} = -\frac{1}{2}\alpha_{11}(\ln u_{12})_x - \frac{1}{2k}(\ln u_{12})_z - \frac{\alpha_{21}}{4\alpha_{11}}u_{12}, \quad v_{23} = v_{13} = v_{21} = 0, \quad v_{12} = ku_{12},$$

$$v_{31} = -\frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}}k\frac{u_{12x}}{u_{12}} - \frac{\alpha_{21}^2k}{8\alpha_{11}^3}u_{12}, \quad v_{32} = \left(\frac{1}{2\alpha_{11}} + \frac{\alpha_{21}}{2\alpha_{11}^2} \right) ku_{12} + k(\ln u_{12})_x,$$

для компактности записи производных введен дифференциальный оператор (16).

Теорема 3. *Нелинейное уравнение в частных производных*

$$u^2 \left(\beta_{22} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) [(\ln u)_x - u] + u_x = 0 \quad (36)$$

эквивалентно операторному уравнению Лакса (1) с дифференциальными операторами вида

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} + \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{pmatrix}, \quad (37)$$

$$A = \begin{pmatrix} \beta_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{22} \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 2v_{11} & (\beta_{11} - \beta_{22})u_{12} & (\beta_{11} - \beta_{22})u_{13} \\ (\beta_{11} - \beta_{22})u_{21} & 2v_{22} & 2v_{23} \\ (\beta_{11} - \beta_{22})u_{31} & 2v_{32} & 2v_{33} \end{pmatrix} \quad (38)$$

где $u_{ij}(x, t)$, $v_{ij}(x, t)$, $ij = 1, 2, 3$ – некоторые неизвестные функции дважды дифференцируемые по своим переменным.

Доказательство. Коэффициенты операторов (37), (38) выбраны так, что леммы 1,2 выполняются, поэтому уравнение Лакса (1) эквивалентно системе (17) выпишем ее в явном виде

$$u_{11t} + \beta_{11}u_{11x} = v_{11x}, \quad (1-I)$$

$$u_{12t} = \frac{1}{2}(\beta_{11} - \beta_{22})u_{12}[u_{11} - u_{22}] + u_{12}[v_{22} - v_{11}] + u_{13}\left[v_{32} - \frac{1}{2}(\beta_{11} - \beta_{22})u_{32}\right] - \frac{1}{2}(\beta_{11} + \beta_{22})u_{12x}, \quad (2-I)$$

$$u_{13t} = \frac{1}{2}(\beta_{11} - \beta_{22})u_{13}[u_{11} - u_{33}] + u_{12}\left[v_{23} - \frac{1}{2}(\beta_{11} - \beta_{22})u_{23}\right] + u_{13}[v_{33} - v_{11}] - \frac{1}{2}(\beta_{11} + \beta_{22})u_{13x}, \quad (3-I)$$

$$u_{21t} = u_{21}[v_{11} - v_{22}] + \frac{1}{2}(\beta_{11} - \beta_{22})u_{21}[u_{22} - u_{11}] + \left[\frac{1}{2}(\beta_{11} - \beta_{22})u_{23} - v_{23}\right]u_{31} - \frac{1}{2}(\beta_{11} + \beta_{22})u_{21x}, \quad (4-I)$$

$$u_{22t} = u_{23}v_{32} - v_{23}u_{32} - v_{22x} - \beta_{22}u_{22x}, \quad (5-I)$$

$$u_{23t} = v_{23}[u_{22} - u_{33}] + u_{23}[v_{33} - v_{22}] - v_{23x} - \beta_{22}u_{23x}, \quad (6-I)$$

$$u_{31t} = u_{31}[v_{11} - v_{33}] + \left[\frac{1}{2}(\beta_{11} - \beta_{22})u_{32} - v_{32}\right]u_{21} + \frac{1}{2}(\beta_{11} - \beta_{22})u_{31}[u_{33} - u_{11}] - \frac{1}{2}(\beta_{11} + \beta_{22})u_{31x}, \quad (7-I)$$

$$u_{32t} = u_{32}[v_{22} - v_{33}] + v_{32}[u_{33} - u_{22}] - v_{32x} - \beta_{22}u_{32x}, \quad (8-I)$$

$$u_{33t} = u_{32}v_{23} - v_{32}u_{23} - v_{33x} - \beta_{22}u_{33x}. \quad (9-I)$$

Так как число переменных превышает число уравнений, то можно ввести дополнительные связи. Пусть выполняется

$$v_{32} = \frac{1}{2}(\beta_{11} - \beta_{22})u_{32}, \quad v_{23} = \frac{1}{2}(\beta_{11} - \beta_{22})u_{23}. \quad (39)$$

$$u_{11t} + \beta_{11}u_{11x} = v_{11x}, \quad (1-II)$$

$$\left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) u_{12} = \left(\frac{\beta_{11} - \beta_{22}}{2} (u_{11} - u_{22}) + v_{22} - v_{11} \right) u_{12}, \quad (2-II)$$

$$\left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) u_{13} = \left(\frac{\beta_{11} - \beta_{22}}{2} (u_{11} - u_{33}) + v_{33} - v_{11} \right) u_{13}, \quad (3-II)$$

$$\left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) u_{21} = \left(\frac{\beta_{11} - \beta_{22}}{2} (u_{22} - u_{11}) + v_{11} - v_{22} \right) u_{21}, \quad (4-II)$$

$$u_{22t} = -v_{22x} - \beta_{22}u_{22x}, \quad (5-II)$$

$$\left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) u_{23} = \left(\frac{\beta_{11} - \beta_{22}}{2} (u_{22} - u_{33}) + v_{33} - v_{22} \right) u_{23}, \quad (6-II)$$

$$\left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) u_{31} = \left(\frac{\beta_{11} - \beta_{22}}{2} (u_{33} - u_{11}) + v_{11} - v_{33} \right) u_{31}, \quad (7-II)$$

$$\left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) u_{32} = \left(\frac{\beta_{11} - \beta_{22}}{2} (u_{33} - u_{22}) + v_{22} - v_{33} \right) u_{32}, \quad (8-II)$$

$$u_{33t} = -v_{33x} - \beta_{22}u_{33x}. \quad (9-II)$$

По условию теоремы u_{12} , u_{13} , u_{21} , u_{31} , u_{32} отличны от нуля, тогда можем выполнить деление уравнений (2, 3, 4, 6, 7, 8-II) на эти функции соответственно:

$$\frac{\beta_{11} - \beta_{22}}{2} (u_{11} - u_{22}) + v_{22} - v_{11} = \left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \ln u_{12}, \quad (2-III)$$

$$\frac{\beta_{11} - \beta_{22}}{2} (u_{11} - u_{33}) + v_{33} - v_{11} = \left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \ln u_{13}, \quad (3-III)$$

$$\frac{\beta_{11} - \beta_{22}}{2} (u_{22} - u_{11}) + v_{11} - v_{22} = \left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \ln u_{21}, \quad (4-III)$$

$$\frac{\beta_{11} - \beta_{22}}{2} (u_{22} - u_{33}) + v_{33} - v_{22} = \left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \ln u_{23}, \quad (6-III)$$

$$\frac{\beta_{11} - \beta_{22}}{2}(u_{33} - u_{11}) + v_{11} - v_{33} = \left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \ln u_{31}, \quad (7-III)$$

$$\frac{\beta_{11} - \beta_{22}}{2}(u_{33} - u_{22}) + v_{22} - v_{33} = \left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \ln u_{32}, \quad (8-III)$$

Попарные суммы (2-III) и (4-III), (3-III) и (7-III), (6-III) и (8-III) приводят к обратно пропорциональной связи функций

$$u_{12} = \frac{1}{u_{21}}, \quad u_{13} = \frac{1}{u_{31}}, \quad u_{32} = \frac{1}{u_{23}} \quad (40)$$

Найдем сумму (1-II), (5-II) и приведем ее к виду

$$\left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) (u_{11} + u_{22}) = \left(\frac{\beta_{11} - \beta_{22}}{2} (u_{22} - u_{11}) + v_{11} - v_{22} \right)_x.$$

Выполним замену правой части на выражение (4-III)

$$\left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) (u_{11} + u_{22}) = \left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) (\ln u_{21})_x,$$

следовательно, можно определить

$$u_{11} = (\ln u_{21})_x - u_{22}. \quad (41)$$

Аналогично разность (5-II), (9-II) дает

$$\left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) (u_{22} - u_{33}) = \left(v_{33} - v_{22} + \frac{\beta_{11} - \beta_{22}}{2} (u_{22} - u_{33}) \right)_x.$$

Замена правой части на выражение (6-III) приводит к виду

$$\left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) (u_{22} - u_{33}) = \left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) (\ln u_{23})_x,$$

поэтому можно положить

$$u_{33} = u_{22} - (\ln u_{23})_x. \quad (42)$$

Выполним замену найденных функций в системе

$$(\ln u_{12})_{xt} + u_{22t} + \beta_{11}[(\ln u_{12})_x + u_{22}]_x + v_{11x} = 0, \quad (1-IV)$$

$$v_{11} - v_{22} + \left(\beta_{11} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \ln u_{12} + (\beta_{11} - \beta_{22})u_{22} = 0, \quad (2-IV)$$

$$\left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \ln u_{13} = \frac{\beta_{11} - \beta_{22}}{2} [(\ln u_{23})_x - (\ln u_{12})_x - 2u_{22}] + v_{33} - v_{11}, \quad (3-IV)$$

$$u_{22t} = -v_{22x} - \beta_{22}u_{22x}, \quad (5-IV)$$

$$v_{22} - v_{33} + \left(\beta_{22} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \ln u_{23} = 0, \quad (6-IV)$$

$$u_{22t} - (\ln u_{23})_{xt} = -v_{33x} - \beta_{22}[u_{22} - (\ln u_{23})_x]_x. \quad (9-IV)$$

Если из (6-IV) выразить v_{22} , а из (2-IV) функцию v_{11} и подставить в (3-IV), то можно вынести дифференциальный оператор за скобки

$$\left(\frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{2} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) (\ln u_{13} - \ln u_{12} - \ln u_{23}) = 0,$$

для тождественного выполнения равенства определим следующую связь между функциями

$$v_{13} = v_{12} v_{23}. \quad (43)$$

Использование (43) приводит систему к виду

$$\left(\beta_{11} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) [(\ln u_{12})_x + u_{22}] + v_{11x} = 0, \quad (1-IV)$$

$$v_{11} - v_{22} + \left(\beta_{11} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \ln u_{12} + (\beta_{11} - \beta_{22})u_{22} = 0, \quad (2-IV)$$

$$v_{33} - v_{11} - (\beta_{11} - \beta_{22})u_{22} - \left(\beta_{22} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \ln u_{23} - \left(\beta_{11} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \ln u_{12} = 0, \quad (3-IV)$$

$$u_{22t} = -v_{22x} - \beta_{22}u_{22x}, \quad (5-IV)$$

$$v_{22} - v_{33} + \left(\beta_{22} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \ln u_{23} = 0, \quad (6-IV)$$

$$u_{22t} - (\ln u_{23})_{xt} = -v_{33x} - \beta_{22}[u_{22} - (\ln u_{23})_x]_x. \quad (9-IV)$$

Из (3-IV) определим

$$v_{11} = v_{33} - \left(\beta_{22} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \ln u_{23} - \left(\beta_{11} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \ln u_{12} - (\beta_{11} - \beta_{22})u_{22} \quad (44)$$

В результате остались уравнения, которые после подстановки (44) совпали

$$v_{33x} - \left(\beta_{22} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) [(\ln u_{23})_x - u_{22}] = 0. \quad (1-V)$$

$$\text{Положим } v_{33} = \frac{1}{u_{12}}, \quad u_{23} = u_{22} = u_{12} = u(x, t). \quad (45)$$

Следствие. *Нелинейное уравнение в частных производных, заданное на функцию двух переменных $u(x, t)$*

$$u^2 \left(\beta_{22} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) [(\ln u)_x - u] + u_x = 0, \quad (46)$$

эквивалентно операторному уравнению Лакса (1) с дифференциальными операторами вида

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} + \begin{pmatrix} -(\ln u)_x - u & u & u^2 \\ u^{-1} & u & u \\ u^{-2} & u^{-1} & u - (\ln u)_x \end{pmatrix},$$

$$A = \begin{pmatrix} \beta_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{22} \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 2v_{11} & (\beta_{11} - \beta_{22})u & (\beta_{11} - \beta_{22})u^2 \\ (\beta_{11} - \beta_{22})u^{-1} & 2u^{-1} - \left(\beta_{22} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) \ln u & (\beta_{11} - \beta_{22})u \\ (\beta_{11} - \beta_{22})u^{-2} & (\beta_{11} - \beta_{22})u^{-1} & 2u^{-1} \end{pmatrix},$$

где
$$v_{11} = u^{-1} - \left([\beta_{22} + \beta_{11}] \frac{\partial}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial t} \right) \ln u - (\beta_{11} - \beta_{22})u$$

Выводы

1. В статье использовано операторное уравнение Лакса для построения нелинейного уравнения в частных производных. В качестве пары Лакса выбраны дифференциальные операторы первого порядка с матричными коэффициентами 3×3 .
2. Определены необходимые и достаточные условия, накладываемые на параметры и функции, при которых коммутатор двух дифференциальных операторов представляет оператор умножения.
3. Доказано, что если в операторах дифференциальный матричный коэффициент имеет нижнетреугольный вид, то система уравнений однозначно сводится к одному уравнению.
4. В случае, когда в операторах дифференциальный матричный коэффициент имеет диагональный вид, то система дифференциальных уравнений допускает вариацию функциональных переменных.

Библиографический список

1. Журавлев В.М. // ЖЭТФ, т. 110. № 6, с. 910-929. 1996.
2. Журавлев В.М. // Письма в ЖЭТФ. 61, в. 4. 254. 1995.
3. Журавлев В.М. Нелинейные волны в многокомпонентных системах с дисперсией и диффузией. Точно решаемые модели // Ульяновск: Изд-во УлГУ, 2001. 256 с.
4. Захаров В.Е. Солитоны // под ред. Р. Буллафа, Ф. Кодри. М.: Мир, 1970. 1983.
5. Захаров В.Е., Манаков С.В., Новиков С.П., Питаевский Л.П. / под ред. С.П. Новикова. Теория солитонов: Метод обратной задачи. М.: Наука, 1980. 319 с.

6. Карюк А.И., Редькина Т.В. Квазилинейное волновое уравнение, обладающее парой Лакса // Обозрение прикладной и промышленной математики. Т. 14, вып. 4. Москва, 2007. С. 717–718.
7. Лакс П.Д. и Ральф Ф.С. Теория рассеяния. М.: Мир, 1971. 312 с.

References

1. ZHuravlev V.M. // ZHENTF, t. 110. № 6 s. 910-929. 1996. (in Russ)
2. ZHuravlev V.M. // Pis'ma v ZHENTF. 61 v. 4. 254. 1995. (in Russ)
3. ZHuravlev V.M. Nelinejnye volny v mnogokomponentnyh sistemah s dispersiej i diffuziej. Tochno reshaemye modeli (Nonlinear waves in multicomponent systems with dispersion and diffusion. Exactly solvable models)//Ul'yanovsk, Izd-vo UIGU, 2001. – 256 s. (in Russ)
4. Zaharov V.E. Solitony (Solitons) // Pod red. R.Bullafa, F.Kodri. M.Mir 270. 1983. (in Russ)
5. Zaharov V.E., Manakov S.V., Novikov S.P., Pitaevskij L.P.; Pod red. S.P. Novikova. Teoriya solitonov: Metod obratnoj zadachi (Soliton theory: The inverse problem method) // – М.: Nauka, 1980. – 319 s. (in Russ)
6. Karyuk A.I., Red'kina T.V. Kvazilinejnoe volnovoe uravnenie, obladayushchee paroj Laksa (A quasilinear wave equation possessing a Lax pair) //Obozrenie prikladnoj i promyshlennoj matematiki. T. 14, vyp. 4. Moskva. 2007. S. 717-718 (in Russ).
7. Laks P.D. i Ral'f F.S. Teoriya rasseyaniya (Theory of scattering). М.: Mir, 1971. 312 s. (in Russ).

**Рукопись поступила в редакцию: 18.05.2018,
принята к публикации: 26.05.2018**

Сведения об авторах

Яновская Ольга Сергеевна, аспирант кафедры общей и теоретической физики, старший преподаватель кафедры прикладной математики и математического моделирования Северо-Кавказского федерального университета. Researcher ID: Q-7014-2018 Телефон: (8652) 33-01-45. Email: olenka_yan@mail.ru.

Сурнева Олеся Борисовна, аспирант кафедры общей и теоретической физики, Северо-Кавказского федерального университета. Researcher ID: Q-7009-2018 Телефон: 33-01-45. Email: surnevao@mail.ru.

About the authors

Yanovskaya Olga Sergeevna, postgraduate student of the Department of General and Theoretical Physics, senior lecturer of the Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling of the North Caucasus Federal University. Researcher ID: Q-7014-2018 Phone: (8652) 33-01-45. Email: olenka_yan@mail.ru.

Surneva Olesya Borisovna, post-graduate student of the Department of General and Theoretical Physics, North-Caucasian Federal University Researcher ID: Q-7009-2018 Phone: (8652) 33-01-45. Email: surnevao@mail.ru.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА

УДК 517.972:519.633

**Наац И.Э.,
Наац В.И.,
Ярцева Е.П.**

Северо-Кавказский федеральный университет,
г. Ставрополь, Россия
*yartseva_elena@mail.ru

**МЕТОДЫ АППРОКСИМАЦИИ ФУНКЦИИ
ОБОБЩЕННЫМИ ПОЛИНОМАМИ
В ЗАДАЧАХ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА,
СВЯЗАННЫХ С ВЫЧИСЛЕНИЯМИ
НА ПРИБЛИЖЕННЫХ ДАННЫХ**

Введение:

исследуются методы представления функций, заданных приближенно, их сингулярными интегралами применительно к задачам аппроксимации и численных методов решения краевых задач для дифференциальных уравнений. В подобной постановке задача относится к классу некорректно поставленных задач и требует для своего решения построения соответствующих регуляризирующих методов и алгоритмов.

**Материалы
и методы
исследований:**

рассматриваются вопросы аппроксимации исследуемой функции $f(x)$ обобщенными полиномами и исследуются некоторые важные свойства данного вычислительного процесса. Исследуется вопрос о том, в какой мере члены аппроксимирующих последовательностей, представленных обобщенными полиномами, «наследуют» аналитические свойства аппроксимируемых функций. Исследуется характер и определяются условия сходимости аппроксимирующих последовательностей к исходной функции. Приводятся примеры применения аппарата аппроксимации функции обобщенными полиномами, выводятся расчетные формулы вычислительного алгоритма.

**Результаты
исследований
и их обсуждение:**

результаты теоретических исследований, полученных в рамках настоящей работы, имеют самостоятельное значение в области вычислительной математики. Практическая значимость результатов состоит в том, что предложенные методы и подходы могут найти применение в прикладных задачах теории приближения функций, задачах прикладного анализа и краевых задачах математической физики, использующих приближенно заданные исходные данные, полученные в ходе физических экспериментов или эмпирические функции.

Ключевые слова:

аппроксимация функции, обобщенные полиномы, регуляризирующие алгоритмы, сингулярные интегралы, вычислительный процесс, задачи прикладного анализа.

Naats I.E.,
Naats V.I.,
Yartseva E.P.

North-Caucasian Federal University,
Stavropol, Russia

METHODS OF APPROXIMATION OF FUNCTIONS BY GENERALIZED POLYNOMIALS IN NUMERICAL ANALYSIS PROBLEMS RELATED TO CALCULATIONS ON APPROXIMATE DATA

Introduction: the methods of representation of functions given approximately by their singular integrals in relation to approximation problems and numerical methods for solving boundary value problems for differential equations are investigated. In such a statement, the problem belongs to the class of ill-posed problems and requires the construction of appropriate regularizing methods and algorithms for its solution.

Materials and methods of research: the questions of approximation of the function under study by generalized polynomials are considered and some important properties of this computational process are investigated. The question of the extent to which the members of the approximating sequences represented by generalized polynomials "inherit" the analytical properties of the approximated functions is investigated. The nature and conditions of convergence of approximating sequences to the original function are investigated. Examples of application of the function approximation apparatus by generalized polynomials are given, calculation formulas of the computational algorithm are derived.

Research results and their discussion: the results of theoretical studies obtained in the framework of this work are of independent importance in the field of computational mathematics. The practical significance of the results is that the proposed methods and approaches can be used in applied problems of the theory of approximation of functions, problems of applied analysis and boundary value problems of mathematical physics, using approximately given initial data obtained in the course of physical experiments or empirical functions.

Key words: function approximation, generalized polynomials, regularizing algorithms, singular integrals, computational process, applied analysis problems.

Введение

Представленная работа продолжает исследования авторов по методам представления функций их сингулярными интегралами в теории аппроксимации и численных методов решения краевых задач для дифференциальных уравнений [1–3]. При этом предполагается, что функции заданы приближенно (эмпирические функции) и не являются дифференцируемыми в обычном смысле. В подобной постановке задача относится к классу некорректно поставленных задач и требует для своего решения построения соответствующих регуляризирующих методов и алгоритмов [1]. В работе [1] рассматривались методы построения обобщенных производных суммируемых функций и их частных производных на основе сингулярных интегралов, исследовался вопрос их функциональной зависимости, а также проблема регуляризации сходимости сингулярных интегралов представления функций.

В данной работе эти исследования продолжаются и развиваются. Основное внимание уделяется вопросам аппроксимации исследуемой функции $f(x)$ обобщенными полиномами и исследованию свойств данного вычислительного процесса. Исследуется вопрос о том, в какой мере члены аппроксимирующих последовательностей, представленных обобщенными полиномами, «наследуют» аналитические свойства аппроксимируемых функций. Исследуется характер и определяются условия сходимости аппроксимирующих последовательностей к исходной функции. Приводятся примеры применения аппарата аппроксимации функции обобщенными полиномами, выводятся расчетные формулы вычислительного алгоритма.

Результаты теоретических исследований, полученных в рамках настоящей работы, имеют самостоятельное значение в области вычислительной математики. Практическая значимость результатов состоит в том, что предложенные методы и подходы могут найти применение в прикладных задачах теории приближения функций, задачах прикладного анализа и краевых задачах математической физики, использующих приближенно заданные исходные данные, полученные в ходе физических экспериментов или эмпирические функции.

Материалы и методы исследований

Постановка задачи. Аппроксимация исследуемой функции $f(x)$ обобщенными полиномами.

Приведем предварительно несколько пояснений относительно содержательности решаемых в работе задач, напомнив, прежде всего, что для всякой интегрируемой функции $f(x)$ ($f \in C_\Sigma(\Omega)$), определенной на $\Omega = [a, b]$, могут быть записаны следующие соотношения [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_a^b K_n(x, x') f(x') dx' = f_n(x, f) = (K_n f)(x) \\ \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x, f) = f(x) \end{array} \right. \quad (1)$$

где $K_n(x, x')$, $n = 1, 2, \dots$ – некая последовательность ядер интегральных операторов K_n [4].

В соответствии с этим, всякая суммируемая на Ω функция $f(x)$ в точке $x \in \Omega$ может рассматриваться как предел последовательности $\{(K_n f)(x)\}_{n=1}^\infty$, при условии, что указанные интегралы существуют. Последнее оговаривается теоремами Лебега в теории сингулярных интегралов [4]. В связи с этим можно говорить о том, что исследуемая функция $f(x)$ представлена последовательностью $\{(K_n f)(x)\}_{n=1}^\infty$ и соответственно писать $f \sim \{(K_n f)(x)\}_{n=1}^\infty$. Примером подобного представления функции $f(x)$ может служить известный в анализе интеграл Пуассона $P_n(x, f)$, ядром которого является функция

$$P_n(x, f) = \frac{n}{\pi} \cdot \frac{d}{n^2(x - x')^2 + d^2}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

где $d > 0$ – некий параметр.

Ясно, что в прикладных задачах (интерпретация эмпирических данных в рамках теории приближений, решение фундаментальных уравнений сеточными методами и т. п.) исследуемые функции представляются конечномерными векторами $\vec{f} = (f_1, \dots, f_m)$, $i = 1, \dots, m$, ассоциированными с точками $\{x_i\}$ ($i = 1, \dots, m$) в области Ω . Поэтому члены указанных последовательностей представляются обычно соответствующими интегральными суммами, то есть

$$(K_n f)(x) \sim \sum_{i=0}^m K_n(x, \xi_i) \cdot y_i \cdot \omega_i \cdot \Delta_i(x'), \quad m \rightarrow \infty \quad (3)$$

где $y_i = f(x'_i)$, $\Delta_i(x') = x'_{i+1} - x'_i$, ω_i – квадратурные коэффициенты, ξ_i – некоторая неопределенная точка элементарного интервала покрытия $[x'_{i+1}, x'_i] = \Omega'_i$.

В теории приближения функций суммы вида $\sum_{i=0}^m \bar{K}_{n,i}(x) \cdot f_i$ принято рассматривать как некие *обобщенные полиномы*. Таким образом, можно говорить об аппроксимации исследуемой функции $f(x)$ обобщенными полиномами при заданном значении n в каждой точке $x \in \Omega$. При использовании любого аппарата приближения функций возникает вопрос о том, в какой мере члены аппроксимирующих последовательностей «наследуют» аналитические свойства исследуемых функций $f(x)$. Кроме того, требуется определить условия сходимости аппроксимирующих последовательностей к исходной функции. Также желательно привести примеры применения аппарата аппроксимации функции обобщенными полиномами и вывести соответствующие расчетные формулы вычислительных алгоритмов. Исследованию этих вопросов посвящена данная работа.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследование свойств аппроксимации исследуемой функции $f(x)$ обобщенными полиномами.

В рассматриваемом случае речь идет о том, какие аналитические свойства (локально и в целом) функции $f(x)$ на Ω «наследуются» последовательностями $\{(K_n f)(x)\}_{n=1}^{\infty}$. Следует обратить внимание на то обстоятельство, что при всяком значении n функции $f_n(x_i f) = (K_n f)(x)$, определяемые, например, ядрами типа (2), есть непрерывные функции, если $f(x)$ принимает на Ω конечные значения ($|f(x)| \leq M$), в то время как предельный элемент последовательности $\{f_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ не обязан иметь точку x точкой непрерывности. Это обстоятельство указывает на то, что аналитическое поведение функ-

ций $f_n(x, f)$ и $f(x)$ в окрестности x может быть заметно отличным. Основным результатом в наследовании аналитических свойств исходной функции $f(x)$ на Ω элементами последовательности $\{f_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ является теорема 1.

Теорема 1. Если функция $f(x)$, определенная на Ω , принадлежит классу Липшица $\text{Lip}_M \alpha$, то функции $f_n(x, f) = (K_n f)(x)$ так же принадлежат этому классу для всех $n = 1, 2, \dots$

Доказательство. Остановимся кратко на доказательстве этой теоремы, пытаясь одновременно в большей мере расширить свойства аппроксимирующих функций $(K_n f)(x)$, порождаемых сингулярными интегралами (1). Ясно, что последние наследуются не только от исходной функции $f(x)$, но и в заметной степени от ядер $K_n(x, x')$. Известно, что функции $f(x)$, принадлежащие функциональному классу $\text{Lip}_M \alpha$, удовлетворяют условию

$$|f(x_2) - f(x_1)| \leq M |x_2 - x_1|^\alpha, \quad (4)$$

где $|f(x)| \leq M$ для всех $x \in \Omega$ и $\alpha \in (0, 1)$.

Ясно, что подобные функции, интегрируемые на Ω и интегралы в (1) существуют для всех пар (x, n) . Заметим, что ядра интегралов в (1) удовлетворяют двум условиям, а именно $K_n(x, x') = K_n(x - x')$ и $K_n(|x - x'|) \rightarrow 0$ при $|x - x'| \rightarrow 0$, что нетрудно видеть, например, для ядра (2). Далее полагаем для простоты, что область интегрирования $\Omega = [-a, a]$, где a – любое конечное число, и тогда $f_n(x, f)$ определяется интегралом вида

$$f_n(x, f) = \int_{-a}^a K_n(x - x') f(x') dx'. \quad (5)$$

В силу того обстоятельства, что ядро интегрального представления (5) обладает явно выраженным «фокусирующим» свойством, то есть тем, что поведение $f_n(x, f)$ зависит лишь от окрестности точки x , то без ограничения общности в (4) будем считать $a \rightarrow \infty$. Тогда представление (5) примет вид

$$f_n(x, f) = \int_{-\infty}^{\infty} K_n(x - x') f(x') dx'$$

Заменив переменную интегрирования x' на переменную $t = x - x'$, получим интеграл

$$f_n(x, f) = \int_{-\infty}^{\infty} K_n(t) f(x - t) dt$$

и оценим величину $|f_n(x_2, f) - f_n(x_1, f)|$, где x_1 и x_2 являются произвольными точками на оси абсцисс. Имеем неравенство

$$|f_n(x_2, f) - f_n(x_1, f)| \leq \int_{-\infty}^{\infty} K_n(t) \cdot |f_n(x_2 - t) - f_n(x_1 - t)| dt.$$

С учетом сформированного выше предположения (4) находим

$$|f_n(x_2, f) - f_n(x_1, f)| \leq M \cdot |(x_2 - t) - (x_1 - t)|^\alpha = M |x_2 - x_1|^\alpha.$$

В итоге приходим к оценке

$$|f_n(x_2, f) - f_n(x_1, f)| \leq M |x_2 - x_1|^\alpha, \quad (6)$$

для всех n и любых пар (x_1, x_2) . При построении (6) учтено условие

$$\int_{-\infty}^{\infty} K_n(z) dz = 1.$$

Последнее нетрудно продемонстрировать на примере ядра (2). Действительно

$$\int_{-\infty}^{\infty} K_n(z) dz = \frac{d}{\pi n} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dz}{z^2 + d^2/n^2} = \frac{d}{\pi \cdot n} \left(\frac{d}{n} \right)^{-1} \arctan \frac{z}{d/n} \Big|_{-\infty}^{\infty} = \frac{1}{n} \arctan \frac{z \cdot n}{d} \Big|_{-\infty}^{\infty} = 1$$

Неравенство (6) завершает доказательство теоремы.

Таким образом, функции последовательности $\{f_n(x, f) = (K_n f)(x)\}_{n=1}^{\infty}$ сохраняют принадлежность $f \in \text{Lip}_M \alpha$ с тем же показателем α . Напомним, что класс $\text{Lip}_M \alpha$ характеризуется парой чисел (M, α) , первое из которых определяет область возможных значений функций этого множества, а второе – меру их гладкости. В частности, при $\alpha = 1$ имеем дело с функциями, дифференцируемыми в общем смысле в каждой точке $x \in \Omega$.

Соотношение (6) может быть использовано в прикладных задачах, связанных с построением алгоритмов, реализующих аппроксимирующие возможности последовательностей $\{(K_n f)(x)\}_{n=1}^{\infty}$. Остановимся несколько подробнее на этих вопросах. Предположим, что исследуемая функциональная зависимость представлена достаточно сложными аналитическими выражениями и в вычислениях его целесообразнее заменить на более приемлемые аналоги, каковыми в частности могут быть степенные полиномы, ряды Фурье и так далее. Подобные ситуации возникают и в случае представления функций ряда наблюдений. В подобных задачах необходимо учитывать наличие ошибок, характеризующих степень неопределенности в исходных данных об исследуемой функциональной зависимости двух величин, скажем X и Y . В прикладном анализе функций удобно прибегать к так называемым σ – приближениям $f_\sigma(x)$, удовлетворяющим условиям $\|f(x) - f_\sigma(x)\| \leq \sigma \|f\|$, где $\sigma > 0$ – некий числовой коэффициент, а $f(x)$ – исследуемая функция. Если отклонения $f(x)$ от $f_\sigma(x)$ поточечно определены в пределах неких ошибок, то разумно ввести ограниче-

ние на меру допустимой близости двух смежных точек x_1 и x_2 , о которых речь шла в доказательстве приведенной выше теоремы. Подобные ограничения естественно связать с введением некоторого дополнительного параметра μ , определив его условием, дополняющим оценку (6), а именно

$$\min_{(x_1, x_2)} |x_2 - x_1| \geq \mu. \quad (7)$$

Ясно, что $\mu > 0$ и $\mu \rightarrow 0$ только при условии, что $\sigma \rightarrow 0$. Иными словами требуется ввести зависимость $\mu(\sigma)$ такую, что $\mu(\sigma) \rightarrow 0$ только в том случае, когда $\sigma \rightarrow 0$. В условиях теоремы 1 и определения (7) подобная зависимость может быть представлена в виде

$$\mu = \eta \sqrt[q]{\sigma}, \quad (0 < \alpha < 1),$$

где $\eta \geq 1$ (доверительный коэффициент).

Соотношение (8) эквивалентно $\mu = O(\sqrt[q]{\sigma})$, имеющему место для функций класса $\text{Lip}_M \alpha$. Возможны и иные приложения теоремы в задачах численного анализа, связанных с вычислениями на приближенных данных. В частности, соотношение (8) может быть использовано при выборе шага h в квадратурных формулах для рассмотренных интегралов. В частности при $\sigma > 0$ для исходных данных наименьший допустимый шаг квадратуры $h_{\min}$ не должен быть меньше $\mu(\sigma)$, определяемый (8).

Исследование характера и определение условий сходимости аппроксимирующих последовательностей к исходной функции.

Помимо рассматриваемых выше свойств элементов последовательностей $\{(K_n f)(x)\}_{n=1}^{\infty}$, связанных с принадлежностью исследуемых функций $f(x)$ классу $\text{Lip}_M \alpha$, необходимо коснуться и характера ее сходимости к предельному элементу, каковым является $f(x)$. В соответствии с определением (1) эта сходимость является слабой при $n \rightarrow \infty$. Вместе с тем, при построении алгоритмов, реализующих изложенную здесь теорию приближения функций, было бы желательным иметь дело с последовательностями, сходящимися к своим пределам в строгом смысле. В связи с этим возникает вопрос: можно ли исходя из слабо сходящихся последовательностей строить процессы аппроксимации, сходящиеся в строгом смысле на основе соответствующих ограничений? Речь идет, прежде всего, о выборе надлежащим образом подходящих функциональных пространств. Рассмотрение этого вопроса начнем с краткого сопоставительного анализа понятий сильной и слабой сходимости аппроксимирующих последовательностей.

Допустим, что некоторая последовательность функций $\{f_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$, принадлежащих множеству $F(\Omega) \subset C(\Omega)$ сходится к элементу $f_0 \in F(\Omega)$ по норме про-

пространства $C(\Omega)$, то есть имеет место предельное соотношение $\|f_n - f_0\|_C \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$. Подобную сходимость $f_n \rightarrow f_0$ по норме $\|\cdot\|_C$ принято считать сильной сходимостью. Из строгой сходимости $\{f_n(x)\}_{n=1}^\infty$ к предельному элементу f_0 следует сходимость этой последовательности и в смысле Коши, то есть соотношение $\|f_n - f_m\| \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty$ и $m \rightarrow \infty$ само по себе не влечет существование у последовательности $\{f_n(x)\}_{n=1}^\infty$ предельного элемента f_0 , о котором говорилось выше. Для последующей характеристики слабой сходимости введем несколько обозначений, ассоциируемых с понятием «скалярного произведения» элементов из $C(\Omega)$ (также сверткой). В частности интеграл в (1) будем писать в виде $\lim_{n \rightarrow \infty} (K_n, f)(x) = f(x)$, а интеграл $(10) - \lim_{n \rightarrow \infty} (K_n, 1) = 1$. Подобная форма записи исходных представлений более наглядно показывает, какой смысл обычно вкладывается в понятие слабой сходимости сингулярных интегралов функций. При построении алгоритмов оперирующих последовательностями указанного типа, желательно тем или иным образом обеспечить их равномерную сходимость в каждой точке $x \in \Omega$. Равномерная сходимость последовательностей Коши, как известно, является гарантией их сходимости к $f_0(x)$ в сильном смысле. Условие равномерной сходимости последовательностей Коши определяется теоремой 2:

Теорема 2. Последовательность $\{(K_n f)(x)\}_{n=1}^\infty$ сходится в смысле Коши равномерно по $x \in \Omega$ при условии, если последовательность $\{(K_n f)(x)\}_{n=1}^\infty$ сходится в строгом смысле, а элемент f принадлежит единичному шару в $C(B_C(f, 1))$.

Не останавливаясь подробно на доказательстве теоремы, заметим, что ее справедливость во многом объясняется следующим неравенством

$$|f_n(x, f) - f_m(x, f)| = |(K_n f)(x) - (K_m f)(x)| \leq \|K_n(x) - K_m(x)\|_C \cdot \|f\|_C$$

В условии теоремы $f \in B_C(f, 1)$ и значит $\|f\|_C \leq 1$, что необходимо влечет условие

$$|f_n(x, f) - f_m(x, f)| \leq \|K_n(x) - K_m(x)\|_C$$

и теперь остается потребовать сходимости $\|K_n(x) - K_m(x)\|_C \rightarrow 0$ при $n, m \rightarrow \infty$. Поскольку $K_n(x, x') = K_n(r)$, где $r = x - x'$, то формально требуется обеспечить сходимость интеграла

$$\int_{\Omega} |K_n(r) - K_m(r)| dr, n, m \rightarrow \infty. \quad (9)$$

Примеры применения аппарата аппроксимации функции обобщенными полиномами, вывод расчетных формул вычислительного алгоритма.

Для примера обратимся к ядру (2). В этом случае имеем

$$|K_n(r) - K_m(r)| = \frac{d}{\pi} \cdot \frac{|m-n| \cdot \left| r^2 - \frac{d^2}{m \cdot n} \right|}{m \cdot n \cdot \left(r^2 + \frac{d^2}{m^2} \right) \left(r^2 + \frac{d^2}{n^2} \right)}$$

При больших значениях m и n имеет место оценка

$$|K_n(r) - K_m(r)| < \frac{d}{\pi} \cdot \frac{|m-n|}{m \cdot n} r^{-2}, \quad r \in \Omega_r = [r_1, r_2],$$

которая явно указывает на способ регуляризации сходимости интеграла (9). Речь, как и раньше, должна идти об исключении из области интегрирования Ω_r нуля, то есть точки $r = 0$. Последнее достигается в вычислениях соответствующих интегралов исключением области $|r| \geq \mu$, где μ – параметр, который возникает в теории последовательностей типа $\{(K_n f)(x)\}_{n=1}^{\infty}$ в связи с теоремой 1. Требуемую регуляризацию сходимости интегралов, используемых выше, достаточно просто осуществить при построении их матричных аналогов в квадратурных процессах. Достигается это путем разумного ограничения дискретизации непрерывных величин. Речь идет о соотношении $h_{\min} \geq \mu$, где параметр μ вводился в связи с необходимостью учета приближенного характера исходных данных в задачах аппроксимации.

Рассмотрим простой пример реализации интегральной суммы (3) в предположении, что в окрестности точек x_i ($i = 0, m$), с помощью которых осуществляется разбиение области интегрирования $\Omega = [a, b]$ на элементарные интервалы $X_l = \{x' : x'_{l-1} \leq x' \leq x'_l\}$ ($l = 1, m$), исследуемая функция $f(x)$ приближается отрезками прямых

$$\varphi_l^{(1)}(x') = f_{l-1} + \frac{f_l - f_{l-1}}{x'_l - x'_{l-1}}(x' - x'_{l-1})$$

В этой ситуации имеют место следующие приближения

$$f(x) \sim \int_a^b K_n(x, x') \varphi^{(1)}(x') dx' \sim \sum_{k=0}^m f_k G_{m,k}^{(n)}(x)$$

где

$$\begin{cases} G_{m,k}^{(n)}(x) = M_{m,k}^{(n)}(x) + N_{m,k+1}^{(n)}(x), & k = \overline{1, m}, \\ M_{m,k=0}^{(n)}(x) = 0, & \forall x \in [a, b], \\ N_{m,m+1}^{(n)}(x) = 0, & \forall x \in [a, b] \end{cases}$$

$$\begin{cases} N_{m,l}^{(n)}(x) = x_l A_{m,l}^{(n)}(x) - B_{m,l}^{(n)}(x), \\ M_{m,l}^{(n)}(x) = B_{m,l}^{(n)}(x) - x_{l-1} A_{m,l}^{(n)}(x) \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_{m,l}^{(n)}(x) = \frac{1}{x_l - x_{l-1}} \int_{x_{l-1}}^{x_l} K_n(x, x') dx', \\ B_{m,l}^{(n)}(x) = \frac{1}{x_l - x_{l-1}} \int_{x_{l-1}}^{x_l} x' \cdot K_n(x, x') dx' \end{cases}$$

Формулы (10) применимы в случае, если $x \notin [x_{l-1}, x_l]$. В противном случае в подынтегральных выражениях осуществляется замена типа

$$K_n(x, x') := K_n(\mu) = C_{n,\mu}$$

Напомним, что в вычислительных задачах теории потенциала обычно полагают $C_{\eta,\mu} = 0$. Речь идет об отбрасывании точки $r = 0$ (точек диагонали ядра $x = x'$). Предложенный способ регуляризации сходимости указанных интегралов следует считать более «мягким». Конечно, при этом необходимо, так или иначе, указывать и способ оценки неизвестного параметра μ и его содержательный смысл, что и осуществлено выше при выводе соотношения для $\mu(\sigma)$ в функциональном классе $\text{Lip}_M \alpha$.

Основной результат проведенных выше исследований

по созданию аппарата приближения функций на основе сингулярного интеграла (1) может быть сформулирован следующим образом: если исследуемая функция $f(x)$ представлена вектором приближенных значений $\vec{f}_\sigma = \{f_\sigma(x_i)\}_{i=0}^m$, то восстановление ее непрерывного хода в области определения Ω , может быть осуществлено эквивалентным суммационным аналогом в виде

$$\sum_{k=0}^m f_{\sigma,k} G_{m,k}^{(n)}(x, \mu) = S_{\mu(\sigma)}^{(n,m)}(x).$$

Сумма $S_{\mu(\sigma)}^{(n,m)}(x)$ сходится к $f(x)$ в слабом смысле при $\sigma \rightarrow \infty$ ($\mu(\sigma) \rightarrow 0$), $m, n \rightarrow \infty$ в каждой точке x для локально суммируемой функции.

Выводы

Рассмотренные методы аппроксимации функций, заданных приближенно обобщенными полиномами, полученные результаты исследования данного вычислительного процесса, определение способа регуляризации сходимости указанных сингулярных интегралов могут найти дальнейшее применение в задачах вычислительной математики, например, в моделях, основанных на дифференциальных уравнениях, и требуют своей дальнейшей апробации в вычислительном эксперименте.

Библиографический список

1. Наац И.Э., Наац В.И., Ярцева Е.П. Построение обобщенных производных для суммируемых функций на основе их сингулярных интегралов и исследование регуляризации их сходимости / Естественные и технические науки в современном мире: сборник научных статей по итогам XII международной научно-практической конференции (г. Москва, 10 февраля 2017 г.). М.: Научный журнал «CHRONOS». 2017. С. 54–62.
2. Наац И.Э., Наац В.И., Рыскаленко Р.А., Ярцева Е.П. Операторы потенциального типа в задачах прикладного анализа / Наука. Инновации. Технологии: Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета. Ставрополь, 2017. № 3. С. 42–60.
3. Наац, И.Э., Ярцева Е.П. Методы приближения суммируемых функций на основе интеграла Стилтеса применительно к задачам прикладного анализа // Наука. Инновации. Технологии: Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета. Ставрополь. 2016. №1. С. 33–46.
4. Данфорд, Н. Линейные операторы: общая теория / Н. Данфорд, Дж. Т. Шварц. М.: Изд-во иностранной литературы, 1962. 427 с.

References

1. Naats I.E., Naats V.I., Yartseva E.P. Construction of generalized Production for summable functions on the basis of their singular integrals and following the regularization of their convergence / Natural and technical Sciences in the modern world: collection of scientific articles on the results of the XII international scientific-practical conference (Moscow, February 10, 2017). M.: Scientific journal «CHRONOS». 2017. P. 54–62.
2. Naats I.E., Naats V.I., Ruskalenko R.A., Yartseva E.P. Operators of potential type in problems of applied analysis / Science. Innovations. Technologies: scientific journal of the North Caucasus Federal University. Stavropol, 2017. № 3. P. 42–60.
3. Naats I.E., Yartseva E.P. Methods of approximation of integrable functions based on the Stieltjes integral with respect to problems in applied analysis. / Science. Innovations. Technologies: scientific journal of the North Caucasus Federal University. Stavropol. 2016. №1. P. 33–46.
4. Dunford N. Linear operators: General theory / H. Dunford, J.T. Schwartz. Moscow: publishing House of foreign literature, 1962. 427 p.

Рукопись поступила в редакцию: 25.05.2018,
принята к публикации: 26.08.2018

Об авторах

Наац Игорь Эдуардович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник института повышения квалификации и научно-педагогических кадров Северо-Кавказского федерального университета. Scopus ID , Researcher ID Телефон (8-652) 35-21-10 (1154), naatsie@yandex.ru

Наац Виктория Игоревна, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры прикладной математики и математического моделирования Института математики и естественных наук Северо-Кавказского федерального университета. Телефон 8-918-744-82-89, VINaac@yandex.ru

Ярцева Елена Павловна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и математического моделирования Института математики и естественных наук Северо-Кавказского федерального университета. Scopus ID 57201409143, Телефон 8-918-759-23-15, yartseva_elena@mail.ru.

About the authors

Igor E. Naats, doctor of physical and mathematical Sciences, Professor, leading researcher of the Institute of training and scientific-pedagogical personnel of the North-Caucasus Federal University. Phone (8-652) 35-21-10 (1154), naatsie@yandex.ru.

Victoria I. Naats, doctor of physico-mathematical Sciences, associate Professor, Professor, Department of applied mathematics and mathematical modeling Institute of mathematics and natural Sciences North-Caucasus Federal University. Scopus ID, Researcher ID Phone 8-918-744-82-89, VINaac@yandex.ru.

Elena P. Yartseva, candidate of physico-mathematical Sciences, associate Professor of applied mathematics and mathematical modeling Institute of mathematics and natural Sciences North-Caucasus Federal University. Scopus ID, Researcher ID Phone 8-988-119-68-15, yartseva_elena@mail.ru.

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 539.2

Савотченко С.Е. Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия
savotchenkose@mail.ru

**СВЯЗАННЫЕ СОЛИТОННЫЕ
СОСТОЯНИЯ, ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ
ВБЛИЗИ ДЕФЕКТА
В НЕЛИНЕЙНОЙ СРЕДЕ**

Введение: актуальность исследования обусловлена тем, что эффекты локализации возбуждений вблизи границ раздела нелинейных сред играют важную роль в различных технических приложениях твердотельной и опто-электроники. Целью работы является нахождение решений нелинейного уравнения Шредингера и энергетических уровней стационарных локализованных вблизи дефекта состояний в рамках модели, которая представляет собой обобщение моделей двухуровневых систем.

Материалы и методы: для исследования энергии локализации возбуждений в нелинейных средах с дефектами применяются методы теоретической физики твердых тел и нелинейной динамики, которые базируются на традиционных методах математической физики.

Результаты и обсуждение: предложена модель, представляющая собой обобщение модели взаимодействующих на дефекте возбуждений с двумя ветвями закона дисперсии на случай нелинейной среды. В основе модели лежат нелинейные уравнения Шредингера. Нелинейные уравнения Шредингера описывают динамику возбуждений в нелинейных средах керровского типа. Рассмотрены вопросы существования различных видов локализованных состояний в двухуровневой системе с отличающимися параметрами закона дисперсии. Получены и проанализированы решения нелинейных уравнений Шредингера как положительным, так и с отрицательным ангармонизмом, в разделенных плоским дефектом фокусирующих и дефокусирующих средах с керровской нелинейностью.

Выводы: показано, что в рассматриваемой системе существуют нелинейные локализованные состояния нескольких типов, представляющие собой связанные солитонные решения несимметричных профилей. Определены энергии связанных на дефекте солитонных состояний для случаев положительной и отрицательной нелинейности среды. Указаны условия существования таких связанных солитонных состояний. В предельных случаях, характеризующихся степенью близости к краю нижней границы ветви сплошного спектра, уровни энергии получены в явном аналитическом виде. Рассмотренные в данной работе состояния описывают затухание поля, как симметричное, так и несимметричное относительно границы раздела сред при удалении от нее. Существование связанных солитонных состояний важно при разработке квантовых систем, основанных на свойствах нелинейных поверхностных волн в слоистых структурах. Системы такого типа обладают широким набором важных физических приложений, которые находят применение, как в нелинейной динамике твердого тела, так и в нелинейной оптике при разработке устройств с использованием нелинейных фотонных кристаллов и периодических волноводных структур.

Ключевые слова: нелинейное уравнение Шредингера, плоский дефект, солитон, локализованные состояния, нелинейные волны.

Savotchenko S.E. Belgorod state technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russia

BOUND SOLITON STATES LOCALIZED NEAR DEFECT IN A NONLINEAR MEDIUM

- Introduction:** the relevance of the study is due to the fact that the effects of localization of excitations near the interfaces of nonlinear media play an important role in various technical applications of solid-state and opto-electronics. The aim of the paper is to find the solutions of the nonlinear Schrödinger equation and the energy levels of stationary localized near the defect states in the framework of the model, which is a generalization of models of two-level systems.
- Materials and methods:** methods of theoretical physics of solids and nonlinear dynamics based on traditional methods of mathematical physics are used to investigate the localization energy of excitations in nonlinear media with defects.
- Results and discussion:** The model generalized of the model excitation interacting on a defect with two branches of the dispersion law to the case of a nonlinear medium is presented in the article. The model is based on the nonlinear Schrödinger equations. Nonlinear Schrödinger equations describe the dynamics of excitations in nonlinear media of the Kerr type. The problems of the existence of different types of soliton states in a two-level system with different parameters of the dispersion law are considered. Solutions of the nonlinear Schrödinger equations with positive and negative anharmonicity in the focusing and defocusing media separated by a planar defect with Kerr nonlinearity are obtained and analyzed.
- Conclusions:** It is shown that in the system under consideration there exist nonlinear localized states of several types, which are related soliton solutions of asymmetric profiles. The energies of bound on defect soliton states are determined for cases of positive and negative nonlinearity of the medium. Conditions for the existence of such coupled soliton states are derived. In limiting cases, characterized by the degree of proximity to the edge of the lower boundary of the branch of the continuous spectrum, the energy levels are obtained in an explicit analytical form. The states considered in this paper describe the damping of the field, both symmetric and asymmetric with respect to the interface of the media when moving away from it. The existence of bound soliton states is important to develop of quantum systems based on the properties of nonlinear surface waves in layered structures. Systems of such a type possess a wide range of important physical applications in nonlinear dynamics of a solid body and in nonlinear optics in the development of devices using nonlinear photonic crystals and periodic waveguide structures.
- Key words:** Nonlinear Schrödinger equation, plane defect, soliton, localized states, nonlinear waves.

Введение

В различных приложениях твердотельной электроники играют важную роль эффекты локализации возбуждений вблизи границ раздела нелинейных сред. К примеру, локализация электромагнитных волн вблизи границ раздела линейной и нелинейной сред рассматривалась в [1], где указано существование нелинейных локализованных возбуждений с несимметричным профилем и называемых нелинейными поверхностными волнами. Во многих ситуациях возникает необходимость изучения как раз именно

таких особенностей локализации возбуждений, которые обусловлены характером их взаимодействия с дефектами [2, 3].

Нелинейное уравнение Шредингера (НУШ) широко применяется для построения математических моделей сред с дефектами [4]. Как было показано в [5], НУШ может описывать состояния полей различной физической природы: упругого, электрического и магнитного. Поэтому для описания новых эффектов, связанных с локализацией возбуждений различной физической природы вблизи дефектов, имеет смысл далее рассматривать математическую модель, использующую НУШ, которому подчиняется функция ψ , выступающая в роли огибающей комплексного поля компонент вектора намагниченности в легкоосном ферромагнетике, либо комплексной амплитуды упругого поля смещения сдвиговой волны в кубическом кристалле с плоским дефектом, либо комплексной функции из амплитуд компонент электрического поля в оптической нелинейной среде [6]. Тогда параметры НУШ будут иметь соответствующий физический смысл в рамках одной из трех указанных моделей.

Материалы и методы исследования.

Основные уравнения модели

В данной работе для исследования энергии локализации возбуждений в нелинейных средах с дефектами применяются методы теоретической физики твердых тел и нелинейной динамики, которые базируются на традиционных методах математической физики.

Рассмотрим контакт двух нелинейных сред с различными физическими характеристиками, в том числе и по критерию нелинейности. Среды разделяет плоская граница, проходящая через начало координат, перпендикулярно оси Ox . Предполагается, что возмущение параметров сред, создаваемой границей раздела как плоским дефектом, сосредоточено на расстояниях, которые существенно меньше размеров возбуждений, и поэтому оно может считаться локальным.

Рассмотрим возбуждения, взаимодействующие вблизи такого плоского дефекта, на основе одномерной модели двухуровневой системы, в которой возбуждение на границе раздела сред может находиться в двух состояниях с различными энергиями Ω_1 и Ω_2 . Взаимодействие с границей раздела сред можно описывать короткодействующим потенциалом с дельта-функцией Дирака.

Будем использовать для описания взаимодействия нелинейных возбуждений, локализуемых вблизи дефекта, НУШ:

$$i \frac{\partial \psi_j}{\partial t} = -\frac{1}{2m_j} \frac{\partial^2 \psi_j}{\partial x^2} - \Omega_j \psi_j - \gamma_j(x) |\psi_j|^2 \psi_j + U_j(x). \quad (1)$$

Здесь и далее индекс принимает два значения: $j = 1, 2$. Параметры нелинейности сред для возбуждений первого и второго состояния считаются различными по разные стороны от плоской границы раздела сред:

$$\gamma_j(x) = \begin{cases} \gamma_j^{(-)}, & x < 0 \\ \gamma_j^{(+)}, & x > 0 \end{cases}$$

В (1) m_j – эффективная масса возбуждений, U_j – потенциалы, описывающие взаимодействие волн на дефекте:

$$U_1(x) = (\alpha_1 \psi_1 + \beta \psi_2) \delta(x), \quad U_2(x) = (\alpha_2 \psi_2 + \beta \psi_1) \delta(x) \quad (2)$$

Следует отметить, что уравнения (1) являются эйлеровыми уравнениями для лагранжиана с плотностью

$$L = L_1 + L_2 - U_{\text{int}}$$

где

$$L_j = i \left(\psi_j^* \frac{\partial \psi_j}{\partial t} - \psi_j \frac{\partial \psi_j^*}{\partial t} \right) - \frac{1}{2m_j} \left| \frac{\partial \psi_j}{\partial x} \right|^2 + \Omega_j |\psi_j|^2 + \frac{\gamma_j}{2} |\psi_j|^4$$

$$U_{\text{int}} = \{ \alpha_1 |\psi_1|^2 + \alpha_2 |\psi_2|^2 + \beta (\psi_1^* \psi_2 + \psi_2^* \psi_1) \} \delta(x)$$

Для нелинейной среды лагранжиан подобной формы использовался в [10] при описании колебательных состояний в кристалле с точечным дефектом при наличии одной ветви в спектре. Для линейной среды в [7] при изучении распространения упругих волн с двумя ветвями закона дисперсии использовался гамильтониан, связанный с приведенным здесь лагранжианом при $\gamma_j = 0$. Гамильтониан, связанный с приведенным в данной работе лагранжианом, для описания двухуровневой квантовой линейной системы использовался в [8]. В [11] приведен гамильтониан сходного вида для случая взаимодействия экситонов и биэкситонов в симметричной трехслойной структуре кристаллов типа CdS и CdSe, где в качестве искоемых полей выступали положительно- и отрицательно-частотные компоненты электромагнитной нелинейной волны.

Стационарные состояния с энергией E , определяемые из уравнений (1), можно представить в виде:

$$\psi_j(x, t) = \psi_j(x) \exp(iEt).$$

Тогда решение НУШ (1) с потенциалами (2) сводится к решению стационарных уравнений:

$$\frac{1}{2m_j} \psi_j''(x) + (\Omega_j - E) \psi_j(x) + \gamma_j |\psi_j(x)|^2 \psi_j(x) = 0 \quad (3)$$

с граничными условиями:

$$\psi_j(+0) = \psi_j(-0) = \psi_j(0); \quad (4)$$

$$\begin{cases} \psi'_1(+0) - \psi'_1(-0) = 2m_1 \{ \alpha_1 \psi_1(0) + \beta \psi_2(0) \}, \\ \psi'_2(+0) - \psi'_2(-0) = 2m_2 \{ \alpha_2 \psi_2(0) + \beta \psi_1(0) \}. \end{cases} \quad (5)$$

В линейной среде без дефекта существуют стационарные состояния с квадратичным законом дисперсии. При наличии дефекта в линейной среде возможно существование локализованных состояний с несимметричным профилем, локализованным только по одну сторону от дефекта [7].

Результаты и их обсуждение

1. Нелинейные среды с положительным ангармонизмом

В отсутствие дефекта в нелинейной среде при положительном ангармонизме и одинаковых параметрах сред (когда $\gamma_j(x) > 0$, $m_j = m$, $\Omega_j = \Omega$, $U_j = 0$, $j = 1, 2$) существует солитонное решение НУШ вида:

$$\psi(x, t) = \frac{A \exp(iEt)}{\operatorname{ch} k(x - x_0)}, \quad (6)$$

локализованное с максимумом в точке $x = x_0$, причем волновое число k является свободным параметром, амплитуда локализации: $A = k / \sqrt{\gamma m}$, энергия: $E = k^2 / 2m + \Omega$.

Далее будем рассматривать различные типы решений стационарных НУШ (3), удовлетворяющее граничным условиям (4) и (5).

В нелинейной среде с положительным ангармонизмом (когда $\gamma_j(x) > 0$ для всех x) при наличии дефекта решение стационарных НУШ (3), удовлетворяющее граничным условиям (4) и (5), представляется в виде:

$$\psi_j(x) = \begin{cases} \frac{A_j}{\operatorname{ch} k_j(x - x_1)}, & x > 0 \\ \frac{B_j}{\operatorname{ch} k_j(x - x_2)}, & x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

где x_j – параметры возбуждений по разные стороны от дефекта. Подстановка (7) в (3) позволяет получить амплитуды:

$$A_j = k_j (m_j \gamma_j^{(+)})^{-1/2}, \quad B_j = k_j (m_j \gamma_j^{(-)})^{-1/2}, \quad (8)$$

Волновые числа связаны с энергией соотношением:

$$k_j^2 = 2m_j(E - \Omega_j). \quad (9)$$

Отсюда следует связь волновых чисел:

$$k_2^2 = m_2 k_1^2 / m_1 + 2m_2(\Omega_1 - \Omega_2). \quad (10)$$

Подстановка волновой функции (7) в граничное условие (4) приводит к связям амплитуд:

$$B_j = A_j \operatorname{ch} k_j x_2 / \operatorname{ch} k_j x_1,$$

которые при учете выражений (8) позволяют получить соотношения:

$$\operatorname{ch} k_j x_2 / \operatorname{ch} k_j x_1 = \sqrt{\gamma_j^{(+)} / \gamma_j^{(-)}}. \quad (11)$$

Подстановка волновой функции (7) в граничное условие (5) приводит к соотношению, связывающему параметры среды, дефекта и возбуждений:

$$4m_1 m_2 \beta^2 = \Delta_1 \Delta_2, \quad (12)$$

$$\text{где} \quad \Delta_j = 2m_j \alpha_j - k_j (\operatorname{th} k_j x_1 - \operatorname{th} k_j x_2).$$

Выражение (12) далее будем называть дисперсионным соотношением, так как оно связывает энергию локализованного состояния с параметрами среды, при учете в нем (9)–(11).

а. Симметрично локализованные связанные состояния в среде с положительным ангармонизмом

Сначала рассмотрим возможность существования локализованного связанного состояния, в котором положения максимумов возбуждений расположены симметрично относительно дефекта, то есть когда $x_2 = -x_1 = -x_0$. Тогда получается, что $\beta_j = A_j$, а из (11) следует, что состояния такого типа реализуются в случае одинакового положительного ангармонизма по обе стороны от дефекта, то есть когда $\gamma_j^{(+)} = \gamma_j^{(-)}$. Из (12) для данного вида состояния получается, дисперсионное соотношение

$$m_1 m_2 \beta^2 = (m_1 \alpha_1 - k_1 \operatorname{th} k_1 x_0)(m_2 \alpha_2 - k_2 \operatorname{th} k_2 x_0). \quad (13)$$

Данное дисперсионное соотношение с учетом (9) определяет в неявном виде зависимость энергии связанного состояния симметричного типа с параметрами среды.

Из (13) при отсутствии взаимодействия ветвей закона дисперсии на дефекте, когда $\beta = 0$, следует, что возбуждения становятся независимыми, причем законы дисперсии независимых ветвей определяются выражениями:

$$m_j \alpha_j = k_j \operatorname{th} k_j x_0.$$

Такие выражения совпадают с точностью до обозначений с соотношением между параметрами среды и локализованного состояния, полученным в [10].

Далее проанализируем частные случаи дисперсионного соотношения взаимодействующих с дефектом (когда $\beta \neq 0$) и друг с другом (когда $\alpha_j \neq 0$) возбуждений. В самом простом варианте при одинаковых параметрах сред, когда $\alpha_j = \alpha > 0$, $\Omega_j = \Omega$, $m_j = m$, $\Omega_j = \Omega$, из (10) следует, что

$$k_1 = k_2 = k = \sqrt{2m(E - \Omega)}.$$

Тогда из (13) получается, дисперсионное соотношение:

$$k \operatorname{th} k x_0 = m(\alpha \pm \beta),$$

из которого представляется возможным получить значение энергии связанных состояний в явном виде для случая малых энергий локализации возбуждений (в смысле близости энергии к краю энергетической зоны, то есть при E близком к Ω), когда $k x_0 \ll 1$, и для случая больших энергий, когда $k x_0 \gg 1$:

$$E = \begin{cases} \Omega + (\alpha \pm \beta) / x_0, & k x_0 \ll 1 \\ \Omega + m(\alpha \pm \beta)^2 / 2, & k x_0 \gg 1. \end{cases} \quad (14)$$

Для существования связанных низкоэнергетических состояний такого вида, когда $k x_0 \ll 1$, при $x_0 > 0$ должно выполняться $\alpha > \pm \beta$, а при $x_0 < 0$ должно быть $\alpha < \pm \beta$, иначе волновые числа становятся комплексными.

Если теперь полагать, что все параметры сред различны, то есть $\alpha_1 \neq \alpha_2$, $m_1 \neq m_2$ и $\Omega_1 \neq \Omega_2$, в пределе малых значений $k_j x_0 \ll 1$ из (13) можно получить энергии связанных состояний рассматриваемого вида:

$$E = \Omega_1 + \frac{\alpha_1 \{\alpha_2 - 2x_0(\Omega_1 - \Omega_2)\} - \beta^2}{2x_0(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (15)$$

Следует отметить, что при низких значениях энергии, когда $E \ll \Omega_j + 1/2m_j x_0^2$, для существования связанных состояний такого вида при $x_0 > 0$ должны выполняться одни из требований:

- 1) $\beta^2 > \alpha_1 \{\alpha_2 - 2x_0(\Omega_1 - \Omega_2)\}$ и $\alpha_1 + \alpha_2 < 0$ или
- 2) $\beta^2 < \alpha_1 \{\alpha_2 - 2x_0(\Omega_1 - \Omega_2)\}$ и $\alpha_1 + \alpha_2 > 0$;

При $x_0 < 0$ должны выполняться одни из требований:

- 1) $\beta^2 < \alpha_1 \{\alpha_2 - 2x_0(\Omega_1 - \Omega_2)\}$ и $\alpha_1 + \alpha_2 < 0$ или
- 2) $\beta^2 > \alpha_1 \{\alpha_2 - 2x_0(\Omega_1 - \Omega_2)\}$ и $\alpha_1 + \alpha_2 > 0$.

б. Несимметрично локализованные связанные состояния в среде с положительным ангармонизмом

Теперь рассмотрим возможность существования связанного состояния, несимметрично локализованного вблизи дефекта, положив $x_2 = 0$. Тогда из (12) получается дисперсионное соотношение:

$$4m_1m_2\beta^2 = (2m_1\alpha_1 - k_1\text{th}k_1x_1)(2m_2\alpha_2 - k_2\text{th}k_2x_1). \quad (16)$$

При одинаковых параметрах сред, и различных характеристиках нелинейности, но когда выполняется требование $\gamma_1^{(-)} / \gamma_1^{(+)} = \gamma_2^{(-)} / \gamma_2^{(+)}$, из (16) можно найти уровни энергии связанных состояний рассматриваемого вида:

$$E = \Omega + \frac{\gamma_1^{(+)}(\alpha \pm \beta)}{\gamma_1^{(+)} - \gamma_1^{(-)}}. \quad (17)$$

Если теперь полагать, что все параметры сред различны, то из (11) тогда получается

$$\text{ch}k_jx_1 = \sqrt{\gamma_j^{(-)} / \gamma_j^{(+)}}.$$

Отсюда следует связь волновых чисел $k_2 = \xi k_1$, где $\xi = \Gamma_2 / \Gamma_1$, $\Gamma_j = \text{Arch} \sqrt{\gamma_j^{(-)} / \gamma_j^{(+)}}$. Подставив данную связь в (10), можно получить волновое число

$$k_1^2 = \frac{2m_1m_2(\Omega_1 - \Omega_2)}{\xi^2 m_1 - m_2}, \quad (18)$$

С другой стороны, из (16) в рассматриваемом случае получается соотношение:

$$4m_1m_2\beta^2 = (2m_1\alpha_1 - k_1\eta_1)(2m_2\alpha_2 - k_2\eta_2\xi), \quad (19)$$

где $\eta_j = (1 - \gamma_j^{(-)} / \gamma_j^{(+)})^{1/2}$. Это означает, что для существования состояний такого вида с энергией

$$E = \Omega_1 + \frac{m_2(\Omega_1 - \Omega_2)}{\xi^2 m_1 - m_2}, \quad (20)$$

должна существовать фиксированная связь между параметрами среды

$$\beta^2 = \alpha_1\alpha_2 + \delta, \text{ где}$$

$$\delta = \left(\frac{\Omega_1 - \Omega_2}{2(\xi^2 m_1 - m_2)} \right)^{1/2} \left\{ \xi\eta_1\eta_2 \left(\frac{\Omega_1 - \Omega_2}{2(\xi^2 m_1 - m_2)} \right)^{1/2} + \frac{\xi m_1\alpha_1\eta_2 - m_2\alpha_2\eta_1}{(m_1m_2)^{1/2}} \right\}.$$

Ясно, что выполнение такого требования можно добиться за счет большого количества варьируемых параметров сред.

Существование связанного состояния с различными $x_1 \neq x_2$ удастся проанализировать при одинаковых параметрах сред, но при выполнении $\gamma_1^{(-)} = \gamma_2^{(-)}$ и $\gamma_1^{(+)} = \gamma_2^{(+)}$. В этом случае дисперсионное соотношение (12) принимает вид:

$$k(\text{th}kx_1 - \text{th}kx_2) = 2m(\alpha \pm \beta). \quad (21)$$

В явном виде представляется возможным из (21) получить значению энергии связанных состояний для предельных случаев, когда $kx_j \ll 1$ и $kx_j \gg 1$:

$$E = \begin{cases} \Omega + (\alpha \pm \beta)/(x_1 - x_2), & kx_j \ll 1 \\ \Omega + 2m(\alpha \pm \beta)^2, & kx_j \gg 1. \end{cases} \quad (22)$$

Для существования связанных состояний такого вида вблизи края зоны при $x_1 > x_2$ должно выполняться $\alpha > \pm\beta$, а при $x_1 < x_2$ должно быть $\alpha < \pm\beta$.

2. Нелинейные среды с отрицательным ангармонизмом

Рассмотрим теперь случай отрицательных значений параметров нелинейности сред, когда $\gamma_j(x) < 0$ для всех x . В отсутствие дефекта в нелинейной среде с отрицательным ангармонизмом и одинаковых параметрах сред (когда $\gamma_j(x) = -\gamma < 0$, $m_j = m$, $\Omega_j = \Omega$, $U_j = 0$) существует солитонное решение НУШ (1) вида

$$\psi(x, t) = \frac{A \exp(iEt)}{\text{sh}k(x - x_0)},$$

где энергия $E = k^2 / 2m + \Omega$ и амплитуда $A = k / \sqrt{\gamma m}$.

При наличии дефекта решение НУШ (3) при отрицательной нелинейности сред

$$\gamma_j(x) = \begin{cases} -\gamma_j^{(-)}, & x < 0 \\ -\gamma_j^{(+)}, & x > 0 \end{cases}$$

где $\gamma_j^{(\pm)} > 0$, будем искать в виде:

$$\psi_j(x) = \begin{cases} \frac{A_j}{\text{sh}k_j(x - x_1)}, & x > 0 \\ \frac{B_j}{\text{sh}k_j(x - x_2)}, & x < 0 \end{cases} \quad (23)$$

Подстановка (23) в НУШ (3) и граничные условия (4) и (5) приводит к тому, что для параметров волновой функции (23) остаются справедливыми соотношения (8)–(10), а также для них будет выполняться соотношение:

$$\operatorname{sh} k_j x_2 / \operatorname{sh} k_j x_1 = \sqrt{\gamma_j^{(+)} / \gamma_j^{(-)}} \quad (24)$$

и дисперсионное соотношение вида (12), в котором теперь

$$\Delta_j = 2m_j \alpha_j - k_j (\operatorname{cth} k_j x_1 - \operatorname{cth} k_j x_2) \quad (25)$$

Для ограниченности решения (23) следует потребовать, чтобы $x_1 < 0$ и $x_2 > 0$.

а. Симметрично локализованные связанные состояния в среде с отрицательным ангармонизмом

Положим в (23)–(25) $x_2 = -x_1 = -x_0$. Тогда $B_j = A_j$ и состояния такого типа реализуются в случае одинакового ангармонизма по обе стороны от дефекта, то есть когда $\gamma_j^{(+)} = \gamma_j^{(-)}$. В этом случае из (12), в которое подставляются величины (25), получается дисперсионное соотношение

$$m_1 m_2 \beta^2 = (m_1 \alpha_1 - k_1 \operatorname{cth} k_1 x_0)(m_2 \alpha_2 - k_2 \operatorname{cth} k_2 x_0). \quad (26)$$

Из (26) при отсутствии взаимодействия ветвей закона дисперсии, когда $\beta = 0$, следует, что возбуждения становятся независимыми, причем дисперсионные соотношения независимых ветвей принимают вид:

$$m_j \alpha_j = k_j \operatorname{cth} k_j x_0.$$

Такие выражения совпадают с точностью до обозначений с соотношением между параметрами среды и локализованного состояния, полученным в [10].

В случае одинаковых параметров сред из (26) получается, дисперсионное соотношение

$$k \operatorname{cth} k x_0 = m(\alpha \pm \beta).$$

Отсюда в двух предельных случаях находятся уровни энергии связанных состояний рассматриваемого вида:

$$E = \begin{cases} \Omega + \frac{3}{2m x_0} \left\{ m(\alpha \pm \beta) - \frac{1}{x_0} \right\}, & k x_0 \ll 1 \\ \Omega + m(\alpha \pm \beta)^2 / 2, & k x_0 \gg 1. \end{cases} \quad (27)$$

б. Несимметрично локализованные связанные состояния в среде с отрицательным анггармонизмом

Теперь рассмотрим возможность существования связанного состояния, несимметрично локализованного вблизи дефекта, с различными $x_1 \neq x_2$. В случае одинаковых параметрах сред, но при выполнении $\gamma_1^{(-)} = \gamma_2^{(-)}$ и $\gamma_1^{(+)} = \gamma_2^{(+)}$. Тогда дисперсионное соотношение (12), в которое подставляются величины (25) с учетом сделанных в данном пункте предположений, принимает вид:

$$k(\text{cth}kx_1 - \text{cth}kx_2) = 2m(\alpha \pm \beta). \quad (28)$$

Из (28) в явном виде представляется возможным получить значению энергии связанных состояний для предельных случаев, когда $kx_j \ll 1$ и $kx_j \gg 1$:

$$E = \begin{cases} \Omega + 3\left\{\frac{\alpha \pm \beta}{x_1 - x_2} + \frac{1}{2mx_1x_2}\right\}, & kx_j \ll 1 \\ \Omega + 2m(\alpha \pm \beta)^2, & kx_j \gg 1. \end{cases} \quad (29)$$

Для существования связанных состояний такого вида вблизи края зоны должны выполняться такие же условия, как и для (22).

Выводы

В работе проведено обобщение модели взаимодействующих на дефекте локализованных возбуждений с двумя ветвями закона дисперсии (двумя уровнями состояний) в нелинейной среде с использованием нелинейного уравнения Шредингера. В рамках рассматриваемой модели показано, что возможно существование нелинейных локализованных состояний нескольких типов. Такие локализованные состояния представляются собой связанные солитонные решения НУШ несимметричных профилей. Рассмотрены случаи как положительного, так и отрицательного анггармонизма, в разделенных плоским дефектом фокусирующих и дефокусирующих средах с керровской нелинейностью.

В предельных случаях, характеризующихся степенью близости к краю нижней границы ветви сплошного спектра, уровни энергии получены в явном аналитическом виде. Следует отметить, что в отличие от полученных нелинейных локализованных состояний в [10], также описываемых НУШ, рассмотренные в данной работе состояния описывают затухание поля, как симметричное, так и несимметричное относительно границы раздела сред при удалении от нее.

Существование связанных солитонных состояний несимметрично относительно границы раздела сред профиля в нелинейных средах керровского типа с фокусировкой и дефокусировкой, которое показано в данной

работе, является важным аспектом, требующим учета при разработке квантовых систем, основанных на свойствах нелинейных поверхностных волн в слоистых структурах. Системы такого типа обладают широким набором важных физических приложений, которые находят применение, как в нелинейной динамике твердого тела, так и в нелинейной оптике [12] при разработке устройств с использованием нелинейных фотонных кристаллов и периодических волноводных структур [13].

Библиографический список

1. Ахмедиев Н.Н., Корнеев В.И., Кузьменко Ю.В. Возбуждение нелинейных поверхностных волн гауссовыми световыми пучками // ЖЭТФ. 1985. Т. 88. №1. С. 107-115. URL: <http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/e/index/e/61/1/p62?a=list>. (дата обращения 16.07.2018).
2. Савотченко С.Е. Локализация волн вблизи интерфейса нелинейных сред с пространственной дисперсией // Известия высших учебных заведений. Физика. 2004. Т. 47. №5. С. 79-84. DOI:10.1023/B:RUPJ.0000046330.92744.73
3. Савотченко С.Е. Особенности локализации нелинейных возбуждений вблизи дефекта с внутренней структурой // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. 2016. № 4. С. 51-59. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/physmath/2016/04/2016-04-05.pdf>. (дата обращения 16.07.2018).
4. Kivshar Yu.S., Kosevich A.M., Chubykalo O.A. Radiative effects in the theory of beam propagation at nonlinear interfaces // Phys. Rev. A. 1990. Vol. 41, issue 3. Pp. 1677-1688. DOI: 10.1103/PhysRevA.41.1677.
5. Герасимчук И.В., Ковалев А.С. Локализация нелинейных волн в слоистых средах // ФНТ. 2000. Т.26. №8. С. 799-809. DOI: 10.1063/1.1289129.
6. Abdullaev F.Kh., Baizakov B.B., Umarov B.A. Resonance phenomena in interaction of a spatial soliton with the modulated interface of two nonlinear media // Optics Communications. 1998. Vol. 156. Pp. 341-346. DOI: 10.1016/S0030-4018(98)00451-9.
7. Косевич А.М. Особенности двуканального резонансного рассеяния волны или частицы на плоском дефекте. ЖЭТФ. 1999. Т. 115. № 1. С. 306-317. URL: http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/r_115_0306.pdf. (дата обращения 16.07.2018).
8. Савотченко С.Е. Особенности рассеяния частиц и возбуждение квазилокальных состояний стационарным потоком в двухуровневой системе // Известия высших учебных заведений. Физика. 2001. Т. 44. №4. С. 67-73. DOI: 10.1023/A:1011952514072.
9. Савотченко С.Е. Взаимодействие локализованных состояний вблизи границы раздела нелинейных сред // Конденсированные среды и межфазные границы. 2017. Т. 19. № 2. С.291-295.

URL: <http://www.kcmf.vsu.ru/article.php?l=ru&aid=823>. (дата обращения 16.07.2018).

10. Богдан М.М., Герасимчук И.В., Ковалев А.С. Динамика и устойчивость локализованных мод в нелинейных средах с точечными // ФНТ. 1997. Т. 23. № 2. С. 197-207. DOI: 10.1063/1.593346.
11. Коровай О.В., Хаджи П.И. Нелинейные поверхностные волны в симметричной трехслойной структуре, обусловленные генерацией экситонов и биэкситонов в полупроводниках // ФТТ. 2003. Т. 45. № 2. С. 364-368. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/4534>. (дата обращения 16.07.2018).
12. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. От волоконных световодов до фотонных кристаллов / Москва: Физматлит, 2005. 648 с.
13. Нелинейности в периодических структурах и метаматериалах. / Сб. статей под ред. Ю.С. Кившаря, Н.Н. Розанова / Москва: Физматлит, 2014. 371 с.

References

1. Ahmediev N.N., Korneev V.I., Kuz'menko Yu.V. Excitation of nonlinear surface waves by Gaussian light beams. ZhETF. 1985; 88(1): 107-115. Available at: <http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/e/index/e/61/1/p62?a=list> (accessed 16.07.2018).
2. Savotchenko S.E. Localization of waves near the interface of nonlinear media with spatial dispersion. Russian Physics Journal. 2004; 47(5): 556-562. DOI: 10.1023/B:RUPJ.0000046330.92744.73.
3. Savotchenko S.E. Features of localization of nonlinear excitations near a defect with internal structure. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika. 2016; 4: 51-59. Available at: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/phys-math/2016/04/2016-04-05.pdf> (accessed 16.07.2018). (In Russ.)
4. Kivshar Yu.S., Kosevich A.M., Chubykalo O.A. Radiative effects in the theory of beam propagation at nonlinear interfaces. Phys. Rev. A. 1990; 41(3): 1677-1688. DOI: 10.1103/PhysRevA.41.1677.
5. Gerasimchuk I.V., Kovalev A.S. Localization of nonlinear waves in layered media. FNT. 2000; 26(8): 799-809. DOI: 10.1063/1.1289129.
6. Abdullaev F.Kh., Baizakov B.B., Umarov B.A. Resonance phenomena in interaction of a spatial soliton with the modulated interface of two nonlinear. Optics Communications. 1998; 156: 341-346. DOI: 10.1016/S0030-4018(98)00451-9
7. Kosevich A.M. Features of two-channel resonance scattering of a wave or particle on a plane defect. ZhETF. 1999; 115(1): 306-317. Available at: http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/dn/r_115_0306.pdf (accessed 16.07.2018).
8. Savotchenko S.E. Peculiarities of the particle scattering and excitation of quasilocal states by a stationary flow in a two-level system. Russian Physics Journal. 2001; 44(4): 412-419. DOI: 10.1023/A:1011952514072.
9. Savotchenko S.E. Interaction of localized states near the interface

- of nonlinear media. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granicy*. 2017; 19(2): 291-295. Available at: <http://www.kcmf.vsu.ru/article.php?l=ru&aid=823> (accessed 16.07.2018).
10. Bogdan M.M., Gerasimchuk I.V., Kovalev A.S. Dynamics and stability of localized modes in nonlinear media with point defects. *Low Temp. Phys.* 1997; 23(2): 197-207, 1997. DOI: 10.1063/1.593346.
 11. Korovaj O.V., Hadzhi P.I. Nonlinear surface waves in a symmetric three-layer structure caused by the generation of excitons and biexcitons in semiconductors *FTT*. 2003; 45(2): 364-368. Available at: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/4534> (accessed 16.07.2018).
 12. Kivshar' Yu.S., Agraval G.P. Optical solitons. From fiber-optic fibers to photonic crystals) Academic Press, San Diego, 2003, 540 p.
 13. Nonlinearities in periodic structures and metamaterials. *Sb. statej pod red. Yu.S. Kivsharya, N.N. Rozanova*, Moskva: Fizmatlit, 2014. 371 p. (In Russ.).

Поступила в редакцию: 18.05.2018,
принята к публикации: 26.08.2018

Об авторе

Савотченко Сергей Евгеньевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры высшей математики Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова, ScopusID 6603577988, ResearcherID N-9227-2018, тел.: 8-920-561-04-46, E-mail: savotchenkose@mail.ru.

About the author

Savotchenko Sergey Evgenyevich, Doctor of Physics and Mathematics, Professor of High Mathematics Department Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, ScopusID: 6603577988, ResearcherID: N-9227-2018. Phone: 8-920-561-04-46. E-mail: savotchenkose@mail.ru.

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

УДК:532:538.4

**Яновский А.А.,
Симоновский А.Я.**

Ставропольский государственный аграрный университет,
Северо-Кавказский Федеральный университет,
г. Ставрополь, Россия
simonovchikij@mail.ru

**ЧАСТОТА ОБРАЗОВАНИЯ ПУЗЫРЬКОВ
ПАРА В ДВУХСЛОЙНОЙ СРЕДЕ
МАГНИТНАЯ-НЕМАГНИТНАЯ ЖИДКОСТЬ**

Введение:

предложен и реализован метод измерения частоты образования пузырьков пара при кипении непрозрачных жидкостей с помощью двухслойной системы: непрозрачная – прозрачная среда. Разработана экспериментальная установка и осуществлены эксперименты по определению частоты образования пузырьков пара при кипении непрозрачных жидкостей.

**Материалы
и методы:**

предложен и реализован метод измерения частоты образования пузырьков пара при кипении непрозрачных жидкостей с помощью двухслойной системы: непрозрачная – прозрачная среда. Разработана экспериментальная установка и осуществлены эксперименты по определению частоты образования пузырьков пара при кипении непрозрачных жидкостей.

**Результаты
исследования:**

измерена частота образования пузырьков пара при кипении двухслойной среды магнитная-немагнитная жидкости на неограниченной горизонтальной поверхности с точечным подводом тепла в однородном внешнем магнитном поле. Обнаружено, что с увеличением напряженности однородного постоянного магнитного поля, частота образования пузырьков пара при кипении двухслойной среды магнитной-немагнитной жидкости на неограниченной горизонтальной пластине уменьшается, а температура теплоотдающей поверхности, при которой начинается процесс парообразования, увеличивается для образцов магнитных жидкостей с высоким содержанием магнитной фазы.

**Обсуждение
и заключения:**

Экспериментально найдены зависимости частоты образования пузырьков пара от температуры теплоотдающей поверхности при кипении магнитной жидкости в различных по напряженности и направлению однородных магнитных полях. Обнаружено, что с увеличением напряженности однородного постоянного магнитного поля, частота образования пузырьков пара при кипении двухслойной среды магнитной-немагнитной жидкости на неограниченной горизонтальной пластине уменьшается, а температура теплоотдающей поверхности, при которой начинается процесс парообразования, увеличивается для образцов магнитных жидкостей с высоким содержанием магнитной фазы.

Ключевые слова: магнитная жидкость, теплообмен, гидродинамика, магнитное поле, закалка стали.

Благодарности:

выражаем благодарность РФФИ за поддержку работы (грант № 17-01-00037).

Yanovsky A.A.,
Simonovsky A.Ya.

Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russia
North-Caucasian Federal University, Stavropol, Russia
simonovchki@mail.ru

FREQUENCY OF FORMATION OF VAPOR BUBBLES IN A TWO-LAYER MEDIUM MAGNETIC – NONMAGNETIC LIQUID

Introduction: a method for measuring the frequency of the formation of vapor bubbles in the boiling of opaque fluids using a two-layer system is proposed and implemented: an opaque - transparent medium. An experimental setup has been developed and experiments have been carried out to determine the frequency of the formation of vapor bubbles during the boiling of opaque liquids.

Materials and methods: A method for measuring the frequency of formation of vapor bubbles in the boiling of opaque liquids by means of a two-layer system is proposed and implemented: an opaque - transparent medium. An experimental setup has been developed and experiments have been carried out to determine the frequency of the formation of vapor bubbles during the boiling of opaque liquids.

The results of the study: The frequency of formation of vapor bubbles was measured in the boiling of a two-layer medium by a non-magnetic liquid on an unrestricted horizontal surface with pointwise heat input in a uniform external magnetic field. It is found that with the increase in the strength of a uniform constant magnetic field, the frequency of the formation of vapor bubbles upon boiling of a two-layer medium of a magnetic-non-magnetic liquid on an unbounded horizontal plate decreases, and the temperature of the heat-releasing surface at which the vaporization process begins increases for samples of magnetic liquids with a high magnetic phase content .

Discussion and conclusions: The dependence of the frequency of the formation of vapor bubbles on the temperature of the heat-releasing surface is found experimentally at the boiling of a magnetic fluid in various magnetic fields with different intensities and directions. It is found that with the increase in the strength of a uniform constant magnetic field, the frequency of the formation of vapor bubbles upon boiling of a two-layer medium of a magnetic-non-magnetic liquid on an unbounded horizontal plate decreases, and the temperature of the heat-releasing surface at which the vaporization process begins increases for samples of magnetic liquids with a high magnetic phase content .

Key words: magnetic fluid, heat transfer, hydrodynamics, magnetic field, hardening of steel.

Acknowledgments: We express our gratitude to the RFBR for the support of the work (Grant No. 17-01-00037).

Введение

Как и любая жидкость, магнитная жидкость при кипении проходит различные режимы кипения – пузырьковый, переходной, пленочный

Наиболее эффективными методами наблюдения образования пузырьков пара при пузырьковом кипении жидкостей являются фотографический и оптический методы [1]. Но магнитные жидкости непрозрачны,

что делает невозможным использование этих методов при изучении кипения магнитной жидкости. Ранее нами были предприняты попытки измерения частоты образования пузырьков пара при помощи системы индукционных катушек [3].

В настоящей работе для измерения частоты образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости использовалась двухслойная среда. Поверх непрозрачной магнитной жидкости наливался слой прозрачной воды. Это позволило визуализировать процессы формирования и всплытия пузырьков пара, прошедших границу раздела, магнитная - немагнитная жидкость, а также измерить частоту образования пузырьков пара путем покадрового анализа скоростной видеозаписи процесса кипения.

Материалы и методы

Для измерения частоты образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости на неограниченной поверхности при точечном подводе тепла и исследования влияния на этот процесс постоянного однородного магнитного поля была использована установка, схема которой приведена на рисунке 1.

Магнитная жидкость (1) заполняла цилиндрический контейнер (2), выполненный из кварцевого стекла и установленный на теплоотдающей стальной пластине (3), на которой происходило кипение магнитной жидкости. Поверх слоя магнитной жидкости заливался такой же по высоте слой воды (4). Так как плотность воды меньше плотности используемых нами образцов магнитной жидкости, то вся вода находилась над магнитной жидкостью. Слой магнитной жидкости и слой воды не смешивались. Тепло подводилось к центральной части теплоотдающей пластины точно, стержнем (5) диаметром 4 мм. Таким образом, в процессе кипения действовал только один центр парообразования, что позволило подсчитать частоту образования пузырьков пара на одиночном центре парообразования. Теплоотдающая пластина, как было отмечено ранее, была изготовлена из немагнитного материала (аустенитная сталь с магнитной проницаемостью $\mu < 1,05$). Для регистрации температуры теплоотдающей поверхности и определения теплового потока к жидкости вдоль стержня (5) на расстоянии 5 мм друг от друга устанавливались спай двух хромель-копелевых термпар (6). При помощи верхней термпары фиксировалась температура теплоотдающей поверхности (3). Регистрация показаний нижней и верхней термпары позволяли вычислить тепловой поток к жидкости. На теплоподводящем стержне (5) устанавливался электронагреватель (7) с бифилярно выполненной обмоткой для компенсации собственного магнитного поля обмотки нагревателя.

Контейнер с жидкостью помещался в однородное постоянное магнитное поле катушек Гельмгольца (8), так чтобы центр парообразования на теплоотдающей поверхности находился в геометрическом центре катушек, вбли-

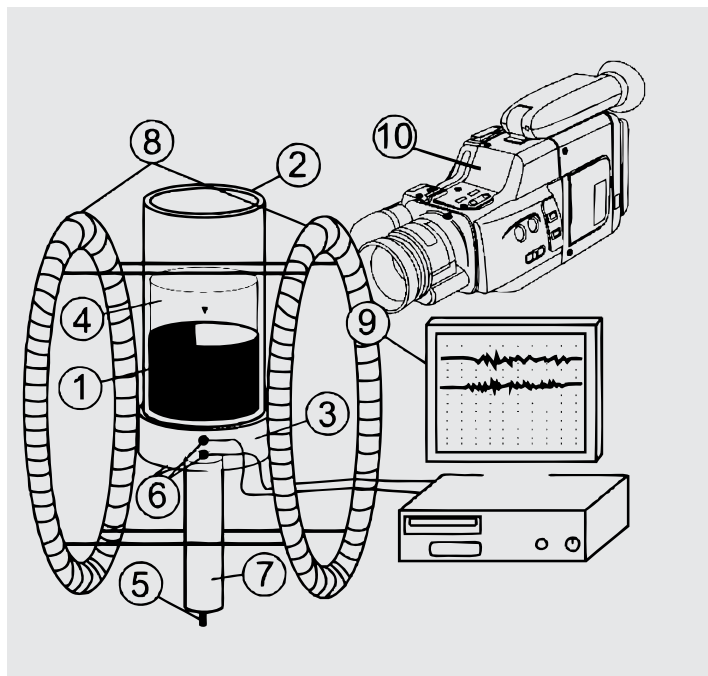


Рисунок 3.1.

Схема экспериментальной установки для измерения частоты образования пузырьков пара с использованием двухслойной среды – непрозрачная магнитная жидкость – прозрачная вода: 1 – образец магнитной жидкости; 2 – стеклянный цилиндрический контейнер; 3 – стальная пластина; 4 – вода; 5 – теплоподводящий стержень; 6 – хромель-копелевые термопары; 7 – нагреватель с внешней теплоизоляционной обмоткой; 8 – катушки Гельмгольца; 9 – компьютер оснащенный платой аналого-цифрового преобразователя; 10 – видеокамера скоростной съемки.

Figure 3.1. The scheme of the experimental setup for measuring the frequency of the formation of vapor bubbles using a two-layer medium – opaque magnetic fluid - transparent water: 1 – sample of a magnetic fluid; 2 – glass cylindrical container; 3 – steel plate; 4 – water; 5 – heat supply rod; 6 – chromel-copel thermocouples; 7 – heater with external heat-insulating winding; 8 – coils of Helmholtz; 9 – a computer equipped with an analog-to-digital converter board; 10 – high-speed video camera.

зи которого поле будет однородным. Меняя ориентацию оси симметрии катушек Гельмгольца, относительно теплоотдающей поверхности, вектор магнитного поля катушек можно было располагать параллельно (горизонтальное магнитное поле) или перпендикулярно (вертикальное магнитное поле) плоскости теплоотдающей поверхности. Сигналы термопар регистрировались компьютером (9) оснащенным платой аналого-цифрового преобразователя.

Таблица 1.

ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗЦОВ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ.

Table 1. Physical characteristics of samples of a magnetic fluid used in experiments.

Образец	Плотность, г	Объемная концентрация j	Намагниченность насыщения M_s , кА/м	Поверхностное натяжение σ , 10^{-3} Н/м	Вязкость η , 10^{-3} Па·с
МЖ №1	1315	12	47,1	18,1	24,3
МЖ №2	1155	8	32,3	20,7	13,8
МЖ №3	1060	5,5	20,6	24,4	2,2

При одновременной подаче напряжения на обмотку нагревателя (7) и катушки Гельмгольца, проводилась запись сигнала верхней и нижней термопар, регистрирующих температуры теплоотдающей поверхности. Процесс образования и всплытия пузырьков пара фиксировался на видеокамеру Casio EXILIM Pro EX-F1 (10) с частотой 600 кадров в секунду. Количество пузырьков пара, проходящих через границу магнитная-немагнитная жидкости в единицу времени определялось путем покадрового подсчета. В экспериментах величина магнитного поля изменялась в пределах от 0 до 4,2 кА/м.

В качестве объекта исследования в настоящей работе использовалась магнитная жидкость, представляющая собой взвесь высокодисперсных частиц магнетита в керосине, стабилизированных при помощи олеиновой кислоты. Характеристики образцов магнитной жидкости приведены в таблице 1.

На основе полученных при покадровом анализе высокоскоростной съемки данных и информации о температуре поверхности в данный момент времени были построены зависимости частоты образования пузырьков пара от температуры теплоотдающей поверхности в различном по величине вертикальном и горизонтальном магнитном поле.

Результаты и их обсуждение

Кинограммы всплытия пузырьков пара.

Скоростная видеосъемка процесса выхода пузырьков пара из магнитной жидкости в прозрачную среду –воду позволила не только измерить частоту образования пузырьков пара, но и проследить за характером движения и формой пузырей пара.

На рисунке 2 представлена кинограмма процесса образования и всплытия пузырька пара в верхнем прозрачном слое двухслойной среды. Образование пузырька произошло ранее на поверхности нагревателя в объеме магнитной жидкости. На кадрах, представленных на рисунке 2, виден цилиндрический контейнер в нижней части заполненный непрозрачной магнитной жидкостью. Выше магнитной жидкости находится слой воды, в котором на-

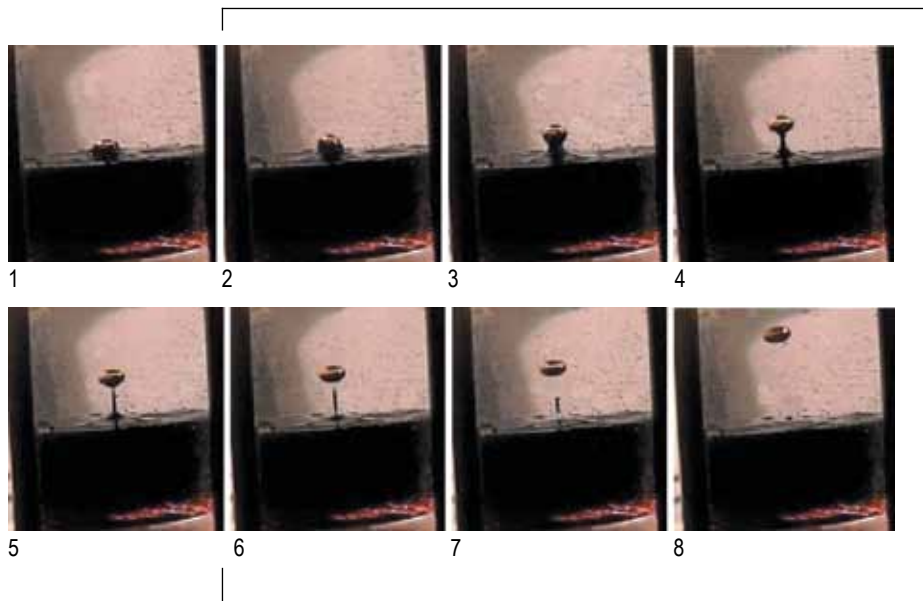


Рисунок 2.

Кинограмма всплытия пузырька пара в слое воды. Цифрами 1-8 обозначены кадры видеосъемки, полученные в различные моменты времени, начиная с прохождения пузырьком пара границы раздела магнитная жидкость-вода.

Figure 2. The telegram of the ascent of a bubble of vapor in a layer of water. Figures 1-8 denote video shooting frames obtained at different instants, beginning with the bubble passing through the vapor interface of the magnetic liquid-water interface.

блюдается пузырек пара, начиная с момента прохождения границы раздела двухслойной среды и до момента достижения пузырьком свободной поверхности воды.

В центре кадра №1 виден пузырек пара, только появившийся на границе раздела магнитная жидкость-вода. На кадре 2 заметно, что пузырек растет и приобретает сферическую форму. Процесс формирования пузырька пара и его отделение от поверхности объема магнитной жидкости можно проследить на кадрах 3–5. В нижней части пузырька, как видно, на кадрах 3–5 соединен перешейком с основной массой магнитной жидкости. По мере формирования пузырька и выхода его в жидкую прозрачную среду, находящуюся над магнитной жидкостью, перешеек утончается и разрывается.

При всплытии пузырька в прозрачной среде (кадры 6–8) пузырек приобретает форму сплющенного сфероид. Остаток от оборвавшегося перешейка в виде капли магнитной жидкости падает вниз в основную массу магнитной жидкости (кадр 7), а пузырек пара продолжает всплывать вверх.

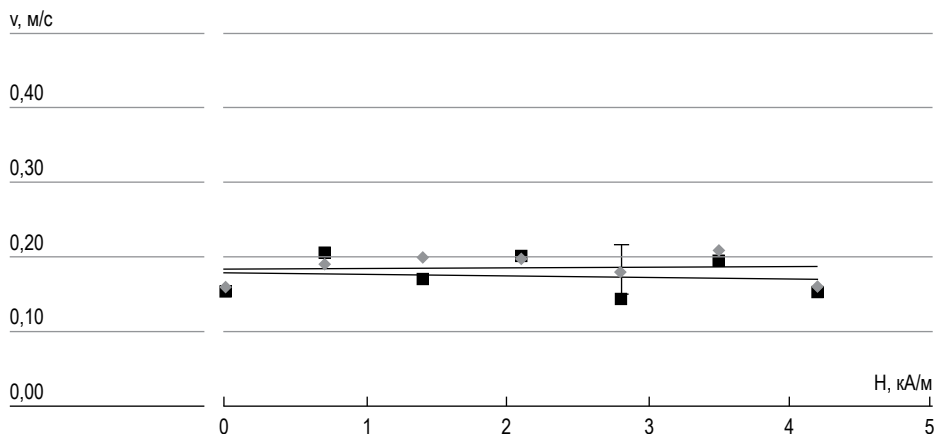


Рисунок 3.

Зависимость скорости всплытия пузырьков пара в прозрачной части двухслойной среды при кипении– магнитной жидкости, от величины напряженности внешнего однородного магнитного поля.

Figure 3. Dependence of the ascent velocity of bubbles of vapor in the transparent part of a two-layer medium during boiling-magnetic fluid, on the strength of the external uniform magnetic field.

Необходимо заметить, что при свободном всплытии пузырька пара (кадр 8) на его поверхности остается слой магнитной жидкости, который «уносится» пузырьком пара из основной массы магнитной жидкости. Наличие слоя магнитной жидкости на поверхности пузырька пара дает основание полагать, что магнитное поле должно оказывать влияние на форму пузырька пара и характер его всплытия. Представляет интерес тот факт, что уносимая пузырьками пара магнитная жидкость, первоначально растекается по свободной поверхности воды тонкой пленкой, а по мере увеличения массы выносимой на поверхность магнитной жидкости, объединяется в капли, которые затем падают вниз сквозь прозрачную среду в основной объем магнитной жидкости.

Были найдены зависимости скорости всплытия пузырьков пара от величины внешнего однородного магнитного поля (рис. 3).

Измерения показали, что в исследуемом диапазоне напряженности магнитного поля – от 0 до 4 кА/м, внешнее однородное магнитное поле не оказывает заметного влияния на скорость всплытия пузырьков пара. Однако, можно предположить, с учетом описанной выше особенности подъема пузырьков пара, когда часть магнитной жидкости захватывается поверхностью всплывающего пузырька, что при более высоких значениях напряженности поля, или при воздействии неоднородного внешнего магнитного поля, влияние на динамику подъема пузырьков окажется существенным.

Влияния магнитного поля на частоту парообразования в двухслойной среде магнитная – немагнитная жидкость

Горизонтальное однородное постоянное магнитное поле.

На рисунке 4 представлен график зависимости частоты образования пузырьков пара от температуры теплоотдающей поверхности при различных значениях действующего на процесс кипения магнитной жидкости однородного постоянного горизонтального магнитного поля. Зависимости, представленные на рисунке, получены для образца магнитной жидкости МЖ№1.

Пузырьки пара начинают появляться на границе раздела сред при температуре теплоотдающей поверхности $t = 112\text{--}120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Из графиков так же видно, что частота образования пузырьков пара с ростом от температуры теплоотдающей поверхности монотонно возрастает во всей области приложенных магнитных полей. Кривая 1 описывает изменения частоты образования пузырьков пара с ростом температуры теплоотдающей поверхности без включения магнитного поля. Кривая 2 – при включенном внешнем горизонтальном магнитном поле напряженностью 0,7 кА/м, 3 – при 1,4 кА/м, 4 – при 2,1 кА/м, 5 – при 2,8 кА/м, 6 – при 3,5 кА/м, 7 – при 4,2 кА/м.

Как показал статистический анализ экспериментальных данных, в области температур теплоотдающей поверхности $112\text{--}125\text{ }^{\circ}\text{C}$ различие в ходе кривых 1-7 не является статистически значимым, что говорит о слабом влиянии магнитного поля на частоту парообразования в данном температурном интервале. Однако, при температурах теплоотдающей поверхности выше $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ различие в ходе кривых 1-7 не является статистически значимым, что говорит о слабом влиянии магнитного поля на частоту парообразования в данном температурном интервале. Однако, при температурах теплоотдающей поверхности выше $130\text{ }^{\circ}\text{C}$, наблюдается 15%-е различие в ходе кривых 1-7. И это становится статистически достоверным. При температуре теплоотдающей поверхности $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ частота образования пузырьков пара на кривых 1-7 убывает более чем на 30 % с увеличением значения напряженности приложенного магнитного поля.

На рисунке 5 представлены зависимости частоты образования пузырьков пара от температуры теплоотдающей поверхности при действии внешне-го горизонтального магнитного поля для образца МЖ№2.

Как видно из графика, область температур теплоотдающей поверхности, при которой начинали фиксироваться пузырьки пара на границе раздела сред, меняется в диапазоне от 105 до $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зависимости от величины напряженности внешнего магнитного поля. Причем, с увеличением значения напряженности магнитного поля увеличивается значение температуры теплоотдающей поверхности, при которой начинали образовываться и всплывать пузырьки пара.

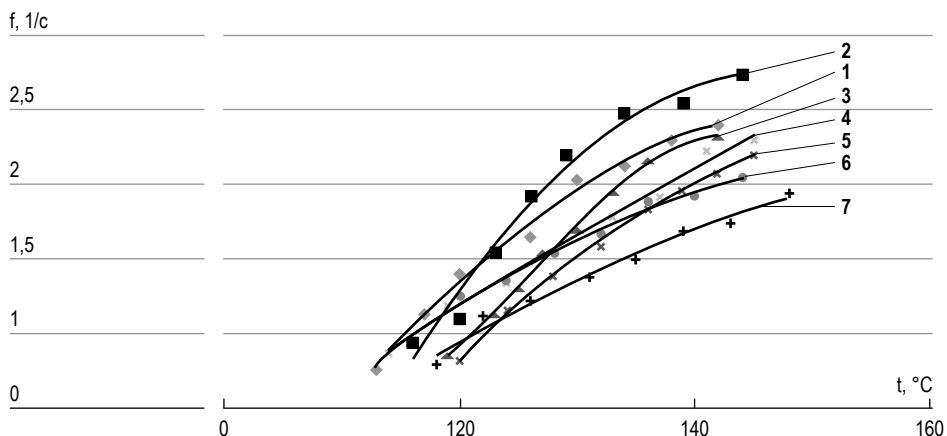


Рисунок 4.

Зависимость частоты парообразования f от температуры теплоотдающей поверхности t для образца МЖН№1. На графике цифрами обозначены кривые, полученные в различных по напряженности однородных постоянных горизонтальных магнитных полях: 1 – 0 кА/м; 2 – 0,7 кА/м; 3 – 1,4 кА/м; 4 – 2,1 кА/м; 5 – 2,8 кА/м; 6 – 3,5 кА/м; 7 – 4,2 кА/м.

Figure 4. Dependence of the evaporation frequency f on the temperature of the heat-dissipating surface t for the MF sample No. 1. In the figure, the numbers indicate the curves obtained in various uniform magnetic constant magnetic fields: 1-0 kA / m; 2 – 0,7 kA / m; 3 – 1.4 kA / m; 4 – 2.1 kA / m; 5 – 2.8 kA / m; 6 – 3.5 kA / m; 7 to 4.2 kA / m.

Зависимости 1 и 2 не монотонны и имеют максимум при температуре теплоотдающей поверхности 130 °С для всех зависимостей 3–7, представленных на рисунке 5 характерно монотонное возрастание частоты отрыва пара во всей области температур. Для зависимостей, полученных в магнитных полях с ростом напряженности магнитного поля, при одном и том же значении температуры теплоотдающей поверхности, частота парообразования оказывается ниже. Так при температуре теплоотдающей поверхности 135 °С, частота парообразования для зависимости 1 оказывается больше на 70% чем для зависимости 7. Таким образом, увеличение напряженности однородного постоянного магнитного поля, действующего на процесс кипения магнитной жидкости, приводит к уменьшению частоты образования пузырьков пара.

Аналогичные зависимости, полученные для образца магнитной жидкости №3, показаны на рисунке 6. Процесс образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости №3 начинается при разных значениях напряженности магнитного поля в достаточно узком диапазоне температур теплоотдающей поверхности, от 102 до 108 °С.

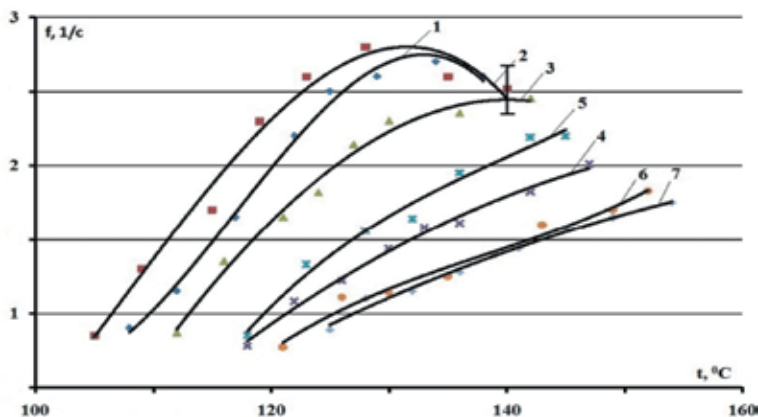


Рисунок 5.

Зависимость частоты парообразования f от температуры теплоотдающей поверхности t для образца магнитной жидкости №2. На графике цифрами обозначены кривые, полученные в различных по напряженности однородных постоянных *горизонтальных магнитных полях*: 1 – 0 кА/м; 2 – 0,7 кА/м; 3 – 1,4 кА/м; 4 – 2,1 кА/м; 5 – 2,8 кА/м; 6 – 3,5 кА/м; 7 – 4,2 кА/м.

Figure 5. Dependence of the evaporation frequency f on the temperature of the heat-dissipating surface t for a sample of magnetic fluid No. 2. In the figure, the numbers indicate the curves obtained in various uniform magnetic constant magnetic fields: 1 – 0 kA / m; 2 – 0,7 kA / m; 3 – 1.4 kA / m; 4 – 2.1 kA / m; 5 – 2.8 kA / m; 6 – 3.5 kA / m; 7 to 4.2 kA / m.

Кривые 1–6 монотонно возрастают во всем диапазоне температур теплоотдающей поверхности. В интервале температур от 102 до 120 °С различия в ходе кривых не превышают величину ошибки измерения, тогда как в интервале температур 120–140 °С теплоотдающей поверхности, разница в значениях частоты парообразования для кривых 1 и 7 в 3 раза превышает величину ошибки измерения. При температуре теплоотдающей поверхности 135 °С, частота парообразования для зависимости 1 оказывается больше на 30% чем для зависимости 7. Это говорит о том, что однородное постоянное магнитное поле оказывает влияние на частоту парообразования в температурном интервале 120–140 °С при кипении образца магнитной жидкости №3.

Вертикальное однородное постоянное магнитное поле

На рисунке 7 представлены зависимости, полученные при кипении образца магнитной жидкости №1 в вертикальном магнитном поле. Начало регистрации пузырьков пара при кипении происходит, как видно из графика, в интервале температур теплоотдающей поверхности 110–123 °С.

Из рисунка 7 видно, что зависимости 1–7 монотонно возрастают с увеличением температуры теплоотдающей поверхности. Однако, для частоты

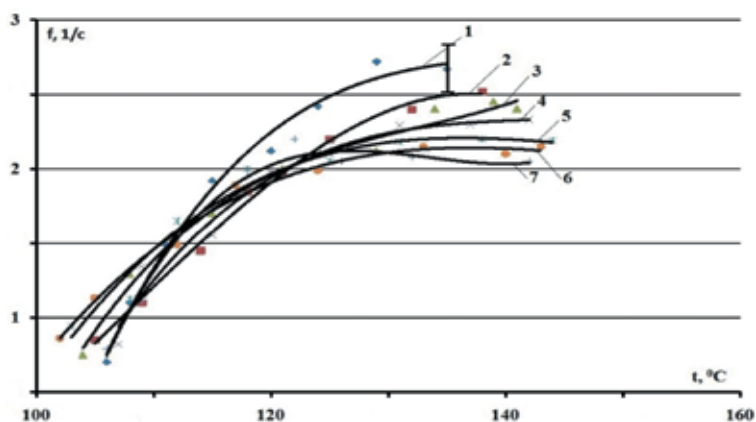


Рисунок 6.

Зависимость частоты парообразования f от температуры теплоотдающей поверхности t для образца МЖ№3. На графике цифрами обозначены кривые, полученные в различных по напряженности однородных постоянных горизонтальных магнитных полях: 1 – 0 кА/м; 2 – 0,7 кА/м; 3 – 1,4 кА/м; 4 – 2,1 кА/м; 5 – 2,8 кА/м; 6 – 3,5 кА/м; 7 – 4,2 кА/м.

Figure 6. Dependence of the evaporation frequency f on the temperature of the heat-dissipating surface t for the sample MF No. 3. In the figure, the numbers indicate the curves obtained in various uniform magnetic constant magnetic fields: 1 – 0 kA / m; 2 – 0,7 kA / m; 3 – 1.4 kA / m; 4 – 2.1 kA / m; 5 – 2.8 kA / m; 6 – 3.5 kA / m; 7 to 4.2 kA / m.

отрыва пузырьков пара ход кривых в интервале 1,2–1,3 с⁻¹ испытывает перегиб. Точки перегиба кривых имеют место в интервале температур поверхности нагревателя от 115 до 140 °С. При этом, кривые, полученные в более сильных магнитных полях, смещены по оси абсцисс в сторону более высоких температур поверхности нагревателя. На графике, изображенном на рисунке 8, показана зависимость частоты образования пузырьков пара от температуры теплоотдающей поверхности в экспериментах с образцом магнитной жидкости №2 в горизонтальных магнитном поле.

Начало кипения в экспериментах с магнитной жидкости №2 при различной напряженности вертикального магнитного поля было зафиксировано в интервале температур теплоотдающей поверхности 105–125 °С, в котором кривые 1–7 монотонно возрастают.

Для кривой 1 полученной в эксперименте без воздействия магнитного поля, процесс кипения начинается при температуре теплоотдающей поверхности 105 °С. В экспериментах с включением внешнего магнитного поля начало процесса регистрации пузырьков происходило при более высоких температурах. Так для кривой 7, полученной при воздействии на процесс кипения магнитного поля напряженностью 4,2 кА/м, начало кипения зарегистрировано

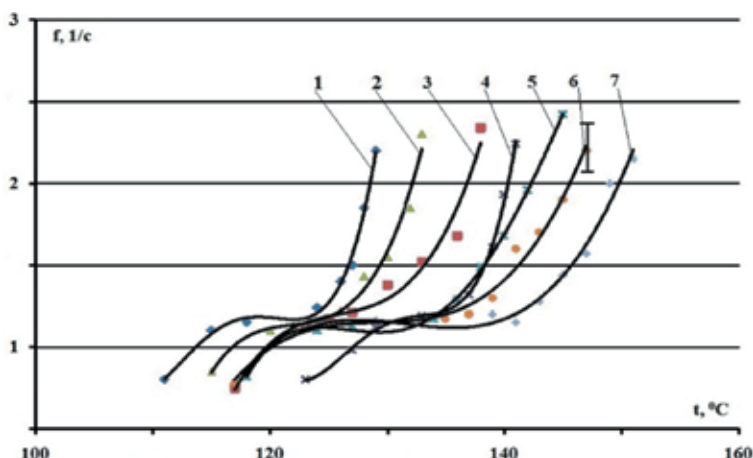


Рисунок 7. Зависимость частоты парообразования f от температуры теплоотдающей поверхности t для образца МЖН№1. На графике цифрами обозначены кривые, полученные в различных по напряженности однородных постоянных *вертикальных магнитных полях*: 1 – 0 кА/м; 2 – 0,7 кА/м; 3 – 1,4 кА/м; 4 – 2,1 кА/м; 5 – 2,8 кА/м; 6 – 3,5 кА/м; 7 – 4,2 кА/м.

Figure 7. Dependence of the evaporation frequency f on the temperature of the heat-dissipating surface t for MF No. 1 sample. On the graph, the numbers indicate the curves obtained in various uniform magnetic constant magnetic fields: 1 – 0 kA / m; 2 – 0,7 kA / m; 3 – 1.4 kA / m; 4 – 2.1 kA / m; 5 – 2.8 kA / m; 6 – 3.5 kA / m; 7 to 4.2 kA / m.

трировано при температуре теплоотдающей поверхности 125 °С. При фиксированном значении температуры теплоотдающей поверхности, частота образования пузырьков пара оказывается меньше полученной без воздействия внешнего магнитного поля. Например, при температуре 130 °С частота образования пузырьков пара оказывается в 3 раза больше для зависимости 1, чем для зависимости 7.

Результаты экспериментального исследования, проведенного для образца магнитной жидкости №3 в горизонтальном магнитном поле, отражены на графиках рисунка 9.

Диапазон температур теплоотдающей поверхности, при которой зафиксировано закипание жидкости сужается, как и в экспериментах в горизонтальном магнитном поле: 102–105 °С. Все кривые монотонно возрастают. Различия в ходе кривых при температуре теплоотдающей поверхности 102–125 °С не превышают величину ошибки измерения.

Статистически значимые различия между величиной частоты парообразования на кривых 1–7 фиксируются при температуре 125–140 °С. Так частота парообразования при температуре теплоотдающей поверхности 130 °С на 30–35% выше для кривых 1–2, по сравнению с кривыми 6–7.

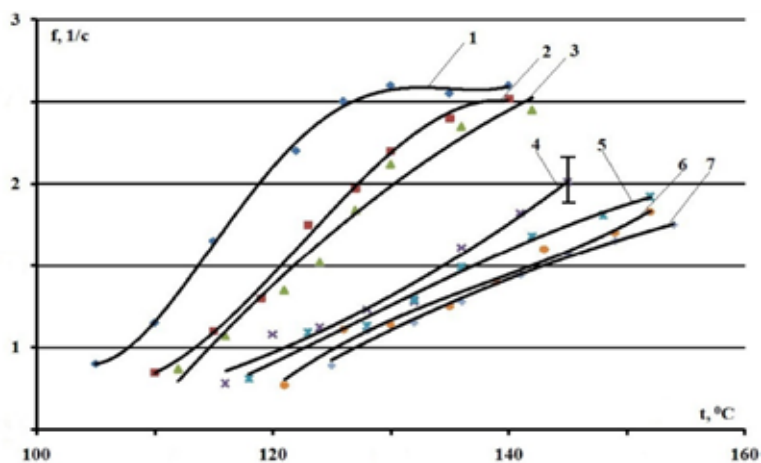


Рисунок 8.

Зависимость частоты парообразования f от температуры теплоотдающей поверхности t для образца магнитной жидкости №2. На графике цифрами обозначены кривые, полученные в различных по напряженности однородных постоянных *вертикальных магнитных полей*: 1 – 0 кА/м; 2 – 0,7 кА/м; 3 – 1,4 кА/м; 4 – 2,1 кА/м; 5 – 2,8 кА/м; 6 – 3,5 кА/м; 7 – 4,2 кА/м.

Figure 8. Dependence of the evaporation frequency f on the temperature of the heat-dissipating surface t for a sample of magnetic fluid No. 2. On the graph, the numbers indicate the curves obtained in various uniform magnetic constant magnetic fields: 1 - 0 kA / m; 2 - 0,7 kA / m; 3 - 1.4 kA / m; 4 - 2.1 kA / m; 5 - 2.8 kA / m; 6 - 3.5 kA / m; 7 to 4.2 kA / m.

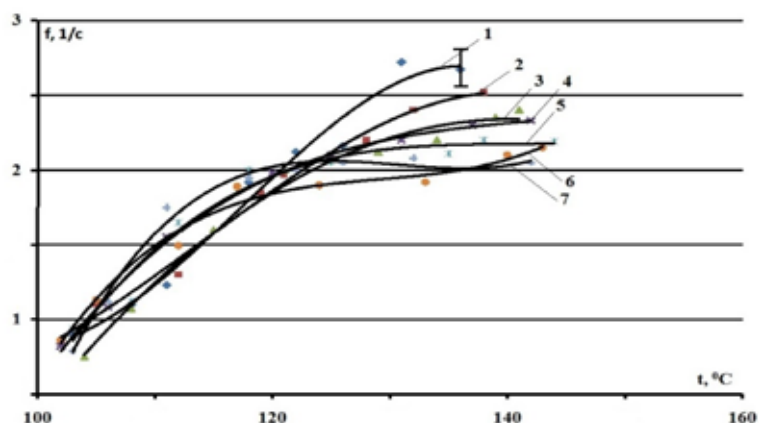


Рисунок 9.

Зависимость частоты парообразования f от температуры теплоотдающей поверхности t для образца МЖ№3. На графике цифрами обозначены кривые, полученные в различных по напряженности однородных постоянных *вертикальных магнитных полей*: 1 – 0 кА/м; 2 – 0,7 кА/м; 3 – 1,4 кА/м; 4 – 2,1 кА/м; 5 – 2,8 кА/м; 6 – 3,5 кА/м; 7 – 4,2 кА/м.

Figure 9. Dependence of the evaporation frequency f on the temperature of the heat-dissipating surface t for a sample MF No. 3. On the graph, the numbers indicate the curves obtained in various uniform magnetic constant magnetic fields: 1 - 0 kA / m; 2 - 0,7 kA / m; 3 - 1.4 kA / m; 4 - 2.1 kA / m; 5 - 2.8 kA / m; 6 - 3.5 kA / m; 7 to 4.2 kA / m.

В результате проведенных экспериментов по изучению влияния однородного постоянного магнитного поля на частоту парообразования при кипении магнитной жидкости проявляются следующие общие закономерности. Во-первых, увеличение напряженности магнитного поля, как вертикального, так и горизонтально, приводит к уменьшению частоты образования пузырьков пара при фиксированном значении температуры теплоотдающей поверхности. Во-вторых, для образцов магнитной жидкости №1 и магнитной жидкости №2, увеличение напряженности внешнего магнитного поля, приводит к увеличению температуры теплоотдающей поверхности, при которой начался процесс кипения.

Теоретический анализ влияния однородного магнитного поля на частоту образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости на одиночном центре парообразования

Форма пузырька пара в жидкости в реальных условиях кипения может существенно отличаться от сферической. Поэтому отрывным диаметром пузырька будет называть среднестатистический диаметр эквивалентной сферы в смысле равенства объемов реального пузырька при отрыве от поверхности и его сферической модели. Следует отметить, что даже при кипении обычных жидкостей вопрос об отрывном диаметре пузырька не является удовлетворительно решенным. Это связано с многообразием возможных динамических структур в процессе кипения, которые по сей день не получили достаточно объяснения.

При кипении магнитной жидкости это многообразие динамических структур дополняется процессами взаимодействия движущейся неоднородно нагретой намагничивающейся жидкости и магнитным полем искажённым неоднородностями среды.

Поэтому, анализ отрывного размера пузырька и связанной с ним частоты его отрыва от плоской горизонтальной поверхности, следуя многим классическим работам по теплофизике, проведем при значительных допущениях. Оправданием в этом нам будет служить практически полное отсутствие в литературе модели пузырькового кипения магнитной жидкости в магнитном поле.

При кипении обычных жидкостей считается, что условием равновесия пузырька пара при квазистатическом его росте является равенство подъёмной (Архимедовой) силы, стремящейся оторвать пузырек от поверхности нагревателя и сил поверхностного натяжения, удерживающих его на поверхности. Инерционными и другими силами во многих случаях пренебрегают [1]

В неоднородном магнитном поле на единицу объема жидкого магнетика действует сила магнитного поля $\sim \mu_0 (M \nabla) H$ [4]. В однородном магнитном поле на однородно намагничивающийся магнетик силы со стороны магнит-

ного поля не действуют. В однородном магнитном поле в объеме магнитной жидкости и на межфазных границах магнитная-немагнитная среда действуют лишь напряжения, приводящие к деформациям поверхности [4]. Таким образом, в однородно нагретой магнитной жидкости в однородном магнитном поле не действуют силы поля, стремящиеся либо оторвать пузырек от поверхности нагревателя либо удержать его на поверхности. Но, как известно [1] при кипении пристенный объем кипящей жидкости не является однородно нагретым. Для закипания жидкости необходимо создать определенный перегрев, относительно температуры кипения. Таким образом в пристенном слое образуется так называемый тепловой пограничный слой существенно неоднородно нагретой жидкости. Это обстоятельство и дает основу для создания модели влияния однородного внешнего магнитного поля на процессы, происходящие при кипении магнитной жидкости на одиночном центре парообразования.

Будем считать, что намагниченность магнитной жидкости подчиняется закону Ланжевена:

$$M = M_s \left(\operatorname{cth} \xi - \frac{1}{\xi} \right) \quad (1)$$

Здесь M_s – намагниченность насыщения магнитной жидкости;
 M – текущее значение намагниченности жидкости;
 $\xi = \mu_0 m H / kT$ – аргумент функции Ланжевена. В выражении аргумента функции Ланжевена:
 μ_0 – магнитная постоянная;
 m – магнитный момент одной магнитной частицы дисперсной фазы;
 k – постоянная Больцмана;
 T – температура.

В соответствии с законом Ланжевена магнитные свойства магнитной жидкости уменьшаются с температурой.

В таком случае в пристенном слое неоднородно нагретой кипящей жидкости будет возникать градиент намагниченности: ∇M . Намагниченность жидкости будет принимать наименьшие значения в слое, контактирующем с теплоподводящей поверхностью, и увеличиваться при удалении от этой поверхности. Поэтому пренебрегая процессом перемешивания пристенного слоя за счет явлений конвекции, можно допустить, что в этом слое на магнитную жидкость будет действовать магнитная сила [4]:

$$Fm_1 = \mu_0 (H \nabla) M, \quad (2)$$

здесь H – среднее магнитное поле в объеме неоднородно нагретой жидкости.

Известно, что магнитное поле в объеме магнитной жидкости в цилиндрическом контейнере меньше внешнего магнитного поля H_0 на величину размагничивающего поля:

$$H^* = H_0 - NM,$$

здесь H^* – поле в объеме жидкости;
 N – размагничивающий фактор, который для цилиндра в направлении перпендикулярном его оси составляет 0.5.

В силу температурной зависимости намагниченности поле H^* в объеме цилиндрической кюветы в неоднородно нагретом слое будет больше там, где намагниченность меньше. Таким образом, в пристенном неоднородно нагретом слое жидкости помимо градиента намагниченности будет возникать и градиент магнитного поля. А это означает, что на магнитную жидкость в этом случае будет действовать и сила магнитного поля вида:

$$F_{m2} = \mu_0 (M \nabla) H, \quad (4)$$

При этом направления сил (2) и (4) прямо противоположны.

Сила F_{m1} направлена в сторону противоположную силе Архимеда, а сила F_{m2} по направлению будет совпадать с Архимедовой.

Для дальнейшего анализа воспользуемся формулой Фритца [1], определяющей отрывной диаметр D_2 пузырька пара при кипении обычных жидкостей:

$$D_0 = f(\theta) \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_{mf} - \rho_v)g}} \quad (5)$$

здесь $f(\theta)$ – функция краевого угла θ ,
 σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости;
 g – ускорение силы тяжести;
 ρ_{mf} – плотность магнитной жидкости;
 ρ_v – плотность пара в пузырьке.

В выражении (5) соотношение:

$$\bar{F}_a = \bar{g}(\rho_{mf} - \rho_v) \quad (6)$$

представляет собой Архимедову выталкивающую силу, действующую на пузырек пара.

Тогда с учётом сил F_{m1} и F_{m2} , формулу Фритца можно записать в виде:

$$D_{0m} = f(\theta) \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_{mf} - \rho_v)g + \mu_0 M |\nabla H| - \mu_0 H |\nabla M|}}, \quad (7)$$

Здесь $(\rho_{mf} - \rho_v)g + \mu_0 M |\nabla H| - \mu_0 H |\nabla M| > 0$ – суммарная сила, действующая на пузырек пара квазистатически растущего в неоднородно нагретом пристенном слое жидкости

В формуле (7) под намагниченностью M в слагаемом $\mu_0 M |\nabla H|$ будем понимать среднее по толщине неоднородно нагретого слоя значение намагниченности магнитной жидкости. В слагаемом $\mu_0 H |\nabla M|$ под значением вектора напряженности магнитного поля H будем понимать среднее по толщине неоднородно нагретого слоя значение напряженности магнитного поля. Основываясь на модифицированной формуле Фритца (7) для определения отрывного диаметра пузырька пара можно составить представление о механизме влияния однородного внешнего магнитного поля на частоту отрыва пузырьков пара при кипении магнитной жидкости на одиночном центре парообразования. В теории кипения обычных жидкостей [1] в широком температурном интервале пузырькового кипения принято считать, что произведение частоты отрыва f пузырьков пара на отрывной диаметр пузырька есть величина постоянная:

$$f \cdot D_0 = \text{const} \quad (8)$$

Если допустить, что это соотношение (8) выполняется и для магнитных жидкостей, то влияние внешнего однородного магнитного поля на частоту отрыва пузырьков пара при кипении магнитной жидкости можно объяснить следующим образом.

Введем обозначения:

T_w –	температура стенки нагревателя;
T_l –	температура жидкости в объеме;
M_w –	намагниченность жидкости на уровне нагревателя;
M_l –	намагниченность ядра жидкости;
H_w –	напряженность магнитного поля на уровне стенки нагревателя;
H_l –	напряженность магнитного поля в объеме ядра жидкости.

Частоту отрыва пузырьков пара f_0 без магнитного поля будем находить по формуле (5) и (8):

$$f_m = \frac{\text{const}}{f(\theta) \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_{mf} - \rho_v)g}}}, \quad (9)$$

Тогда частоту отрыва паровых пузырьков в магнитном поле f_m можно и найти из выражений (7) и (8):

$$f_m = \frac{const}{f(\theta) \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_{mf} - \rho_v)g + \mu_0 M |\nabla H| - \mu_0 H |\nabla M|}}} \quad (10)$$

Величину градиента намагниченности в формуле (2.29) определим по выражению:

$$\nabla H = \left| \frac{H_w - H_l}{\Delta x} \right|, \quad (11)$$

где Δx – толщина неоднородно прогретого слоя магнитной жидкости. Величину градиента намагниченности в формуле (10) будем находить из выражения:

$$\nabla M = \left| \frac{M_w - M_l}{\Delta x} \right|, \quad (12)$$

График зависимости f_m/f_0 от величины внешнего приложенного магнитного поля H_0 при различных значениях толщины неоднородно прогретого слоя Δx , рассчитанный по приведенным формулам представлен на рисунке 10. Из рисунка видно, что во внешнем однородном магнитном поле H_0 , частота отрыва пузырьков пара убывает в интервале толщин неоднородно прогретого пристенного слоя жидкости от 2 до 18 мм.

Выводы

Предложен и реализован метод измерения частоты образования пузырьков пара при кипении непрозрачных жидкостей с помощью двухслойной системы: непрозрачная – прозрачная среда.

Разработана экспериментальная установка и осуществлены эксперименты по определению частоты образования пузырьков пара при кипении непрозрачных жидкостей.

Измерена частота образования пузырьков пара при кипении двухслойной среды магнитная-немагнитная жидкости на неограниченной горизонтальной поверхности с точечным подводом тепла в однородном внешнем магнитном поле.

Экспериментально найдены зависимости частоты образования пузырьков пара от температуры теплоотдающей поверхности при кипении магнитной жидкости в различных по напряженности и направлению однородных магнитных полях.

Обнаружено, что с увеличением напряженности однородного постоянного магнитного поля, частота образования пузырьков пара при кипении двухслойной среды магнитной-немагнитной жидкости на неограниченной го-

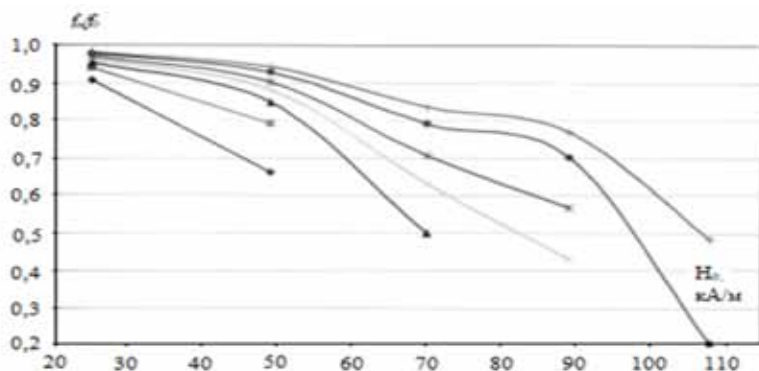


Рис. 10.

График зависимости f_m/f_0 от напряженности внешнего приложенного магнитного поля H_0 при различной толщине неоднородно того слоя Δx . Точкам на графиках соответствуют толщины неоднородно прогретого слоя: $\blacklozenge$ – 0,002 м; $\blacksquare$ – 0,003 м; $\blacktriangle$ – 0,004 м; $\times$ – 0,005 м; $\times$ – 0,006 м; $\bullet$ – 0,008 м; $+$ – 0,010 м.

Fig. 10. Graph of the dependence f_m / f_0 on the strength of the external applied magnetic field H_0 for different thicknesses of the inhomogeneous layer. The thicknesses of the inhomogeneously heated layer correspond to the points on the graphs: $\blacklozenge$ 0.002 m; $\blacksquare$ – 0.003 m; $\blacktriangle$ – 0.004 m; $\times$ – 0.005 m; $\times$ – 0.006 m; $\bullet$ – 0.008 m; $+$ – 0.010 m.

ризонгальной пластине уменьшается, а температура теплоотдающей поверхности, при которой начинается процесс парообразования, увеличивается для образцов магнитных жидкостей с высоким содержанием магнитной фазы.

Библиографический список

1. Несис Е.И. Кипение жидкостей / Е.И. Несис. М.: Наука, 1973. 280 с.
2. Гогосов В.В., Симоновский А.Я. Экспериментальная установка, методика и результаты измерения частоты образования пузырьков пара при кипении магнитных жидкостей // Магнитная гидродинамика. 1993. №2. С. 62-68.
3. Кобозев М.А., Симоновский А.Я. Метод измерения, экспериментальная установка и результаты измерения частоты образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости на одиночном центре парообразования // ЖТФ. 2007. Т. 77, вып. 11. С. 31–38.
4. Розенцвейнг Р. Феррогидродинамика. М.: Мир, 1989. 356 с.

References

1. Nesis E. I. Boiling liquids (boiling of liquids is discussed) / E.I. Nesis. M.: Science, 1973. 280 p.
2. Gogosov V.V., Simonovskii A.Ya., An Experimental setup, methodology and results of measurement of the frequency of vapor bubble during boiling of magnetic fluids // magnetohydrodynamics. 1993. №2. P. 62–68.
3. Kobozev M.A., Simonovskii A.Ya., Method of measurement, experimental setup and measurement results the frequency of vapor bubble during boiling of the magnetic fluid at a single centre of vaporization // ZhTF. 2007. volume 77, vol. 11. P. 31–38.
4. Rosenzweig R. Ferrohydrodynamics (the hydrodynamics of magnetic fluid is discussed). M.: World, 1989. 356s.

Рукопись поступила в редакцию: 29.05.2018,

принята к публикации: 26.08.2018

Об авторах:

Яновский Александр Александрович, доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет» (355017, Россия, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический 12), кандидат физико-математических наук, aa.yanovskiy@yandex.ru.

Симоновский Александр Яковлевич, 1. профессор кафедры общей и теоретической физики ИМЭН СКФУ (355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1), доктор физико-математических наук, профессор; 2. профессор кафедры математики ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет» (355017, Россия, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9346-8950>, Scopus ID: 7801335487, simonovchki@mail.ru

About the authors:

Yanovsky Alexander Aleksandrovich, Associate Professor of the Physics Department, FGBOU VO "Stavropol State Agrarian University" (355017, Russia, Stavropol, Zootechnical 12), Candidate of Physical and Mathematical Sciences, aa.yanovskiy@yandex.ru

Simonovsky Alexander Yakovlevich, 1. Professor of the Department of General and Theoretical Physics, IMEN SKFU (355009, Stavropol, Pushkin Street, 1), Doctor of Physics and Mathematics, Professor; 2. Professor of the Department of Mathematics of the St. Petersburg State Agrarian University "Stavropol State Agrarian University" (355017, Russia, Stavropol, Zootechnical 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9346-8950>, Scopus ID: 7801335487, simonovchki@mail.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 622.2

СОКРАЩЕНИЕ СРОКОВ ОСВОЕНИЯ СКВАЖИНЫ ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

Верисокин А.Е.

«Северо-Кавказский федеральный университет,
Институт нефти и газа»,
г. Ставрополь, Россия, verisokin.aleksandr@mail.ru

Введение:

В данной статье рассмотрены проблемы, связанные с выносом проппанта, механических частиц породы, неразложившейся жидкости из трещины гидроразрыва пласта в скважину. Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования технологии освоения скважин после проведения гидравлического разрыва пласта. Цель статьи заключалась в разработке комплекса устройств, используемых для промывки перфоканалов и стенок скважины в интервале перфорации после осуществления гидроразрыва пласта. Материалы и методы исследований: при написании статьи использованы методы сопоставления и анализа отечественной и зарубежной нефтегазовой литературы, материалы патентных разработок, имеющих опыт применения технологии гидравлического разрыва пласта на нефтегазовых объектах. Результаты исследований и их обсуждение: Выявлена и обоснована необходимость разработки устройства для промывки интервала перфорации. Показано, что затвердевшие и вязкоупругие частички геля попадают в перфорационные отверстия и налипают на стенки каналов и скважины. В дальнейшем эти зоны отложений геля снижают проницаемость в перфоканалах. На основе проведенного исследования автором разработана конструкция устройства для декольматации, позволяющая сократить сроки освоения скважин с такими осложнениями после гидравлического разрыва пласта. Чтобы повысить производительность рассматриваемых скважин, необходимо промыть их представленным устройством в режиме максимального приближения к отложениям. Для лучшего выноса частиц на поверхность предлагается использовать пенные системы, генерируемые струйным насосом, который описан в данной статье.

Выводы:

разработан комплекс устройств, используемых для промывки перфоканалов и стенок скважины в интервале перфорации, который позволит в несколько раз сократить сроки освоения скважин после осуществления гидроразрыва пласта. Описываемые устройства защищены патентами Российской Федерации: Патент на изобретение № 2651869, «Устройство для декольматации скважин», заявка № 2017109500; Патент на изобретение №2643882, «Струйный насос», заявка № 2017114222.

Ключевые слова:

гидроразрыв пласта, скважина, перфоканал, проппант, устройство для декольматации, полимер, пена, струйный насос.

Verisokin A.E.

North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

REDUCTION OF WELL STIMULATION PERIOD AFTER HYDRAULIC FRACTURING

- Introduction:** The problems arising from backflow of proppant, rock particles and non-decomposed liquid from hydraulic fractures are considered in the paper. The urgency of the research is caused by the necessity of improvement of well stimulation technology after hydrofracturing. The objective of the paper consists in the development of a set of devices for flushing perforation channels and wellbore walls in the perforation interval after hydrofracturing of a formation.
- Investigation tools and methods:** When writing the paper, the methods of comparison and analysis of national and foreign references in petroleum engineering, patents related to application of formation hydrofracturing were used.
- Results and discussion:** The urgency of developing a device for flushing out of perforated intervals is revealed and substantiated. It is shown that solidified viscoelastic particles of gel enter perforation tunnels and stick to their walls and to the wall of a well. Later these zones of gel particles deposits decrease permeability in perforation tunnels. On the basis of the investigations, the author developed a device for well bottomhole cleanout that reduces stimulation period for the wells with the above described problems arising after hydrofracturing. To increase productivity of such wells it is necessary to flush out them applying the developed device in the mode of the closest approach to the deposition zones. For better particles lifting to the surface, it is proposed to use foam systems produced by a jet pump which is described in the paper.
- Conclusion.** The set of devices for flushing perforation channels and wellbore walls in the perforation interval which allow for multiple decrease of well stimulation period after hydrofracturing is developed. The described devices are protected by the patents of the Russian Federation: patent for invention No 2651869 "A device for cleanout", application for patent No 2017109500; patent for invention No 2643882 "Jet pump", application for patent No 2017114222.
- Key words:** hydraulic fracturing, well, perforation tunnel, proppant, device for cleanout, polymer, foam, jet pump.

Введение

На сегодняшний день в мире все большее внимание уделяется разработке трудноизвлекаемых запасов. К таким запасам можно отнести нефть достаточно плотных пород, которая залегает в слабопроницаемых коллекторах. При этом акцент делается на внедрение новых технологий интенсификации добычи, которые успешно себя зарекомендовали на нефтяных месторождениях с высокопроницаемыми коллекторами. Одним из таких эффективных методов является гидравлический разрыв пласта (ГРП). При проведении операции ГРП в призабойной зоне продуктивного пласта образуется разветвленная система дренирования за счет подачи под высоким давлением

рабочей жидкости [1]. Опыт разработки многих известных месторождений УВ с коллекторами проницаемостью менее $5 - 10 \cdot 10^{-3}$ мкм², показывает, что ГРП является практически единственным методом вовлечения таких запасов в разработку. К работе низкопроницаемых пластов предъявляются дополнительные требования, что в ряде случаев ставит под сомнение экономическую целесообразность проведения гидравлического разрыва пласта и существенно увеличивает риск неуспешности операции.

Значительная часть операций гидроразрыва проводится в нашей стране. На сегодняшний день в России более 50 % скважин подвергается ГРП. Например, на месторождениях Западной Сибири проведено более 25 тыс. гидравлических разрывов пластов. С каждым годом значение ГРП, как в мировой, так и российской практике будет только возрастать. В свою очередь, технология и техника метода гидроразрыва пласта будет усложняться. Несмотря на огромный объем выполненных исследований по ГРП, в технологии данной операции много нерешенных научных задач. В настоящее время на месторождениях Западной Сибири в 80% случаях возникают осложнения при освоении скважин после проведения гидроразрыва пласта. Основная часть эксплуатационных скважин работает в условиях образования на забоях «продуктов» гидравлического разрыва пласта с частичным или полным перекрытием интервала перфорации. Ликвидация остатков геля из скважины является сложнейшей задачей.

По результатам промысловых наблюдений доказано, что обратный вынос проппанта из трещины в скважину максимален на этапе освоения скважин. Это обуславливает необходимость разработки новых прогрессивных технических средств для совершенствования методики освоения скважин после гидравлического разрыва пласта.

Материалы и методы исследований

Материалы исследования составили результаты проведения ГРП на месторождениях Западной Сибири в коллекторах средней и низкой проницаемости. Для решения проблемы закупорки перфоканалов неразложившимся гелем и сокращения сроков освоения после ГРП, были проведены многочисленные теоретические и аналитические исследования, с целью разработки комплекса устройств. Проведен литературный обзор и патентный анализ по исследуемой проблеме. Выполнена критика аналогов и разработаны более совершенные устройства для промывки перфоканалов и интервалов перфорации скважин от выносимого из трещины «ила» и разрушенного проппанта.

Результаты исследований и их обсуждение

Вынос проппанта в скважину приводит к поломке электроцентробежного насоса, снижению продуктивности скважины, изоляции про-

дуктивных пластов, частым промывкам забоев скважин. Известны многочисленные случаи, когда проппант выносится из трещины гидроразрыва пласта в огромных количествах, что существенно снижает потенциальные возможности продуктивных пластов. Количество проппанта и его разрушившихся частиц, поступающих в ствол скважины вместе с потоком пластового флюида, механических частиц и неразложившегося геля, максимально на этапах ее освоения и начальной эксплуатации. Изображение ствола скважины в интервале перфорации после кольматации неразложившимся гелем с частицами проппанта показано на рисунке 1.

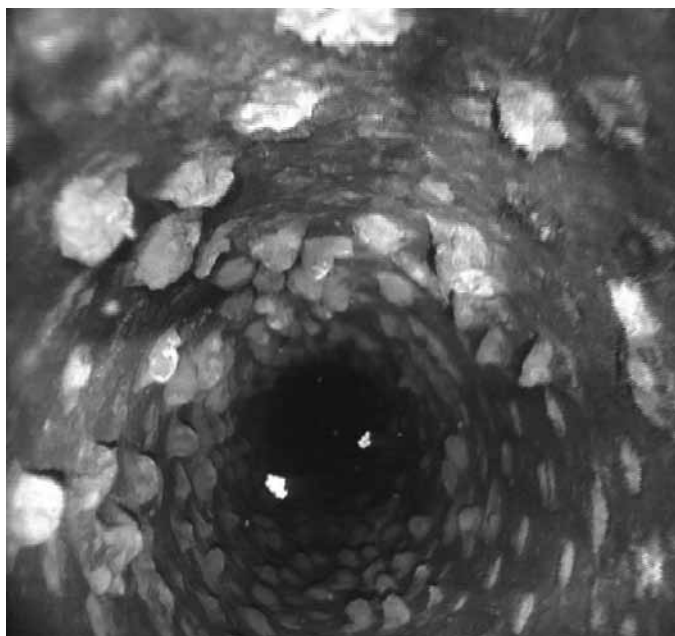


Рис. 1.

Ствол скважины в интервале перфорации после кольматации.

Fig. 1. Wellbore wall in the perforation interval after formation damage.

Необходимо также отметить, что при плохом цементировании скважины, во время проведения гидравлического разрыва пласта часть проппанта заходит в пустоты в цементном кольце, а при освоении оттуда выносится. Помимо оседания геля на стенках скважины, данная химическая жидкость оседает также в перфорканалах, закупоривая их (рис. 2).

Специалисты нефтегазовой отрасли считают, что некоторая часть несущей жидкости не разрушается даже под воздействием современных деструк-

торов - добавок, которые способствуют контролируемому снижению вязкости жидкости разрыва и удалению ее из трещины ГРП [2–5]. Если вязкоупругие «островки» остаются внутри трещины на длительное время, то они затвердевают. В дальнейшем эти участки трещины будут иметь пониженную проницаемость и отрицательно влиять на производительность скважины после выполнения ГРП [8]. Твердые и вязкоупругие частички деструктора также попадают в перфорационные каналы и налипают на стенки скважины. Эти отложения снижают проницаемость в перфоканалах. Чтобы улучшить производительность таких скважин необходимо применять промывку с максималь-



Рис. 2.

Кольматация перфоканалов неразложившимся гелем ГРП.

Fig. 2. Clogging of perforation channels by undecomposed gel for hydrofracturing.

ным приближением к осложнению. Избавиться от таких зон можно с помощью устройства для декольматации скважин, которое показано на рисунке 3.

Устройство состоит из корпуса 1 с цилиндрическим осевым каналом 2, перекрытым сверху переходником 3 с глухим доннышком 4 с коническим выступом 5, выходящим в цилиндрический осевой канал 2, переходящий в конический осевой канал 6, угол образующей которого равен углу наклона конического выступа 5. В теле переходника 3 над глухим доннышком 4 выполнено

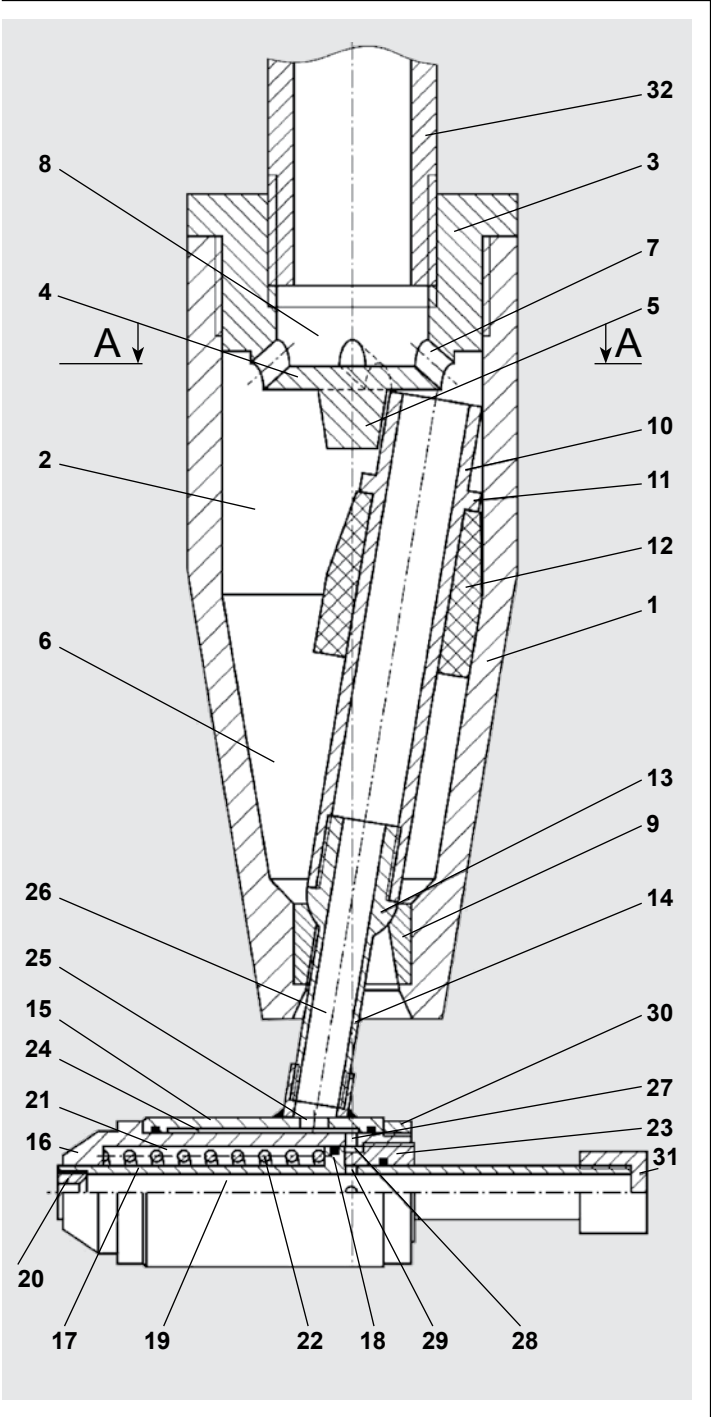


Рис. 3. Конструкция устройства в разрезе, в исходном положении деталей (продольный разрез).

Fig. 3. The design of the device in section, the parts are in the initial position (long section).

несколько тангенциальных каналов 7, гидравлически соединяющих осевой канал 8 переходника 3 с цилиндрическим осевым каналом 2 корпуса 1 (рис. 3). На нижнем конце корпуса 1 выполнена расточка, в которой установлено опорное седло 9. Внутри осевых каналов, цилиндрического 2 и конического 6 размещен полый патрубок 10, снабженный кольцевым выступом 11, на который опирается упорная втулка 12, установленная с возможностью контакта с внутренними поверхностями конического 6 и цилиндрического 2 осевых каналов корпуса 1. Верхний конец полого патрубка 10 расположен свободно между внутренней стенкой цилиндрического осевого канала 2 корпуса 1 и коническим выступом 5. На нижнем конце полого патрубка 10 установлен торцовый клапан 13 со сферической поверхностью, с опорой на ответную сферическую поверхность в опорном седле 9. При этом торцовый клапан 13 снабжен подающей трубкой 14, проходящей через осевой канал опорного седла 9 и связанной с гильзой 15, охватывающей стакан 16. В осевом канале стакана 16 установлена дренажная трубка 17, снабженная кольцевым выступом 18, в осевом канале 19 которой установлена насадка 20. Между дренажной трубкой 17 и внутренней поверхностью стакана 16 образована кольцевая камера 21, в которой размещена пружина 22, поджимающая кольцевой выступ 18 дренажной трубки 17 к торцу гайки 23, связанной со стаканом 16. В гильзе 15 выполнена внутренняя кольцевая расточка 24, которая связана перепускным отверстием 25 с осевым каналом 26 подающей трубки 14 и отверстиями 27 в теле стакана 16 с его осевым каналом 28 между гайкой 23 и кольцевым выступом 18 дренажной трубки 17, в теле которой выполнены радиальные отверстия 29 для гидравлической связи осевого канала 28 стакана 16 с осевым каналом 19 дренажной трубки 17 и находящиеся в исходном положении под гайкой 23. Стакан 16 зафиксирован в гильзе 15 стопорной гайкой 30. Осевой канал 19 дренажной трубки 17, выходящей за пределы стакана 16 перекрыт заглушкой 31. В теле переходника 3 выполнена резьба для подсоединения к колонне гибких труб 32 колтюбинговой установки. Кольцевая расточка 24 в гильзе 15 защищена от попадания агрессивных сред уплотнителями 33 и 34. Кольцевой зазор между дренажной трубкой 17 и стаканом 16 изолирован уплотнителем 35, который установлен на кольцевом выступе 18. Кольцевой зазор между гайкой 23 и дренажной трубкой 17 перекрыт уплотнением 36. Принцип действия устройства описан в работе [9].

Работа устройства

Через резьбу в переходнике 3 осуществляют подсоединение к нижнему концу колонны гибких труб 32 колтюбинговой установки и вводят в скважину с допуском до расчетной глубины. Осуществляют подачу под давлением промывочной жидкости в осевой канал 8 переходника 3, откуда жидкость по тангенциальным каналам 7 в теле переходника 3 подается с вращением потока в осевой цилиндрический канал 2 корпуса 1. Направ-

ленный динамический напор потока промывочной жидкости воздействует на площадь сечения полого патрубка 10 и упорной втулки 12, которая обкатывается по внутренней поверхности конического канала 6 корпуса 1. При этом конический выступ 5 на глухом доннышке 4 играет роль направляющего ограничителя для верхнего конца полого патрубка 10, обеспечивая его движение по окружности, ограниченной образующей цилиндрического осевого канала 2 и поверхностью конического выступа 5. При этом торцовый клапан 13 на нижнем конце полого патрубка 10 своей сферической поверхностью проворачивается в ответной сферической поверхности опорного седла 9 с сохранением герметичности осевого канала 6 корпуса 1 от внешней среды. При вращении полого патрубка 10 с упорной втулкой 12 внутри осевого канала 6 корпуса 1 промывочная жидкость поступает в полый патрубок 10 и далее через перепускное отверстие 25 в теле гильзы 15 подается внутрь кольцевой расточки 24, откуда через отверстия 27 в теле стакана 16, в его осевой канал 28, с воздействием на площадь кольцевого выступа 18 дренажной трубки 17. Под действием перепада давления дренажная трубка 17 с кольцевым выступом 18 отходит от торца гайки 23 с открытием подачи через радиальные отверстия 29 в теле дренажной трубки 17 в ее осевой канал 19. Дренажная трубка 17 перемещается внутри осевого канала 28 стакана 16, с выходом за его пределы в направлении к обрабатываемой поверхности с одновременным сжатием пружины 22. Струя промывочной жидкости истекает через канал насадки с воздействием на слой отложений, при нахождении от него на минимальном расстоянии. При постоянной подаче промывочной жидкости происходит вращение сборки относительно обрабатываемой поверхности. По мере очистки стенки трубы осуществляют плавное перемещение устройства вверх или вниз движением гибкой трубы колтюбинговой установки. После прекращения подачи промывочной жидкости усилием пружины 22 дренажная трубка 17 с кольцевым выступом 18 перемещается в осевом канале 28 стакана 16 до торцового контакта с гайкой 23, с перекрытием сечения радиальных отверстий 29 и прекращением гидравлической связи осевого канала 19 дренажной трубки 17 с внутренней полостью устройства. При необходимости, для обеспечения более надежного возврата дренажной трубки 17 в исходное положение усилием сжатой пружины 22, возможна установка дополнительной пружины между гайкой 23 и заглушкой 31.

Применение данного устройства позволит увеличить эффект воздействия струи рабочего агента на отложения за счет использования ее полного расхода, который направляется через сопло, а также изолировать внутреннюю полость устройства от попадания пластовой жидкости и частиц разрушенного проппанта по окончании процесса промывки. Схема расположения устройства в скважине показана на рисунке 4. Технологической особенностью данного устройства является то, что его можно спускать через насосно-компрессорные трубы с применением колтюбинговой установки.

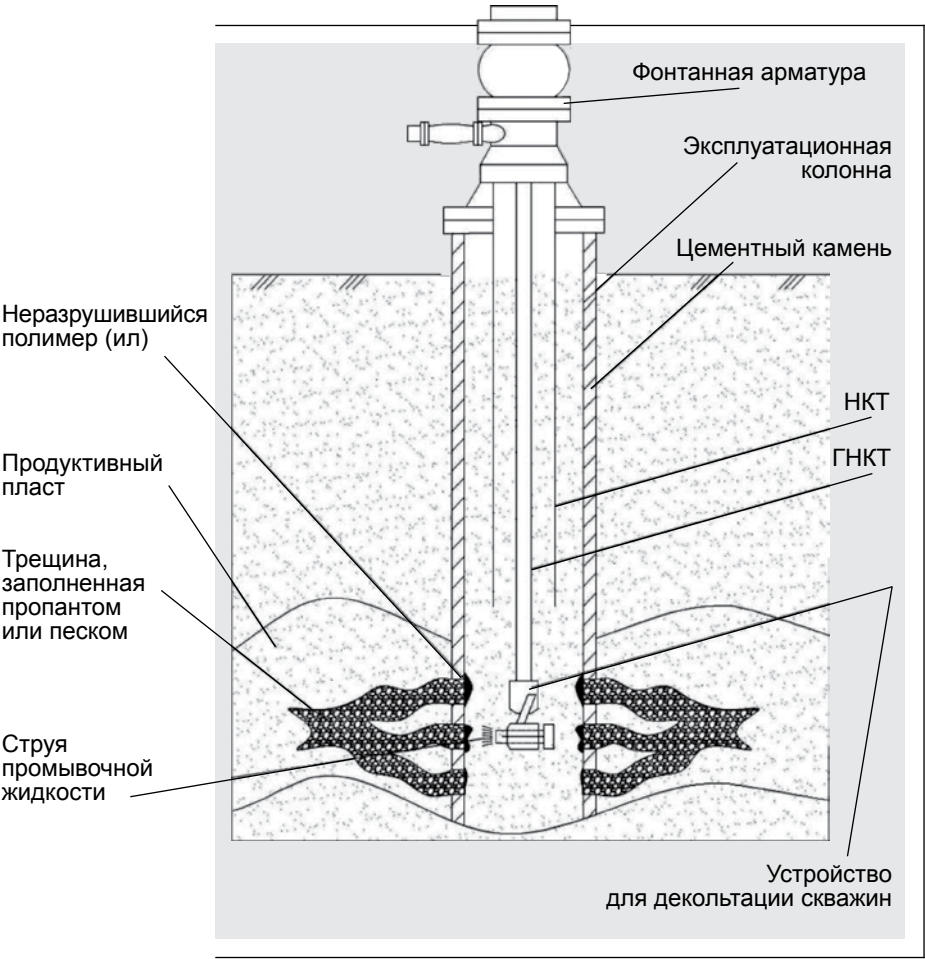


Рис. 4. **Схема расположения устройства в скважине.**

Fig. 4. Diagram of the device placement in a wellbore.

Таблица 1.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВА
Table. 1 Technical specifications of the device

Расход жидкости через компоновку л/мин	70–110
Давление рабочей жидкости, не более, МПа	66
Максимальный диаметр компоновки, мм	70
Рабочая жидкость	Вода
Диаметры ГНКТ	50,8 и 25,4
Рабочая температура установки, не более °С	145

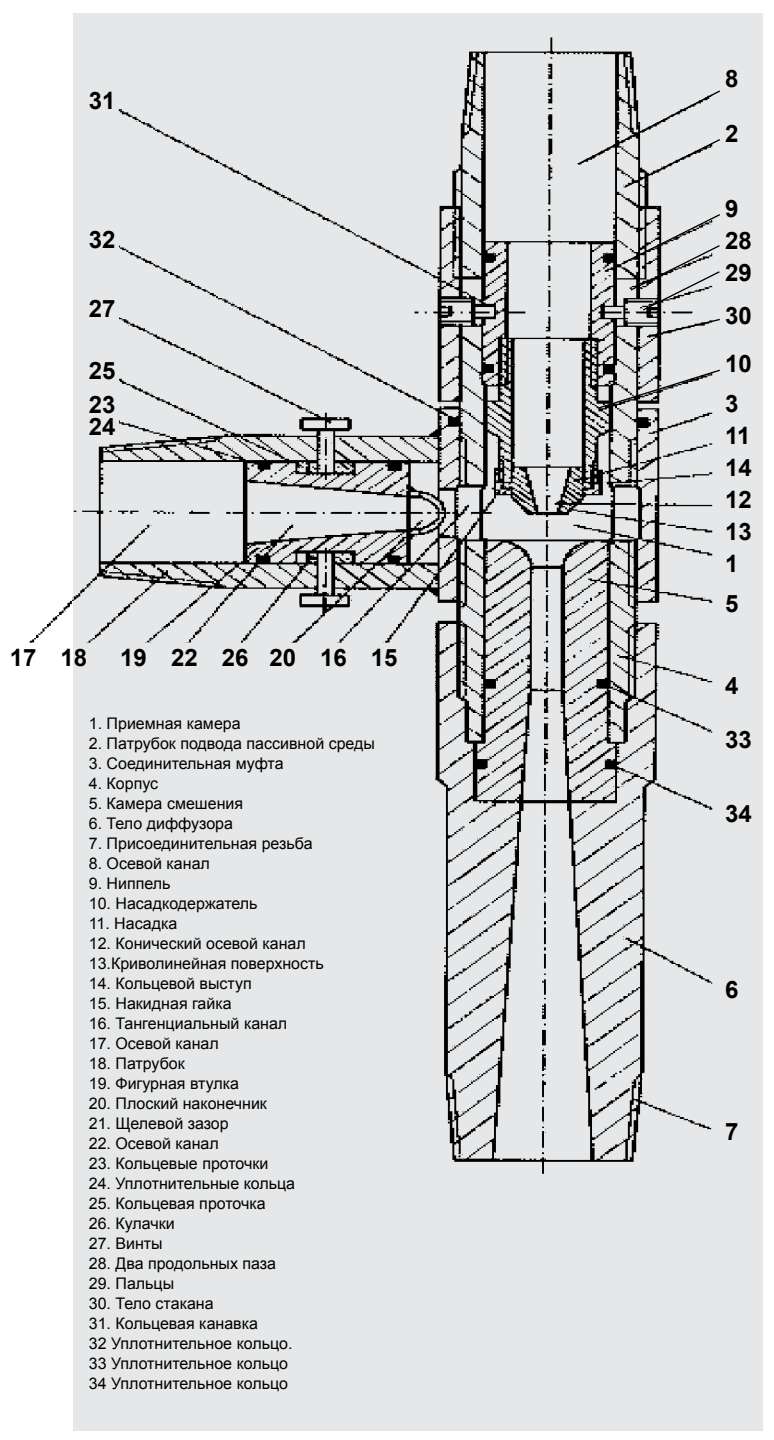


Рис. 5.

Струйный насос.

Fig. 5. Jet pump.

На месторождениях Западной Сибири все большее распространение находят гибкие насосно-компрессорные трубы (ГНКТ) для ликвидации в стволе скважины «продуктов» гидравлического разрыва пласта, которые выпадают на забой. Для промывки скважины предлагается использовать пенные системы.

Использование пенных систем обусловлено преимуществами:

- при попадании в пласт технологических жидкостей сохраняются коллекторские свойства призабойной зоны пласта (ПЗП);
- применение пенных систем позволяет быстро регулировать давление на забое скважины, таким образом можно оперативно перейти от репрессии к депрессии;
- пена обладает отличной несущей способностью, что улучшает очистку интервала перфорации от частичек геля и проппанта после ГРП.

Однако использование в качестве циркулирующего агента в скважине пенных систем сопровождается повышенной сложностью. Необходимо использовать специальное оборудование, чтобы создавать пену. Для лучшей генерации пены автором разработана конструкция струйного насоса. Схема струйного аппарата представлена на рисунке 5.

Струйный насос состоит из приемной камеры 1, образованной патрубком подвода пассивной среды 2, соединительной муфтой 3, связанной с корпусом 4, в осевом канале которого установлена камера смешения 5, охватываемая снизу телом диффузора 6, с присоединительной резьбой 7 под быстросъемное соединение для связи с потребителем. В осевом канале 8 патрубка подвода пассивной среды 2 установлен с возможностью осевого перемещения ниппель 9, связанный с насадкодержателем 10, на нижнем конце которого установлена насадка 11 пассивной среды с коническим осевым каналом 12 и наружной криволинейной поверхностью 13. Насадка 11 снабжена кольцевым выступом 14 и свободно входит в осевой канал насадкодержателя 10, где удерживается от выпадения накидной гайкой 15. Насадка 11 размещается в приемной камере 1, которая через тангенциальный канал 16 в теле соединительной муфты 3 гидравлически связана с осевым каналом 17 патрубка 18 подвода активной среды. В осевом канале 17 патрубка 18 установлена фигурная втулка 19 с коническим плоским наконечником 20, входящим внутрь тангенциального канала 16 с образованием щелевого зазора 21. Внутри фигурной втулки 19 выполнен подводящий осевой канал 22, гидравлически соединяющий осевой канал 17 патрубка 18 со щелевым зазором 21. На внешней стороне фигурной втулки 19 выполнены кольцевые проточки 23 для установки уплотнительных колец 24 и кольцевая проточка 25, в которой размещаются кулачки 26, снабженные винтами 27 для ограниченного осевого перемеще-

ния фигурной втулки 19 в осевом канале 17 патрубка 18. В теле патрубка 2 для подвода пассивной среды выполнены два продольных паза 28, в которые введены пальцы 29, жестко связанные с телом стакана 30, охватывающим тело патрубка 2 подвода пассивной среды, и связанный с ним резьбовым соединением. Насадкодержатель 10 связан резьбой с ниппелем 9, снабженным на внешней стороне кольцевой канавкой 31, в которую свободно введены концы пальцев 29. Кольцевой зазор между соединительной муфтой 3 и наружной поверхностью патрубка 2 для подвода пассивной среды герметизирован уплотнительным кольцом 32. Кольцевой зазор между наружной поверхностью камеры смещения 5 и корпусом 4 перекрыт уплотнительным кольцом 33. Зазор между камерой смещения 5 и диффузором 6 перекрыт уплотнительным кольцом 34.

Принцип действия насоса

Патрубок 2 подвода пассивной среды через быстросъемное соединение связывается с выкидной линией компрессора [11]. Патрубок 18 подвода активной среды подсоединяется к насосному агрегату. Активная среда подается в осевой канал 17 патрубка 18, откуда по подводящему каналу 22 втулки 19 подается по щелевому зазору 21 в тангенциальный канал 16 с выходом внутрь приемной камеры 1. При этом происходит закручивание потока, который по криволинейной поверхности 13 насадки 11 вводится в осевой канал камеры смещения 5 с изменением радиуса закрутки потока на меньший.

Поскольку насадка 11 установлена в насадкодержателе 10 свободно, то насадка 11 также может вращаться за счет взаимодействия с потоком. Согласно уравнению неразрывности потока при его закручивании с переходом на меньший радиус закрутки происходит увеличение его скорости со снижением давления в центре. Поток пассивной среды по коническому осевому каналу 12 насадки 11 втягивается в приемную камеру 1 и взаимодействует с активной средой, которая охватывает струю газа и сжимает ее. По мере перемещения смеси пассивной и активной сред происходит их смешивание с приобретением необходимой кинетической энергии и последующим ее преобразованием в потенциальную энергию давления при прохождении через диффузор 7 с дальнейшей подачей смеси потребителю. Для оптимизации режима работы струйного насоса предусмотрено изменение расхода и скорости активной среды. Это достигается тем, что за счет передачи крутящего момента через винты 27 на кулачки 26, размещенные внутри кольцевой проточки 25 фигурной втулки 19, производится перемещение фигурной втулки 19 в осевом направлении. Тем самым конический плоский наконечник 20 вводится или выводится из тангенциального канала 16 с изменением сечения щелевого зазора 21, а значит и скорости потока активной среды, подаваемой внутрь приемной камеры 1. Вращением стакана 30 относительно тела патрубка 2 при взаимо-

действию пальцев 29 с телом ниппеля 9 по кольцевой канавке 31 осуществляют осевое перемещение ниппеля 9 вместе с насадкодержателем 10 и насадкой 11 внутри приемной камеры 1 с изменением расстояния между насадкой 11 и камерой смешения 5. При этом меняется режим работы струйного насоса. Такая настройка на оптимальный технологический режим работы струйного насоса может производиться непосредственно в процессе работы, остановки процесса и демонтажа устройства с места установки для перенастройки и изменения режима работы не требуется.

Применение данного струйного насоса для генерации пены позволит получить следующие преимущества, по сравнению с аналогичными устройствами:

- возможность управления технологическим процессом компримирования газа, получения аэрированных жидкостей (пенных систем) за счет осевого перемещения насадки относительно камеры смешения;
- возможность регулирования скорости подачи активной среды для оптимизации работы устройства за счет изменения живого сечения щелевого зазора путем перемещения фигурной втулки в осевом канале подводящего патрубка активной среды;
- возможность повышения эффективности смешения и компримирования двухфазных аэрированных жидкостей за счет подачи пассивной среды по осевому каналу приемного патрубка к насадке;
- возможность подачи активной среды через подводящий патрубок и щелевой зазор в камеру смешения перпендикулярно к оси насадки с завихрением в тангенциальных каналах, с изменением радиуса закрутки от большего диаметра к меньшему и падением давления в центре потока;
- возможность подсоса пассивной среды (газа) в воронку, образованную вращающейся активной средой (жидкостью), и их смешения.

Выводы

1. На нефтяных промыслах наблюдается выход из скважины больших объемов проппанта, механических частиц, неразложившейся жидкости гидроразрыва пласта. Некоторая часть несущей жидкости не разрушается даже под воздействием деструктора. Смесь механических частиц, обломков проппанта с неразложившемся гелем образует в перфорационных каналах и на стенках скважины трудноудаляе-

мую смесь – «ил». В дальнейшем эти затвердевшие остатки снижают проницаемость в перфоканалах. Чтобы улучшить производительность таких скважин, необходимо ее промыть с максимальным приближением к осложнению. Избавиться от таких осложнений можно с помощью предлагаемого комплекса устройств, используемых для освоения скважин после гидроразрыва пласта.

2. Разработано устройство для декольматации скважин: Патент Российской Федерации на изобретение № 2651869, заявка № 2017109500.
3. Разработан струйный насос для лучшей генерации пены: Патент Российской Федерации на изобретение № 2643882, заявка № 2017114222.

Библиографический список

1. Верисокин А.Е., Граб А.Н., Граб Д.Н., Сериков Д.Ю. Анализ факторов, влияющих на работоспособность пакеров при проведении гидроразрыва пласта// Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2017. № 7.
2. Зинченко И.А. и др. Применение гидроразрыва пласта для интенсификации притока на газоконденсатных скважинах Ямбургского месторождения и перспективы применения метода в процессе дальнейшего освоения залежей. М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2007.
3. Anderson J. Simpson M. and Bosinski P. Producing Natural Gas from Coal. Oilfield Review, Autumn 2003.
4. Reducing Produced Water Volumes from Coal Bed Natural Gas in the Powder River Basin. ALL, 2005.
5. Кейбал А.В., Кейбал А.А. О причинах обратного выноса проппанта в ствол скважины после гидроразрыва продуктивного пласта// Бурение и нефть. 2009. № 11.
6. Меркулов А.А. Импульсные технологии интенсификации и гидроразрыва пласта (часть I) // Нефтяное хозяйство. 2007. № 9.
7. Судо Р.М. Разработка низкопроницаемых пластов на месторождениях ОАО «РИТЭК» с применением гидроразрыва пласта // Нефтяное хозяйство. 2007. № 3.
8. Фахретдинов Р.Н., Бровчук А.В. Результаты применения гидроразрыва пласта для разработки южной лицензионной территории Приобского нефтяного месторождения // Нефтяное хозяйство. 2007. № 3.
9. Заявление о выдаче патента Российской Федерации; Регист-

рационный номер № 2017109500, 18.04.2017; Устройство для декольматации скважин.

10. Верисокин А.Е., Машков В.А., Зиновьева Л.М. Восстановление добычных возможностей горизонтальных участков скважины путем удаления пропантовых пробок // Наука. Инновации. Технологии. Вып. № 4. 2015, Ставрополь, с. 81 – 90.
11. Заявление о выдаче патента Российской Федерации; Регистрационный номер № 2017114222, 24.04 2017; Струйный насос.

References

1. Verisokin A.E., Grab A.N., Grab D.N., Serikov D.U. Analysis of factors affecting the working capacity of packers during hydraulic fracturing // Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more [Construction of oil and gas wells on land and sea]. 2017. № 7.
2. Zinchenko I.A. et al. The application of hydraulic fracturing to intensify the inflow of gas condensate wells in the Yamburgskoye field and the prospects for applying the method in the process of further development of deposits. Moscow: JSC «IRC Gazprom», 2007.
3. Anderson J. Simpson M. and Bosinski P. Producing Natural Gas from Coal. Oilfield Review, Autumn 2003.
4. Reducing Produced Water Volumes from Coal Bed Natural Gas in the Powder River Basin. ALL, 2005.
5. Keybal A.V., Keybal A.A. On the reasons for the reverse removal of proppant into the wellbore after hydraulic fracturing of the reservoir // Burenie i neft. 2009. №11.
6. Merkulov A.A. Impulse technologies for stimulation and fracturing (Part I) // Neftyanoe khozyaystvo [Oil industry]. 2007. № 9.
7. Sudo R.M. Development of low-permeability reservoirs at the fields of JSC "RITEK" with application of hydraulic fracturing // Neftyanoe khozyaystvo [Oil industry]. 2007. № 3.
8. Fakhretdinov R.N., Brovchuk A.V. The results of hydraulic fracturing application for the development of the southern licensed territory of the Priobskoye oil field // Neftyanoe khozyaystvo [Oil industry]. 2007. № 3.
9. Application for the grant of a patent of the Russian Federation; Registration number No. 2017109500, 18.04.2017; Device for cleanout of wells
10. Verisokin A.E., Mashkov V.A., Zinovieva L.M. Restoration of production capabilities of horizontal sections of the well by removing proppant plugs // Nauka. Innovacii. Tekhnologii. Issue. № 4. 2015, Stavropol, pp. 81-90.
11. Application for the grant of a patent of the Russian Federation; Registration number № 2017114222 24.04.2017; Jet pump.

Публикация поступила в редакцию 12.05.2018 г.

Принята к публикации 26.08.2018 г.

Сведения об авторах

Верисокин Александр Евгеньевич – старший преподаватель кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Института нефти и газа Северо-Кавказского федерального университета. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6530-4126>; ResearcherID: <http://www.researcherid.com/rid/P-9519-2018>.
Номер телефона: 8-962-015-41-66
Электронная почта: verisokin.aleksandr@mail.ru

About the author

Verisokin Alexander Evgenievich – senior lecturer of the department of development and operation of oil and gas fields, Institute of oil and gas, North Caucasus federal university. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6530-4126>; ResearcherID: <http://www.researcherid.com/rid/P-9519-2018>.
Telephone number: 8-962-015-41-66
E-mail: verisokin.aleksandr@mail.ru

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ
И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК

622.276.04

А.О. ШЕСТЕРЕНЬ

Северо-Кавказский федеральный университет,
г. Ставрополь, Россия,
026stav@gmail.com

**МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
СКВАЖИН
ПЕРИОДИЧЕСКОГО ГАЗЛИФТА**

Введение:

актуальность работы заключается в необходимости решать задачи оптимизации газлифта в режиме минимального удельного расхода газа для предприятий нефтегазовой отрасли. Оптимизация работы газлифтных скважин и перераспределение закачиваемого газа позволяют более рационально использовать ресурсы газа и существенно повысить добычу на месторождениях СП «Вьетсов-петро».

Материалы
и методы:

использованы параметры работы скважин периодического газлифта, перечень осложнений при эксплуатации малодебитных скважин.

Результаты
исследования:

определены конструктивные особенности скважины, влияющие на работу установки периодического газлифта. Выявлен ряд неисправностей в газлифтной эксплуатации. Обоснованы методы повышения эффективности газлифтного подъемника.

Обсуждение и
заключения:

автором проведен анализ причин неисправности в газлифтной эксплуатации, предложены мероприятия по их устранению. Проведен анализ мероприятий по повышению КПД газлифтного подъемника.

Ключевые слова:

газлифт, газожидкостная смесь, оптимизация газлифтных скважин, удельный перепад давления, безразмерная скорость газа, гидравлическая характеристика.

ACTIVITIES TO INCREASE THE EFFICIENCY OF PERIODICALS ARTIFICIAL WELLS

Shesteren' A.O. North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia,
026stav@gmail.com

Introduction: urgency of this work lies in the need to solve problems of gas-lift optimization in regime of minimum specific gas consumption for oil and gas industry. Optimization of gaslift wells operation and redistribution of injected gas allow more rational use of gas resources and significantly increase production at fields of JV «Vietsovpetro».

Materials and Methods: parameters of operation for artificial gas-lift wells, a list of complications in operation of low-yield wells were used.

Results: the design features of well that influence operation of artificial gas-lift are determined. A number of faults in gas-lift operation are revealed. The methods for increasing efficiency of gas-lift are substantiated.

Discussion and Conclusion: the author analyzed causes of the malfunction in gas-lift operation, proposed measures to eliminate them. The analysis of measures to increase the efficiency of gas-lift wells was carried out.

Key words: gas-lift, gas-liquid mixture, optimization of gas-lift wells, specific pressure drop, dimensionless gas velocity, hydraulic characteristic.

Введение

В СП «Вьетсовпетро» фонд газлифтных скважин постоянно увеличивается. В то же время сокращается объем добычи фонтанным способом при росте обводненности скважинной продукции. Создаются предпосылки к сокращению добычи пластового газа. В этих условиях уже сейчас необходимо решать задачи оптимизации газлифта в режиме минимального удельного расхода газа. Однако этот режим характеризуется существенными пульсациями забойного давления, неустойчивой работой скважин. Есть необходимость в новых технологиях газлифтной добычи нефти.

Оптимизация работы газлифтных скважин и перераспределение закачиваемого газа позволяют более рационально использовать ресурсы газа и существенно повысить добычу на месторождениях СП «Вьетсовпетро». [1].

Материалы и методы

Разработка оптимальной компоновки внутрискважинного оборудования

Ниже рассмотрено внутрискважинное оборудование, применяемое в СП для скважин периодического газлифта, а также влияние конструктивных особенностей скважин на эффективность их эксплуатации.

В настоящее время периодическая газлифтная эксплуатация скважин с использованием пилотно-управляемых клапанов WFM 14R на месторождении Белый Тигр представлена 5 скважинами, конструкция которых показана на рисунке 1. В таблице 1 приводятся основные режимные параметры работы скважин. Дебит жидкости скважин изменяется в пределах от 5,8 т/сут до 18,8 т/сут, обводненность от 1,8% до 38,9%. Наименьший расход газлифтного газа составляет 3,5 тыс. м³/сут; наибольший – 10 тыс. м³/сут. Удельные расходы газа по жидкости изменяются в пределах 240 м³/т – 838 м³/т.

Все скважины, эксплуатирующиеся периодическим газлифтом на месторождении оборудованы установками с открытым выкидом, подачей газа в затрубное пространство и отсечкой его с помощью пилотного клапана [5].

К конструктивным особенностям скважины, влияющим на работу установки периодического газлифта относятся:

- (1) диаметр эксплуатационной колонны;
- (2) диаметр насосно-компрессорных труб;
- (3) наличие переводников;
- (4) длина подъемника;
- (5) конструкция елки фонтанной арматуры скважины.

Основные параметры работы скважин периодического газлифта представлены в таблице 1.

Таблица 1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ СКВАЖИН ПЕРИОДИЧЕСКОГО ГАЗЛИФТА
Table 1. The main parameters operation of artificial gas-lifts

№№ п/п	№ скв	Объект	Дебит нефти, т/сут	Обвод- нен- ность, %	Дебит жидкости, т/сут	Расход компри- мир. газа, м³/сут	Удельный расход газа по жидк., м³/т
1	715	Олигоцен	9	38,9	15,7	3544	240
2	708	Н. Миоцен	5	13,9	5,8	4867	838
3	605	Олигоцен	10	4,3	10,5	5397	516
4	1010	Олигоцен	18	1,8	18,3	9791	534
5	94	Олигоцен	18	4,1	18,8	3953	240
Среднее значение			12	11,9	13,6	5510	468

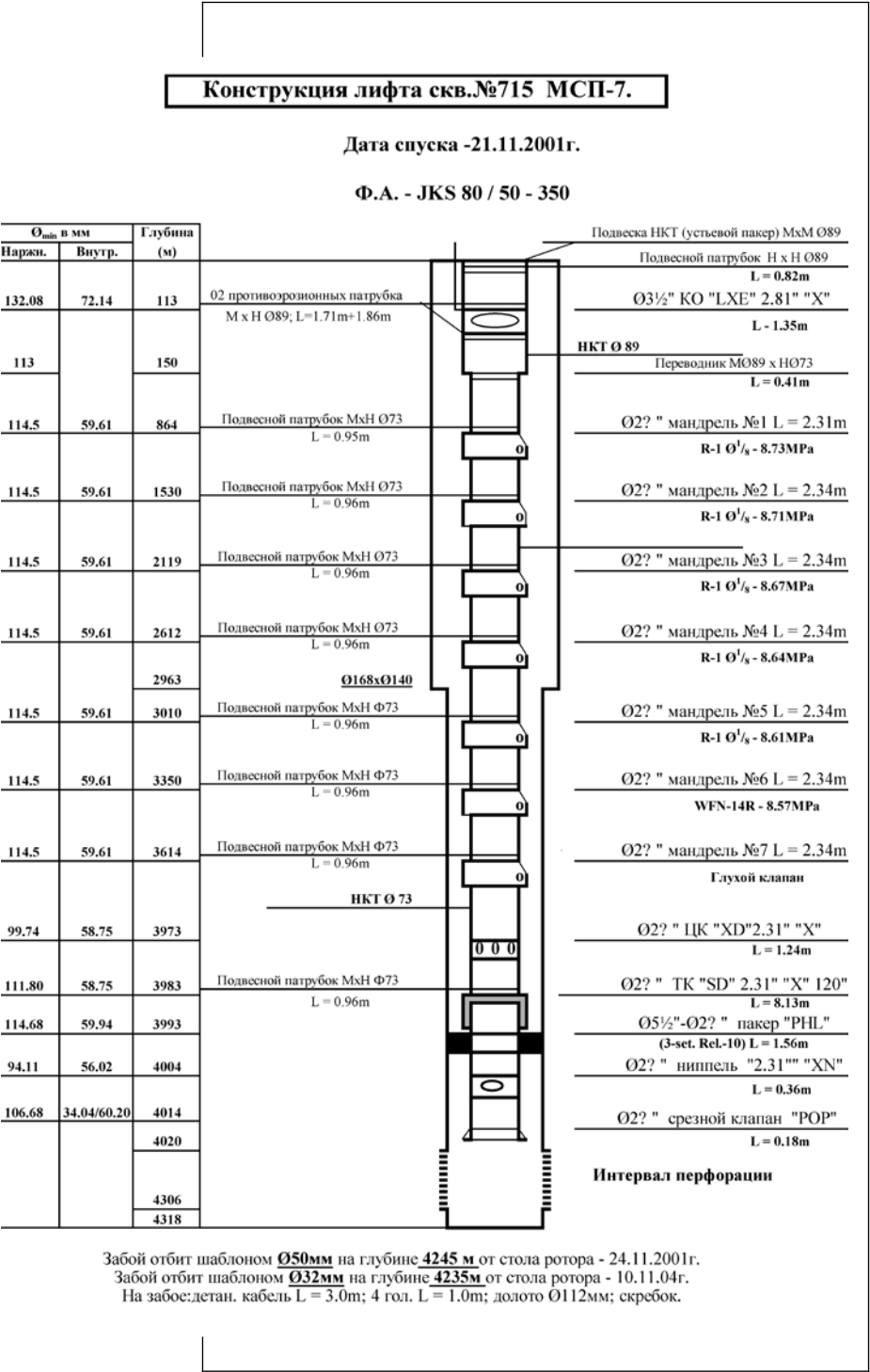


Рис. 1. Фактическое BCO скв. 715/МСП-7.
Fig. 1. Actual IBE Well 715 / MSP-7.

Результаты исследования и их обсуждение

В таблице 2 приводятся некоторые наиболее часто встречающиеся неисправности в газлифтной эксплуатации и рекомендуются мероприятия по их устранению.

Таблица 2. НЕИСПРАВНОСТИ В ГАЗЛИФТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И МЕРОПРИЯТИЯ ПО ИХ УСТРАНЕНИЮ
Table 2. Malfunctions in gas-lift operation and measures for their elimination

Неисправность	Причина	Мероприятия
Сообщение между затрубным и НКТ	А. Клапан не закрывается	Создать/сбросить давление на клапане, промыть клапан
	В. Утечки в пакере	Переустановить пакер
	С. Утечки в НКТ	Поднять, проинспектировать спустить снова
	Д. Открыть иркуляционный клапан	Закрыть клапан
Увеличилось затрубное давление	А. Точка ввода газа изменилась на верхний клапан	Отрегулируйте компримированный газ на максимальный дебит
	В. Забит клапан	Поднять НКТ
	С. Поднялась температура в скважине, влияющая на давление открытия газлифтных клапанов	Установить клапаны конструкции которая не влияет температура или уменьшите давление зарядки на стенде сильфонного клапана
	Д. Маленькая высота пробок жидкости	Уменьшите частоту циклов.
Скорость жикостной пробки меньше 305 м/ мин.	А. Чрезмерна высота пробки жидкости	Увеличить частоту циклов
	В. Низкое давление линии подачи компримированного газа	Увеличить давление или уменьшить расстояние между газлифтными клапанами
	С. Газлифтный клапан частично перекрыт	Промыть водой или ПАВом
	Д. НКТ частично перекрыты	Очистить НКТ от парафина с помощью растворителя или промыть горячей нефтью
	Е. Занижен размер порта клапана	Заменить клапаном с большим размером порта

Неисправность	Причина	Мероприятия
Высокое давление в выкидной линии	А. Забита выкидная линия	Проверить и прикрыты ли задвижки, обратные клапаны, нет забиты ли линии парафиноотложениями и песком.
	В. Высокое давление в сепараторе	Переустановить давление в сепараторе или установить дополнительный
	С. Маленький диаметр выкидной линии	Сделать байпас или заменить на больший диаметр
	Д. Чрезмерный расход компримированного газа	Отрегулировать контрольно-измерительную аппаратуру
Резкое снижение дебита – (Клапан открывается и закрывается нормально)	А. Снижение проницаемости пласта	Очистить скважину
	В. Перекрыты НКТ	Проверить НКТ ниже рабочего клапан
	С. Забиты нижние клапаны	Промыть или заменить
	Д. Слишком много или мало газа	Проверить контролирующую аппаратуру
	Е. Обратный клапан заклинен в открытом положении	Поднять НКТ и очистить

Выводы

Методы повышения эффективности газлифтного подъемника

Имеются два основных направления повышения КПД газлифтного подъемника.

Первое направление связано с увеличением глубины погружения подъемника под динамический уровень, что при сохранении уровня отбора жидкости позволяет снизить общий и удельный расход газа. Реализация этого направления связана с увеличением необходимого давления рабочего агента и, соответственно, давления в газораспределительной системе месторождения, что в большинстве случаев ограничивается существующими характеристиками газопромыслового оборудования. Метод не применим при низкой продуктивности пласта и низких динамических уровня жидкости.

Второе направление связано со снижением относительной скорости газа.

Известно, что относительная скорость газа зависит, в основном, от структуры газожидкостного потока [6], которая, в свою очередь, определяет степень дисперсности одной из фаз (жидкой или газообразной).

Известны следующие способы дробления фазы.

1. Введение в подъемник поверхностно-активных веществ (ПАВ) [7].

2. Дробление газовой или жидкой фазы различного рода диспергаторами [8].

Оба из указанных способов снижения относительной скорости газа преследуют цель – создание в подъемнике эмульсионной структуры (дробление газовой фазы) или пленочно-диспергированной структуры потока (дробление жидкой фазы).

Область эффективного действия ПАВ определяется величиной объемного расходного газосодержания β , т. е. долей газа в объеме газожидкостной смеси, и скоростью движения газожидкостной смеси $v_{см}$. Эмульсионную структуру можно получить при $\beta < 0,2$ и $v_{см} > 0,5$ м/с, пленочно-диспергированную структуру – при $\beta > 0,9$ и $v_{см} > 3$ м/с. При меньших значениях скорости смеси не достаточно энергии турбулентных пульсаций для дробления дисперсной фазы. При $0,2 < \beta < 0,9$ имеет место естественная структура потока – пробковая и пробково-диспергированная, сопровождающиеся высокой по амплитуде пульсацией давления.

При введении в подъемник ПАВ, особенно в условиях высокого процента обводненности продукции скважины, образуются стойкие эмульсии, которые с трудом поддаются разрушению при подготовке нефти. Кроме того, для обеспечения процесса требуются либо индивидуальные на каждой скважине, либо централизованные дозирочные установки для подачи ПАВ с потоком рабочего газа в затрубное пространство. Учитывая высокую стоимость химреактивов и выше указанные недостатки, данный способ не нашел широкого применения на практике [9].

Диспергаторы устанавливаются по длине колонны НКТ через 50–100 м. Это требует проведения капитального ремонта с глушением скважины, что отрицательно сказывается на состоянии призабойной зоны пласта. Возможен спуск диспергаторов на проволоке с последующим их креплением в муфтовых соединениях. Конструкция таких диспергаторов достаточно сложная. Наличие диспергаторов исключает спуск в скважину глубинных приборов, в газлифтном подъемнике создаются дополнительные гидравлические сопротивления.

Предлагается также воздействовать на жидкость с целью ее дегазации и дополнительного образования газовых пробок [8].

Сущность электрических способов заключается в создании электрических разрядов в подъемнике, при которых происходит резкое повышение температуры, вскипание жидкости и, как следствие, интенсивное образование газовой фазы. Более мелкие газовые пузырьки, сливаясь в крупные, образуют газовые пробки. Периодичность создания разрядов и их длительность определяют частоту образования газовых пробок и их длину. [3].

Повышение эффективности эксплуатации газлифтных скважин с помощью химических реагентов

Эксплуатация низкодебитных газлифтных скважин СП «Вьетсовпетро» сопровождается рядом осложнений. В первую очередь это отложения парафина на внутренней поверхности насосно компрессорных труб, которые иногда почти полностью перекрывают проходное сечение НКТ, вызывая значительное снижение дебита. Обычно такие отложения встречаются в НКТ скважин м/р Белый Тигр до глубины 800–1000 м. [2].

Другой проблемой осложняющей эксплуатацию газлифтных скважин СП «Вьетсовпетро» является образование плотных эмульсий, вязкостью, оценочно, на порядок – два больше, чем вязкость компонентов входящих в состав эмульсии (вода и нефть). О существовании таких эмульсий свидетельствуют пробы нефти отбираемые на устье скважин. Это вязкие структурированные (азрированные) жидкости светло-коричневого цвета консистенции майонеза. Такие эмульсии создают большие гидравлические сопротивления, которые осложняют успешную разгрузку скважины до рабочего клапана и даже при подаче газа через рабочий клапан приводят к уменьшению дебита, неэффективному расходованию компримированного газа.

В приложении приведен обзор литературных источников, в основном по материалам «Общества инженеров-нефтяников» (SPE), связанных с применением химических реагентов (ингибиторов парафиноотложений и деэмульгаторов) в мире. Сделаны практические выводы для условий СП «Вьетсовпетро», в частности, рекомендуется:

- Постоянная подача дисперсантов, модификаторов кристаллической структуры парафинов и деэмульгаторов в НКТ ниже рабочего клапана.
- Для подачи реагента необходимо в компоновку ВСО низкодебитных газлифтных скважин включать инъекционную трубку и ингибиторный клапан.
- Для скважин с эксплуатационной колонной 140 мм рекомендуется организовать непрерывную подачу реагента через затрубное пространство.

Библиографический список

1. Акопян, Б.А. Разработка методики расчета режимов работы периодического газлифта: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.06 / Б.А. Акопян. Москва, 1989. 222 с.
2. Бикбулатов С.М., Пашали А.А. Анализ и выбор методов расчета градиента давления в стволе скважины, Нефтегазовое дело. 2005. № 2. С. 1-12.
3. Васильев В.А., Белогорцев Г.П., Гужов А.И. Определение относительной скорости газа по результатам промысловых исследований газлифтных скважин, Нефтяное хозяйство. 1986. Вып. 2. С. 58-61.
4. Васильев В.А., Белогорцев Г.П., Гужов А.И. Определение параметров работы газлифтного подъемника в режиме максимального отбора жидкости. Сборник научных трудов ВНИИ. 1986. Вып. 97. С. 48-52.
5. Васильев В.А., Белогорцев Г.П., Гужов А.И. Оптимальный дебит жидкости газлифтных скважин. Нефтяное хозяйство. 1987. Вып. 5. С. 55-59
6. Васильев В.А., Берченко В.И., Голод Г.С., Шершнева Е.С. Определение относительной скорости в газлифтных скважинах. Нефтяное хозяйство. 1991. Вып. 3. С. 30-31.
7. Васильев В.А., Гунькина Т.А., Шестерень А.О. Анализ методов прогнозирования многофазных потоков. Нефтепромысловое дело. 2016. №2. С. 11-15.
8. Гужов А.И. Совместный сбор и транспорт нефти и газа. М.: Недра, 1973. 469 с.
9. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. М.: «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2007. 826 с.

References

1. Akopyan B.A. Development of a technique for calculating the operating modes of periodic gas lift. Diss. candidate of science. Specialist. 05.15.06. Moscow, 1989.
2. Bikbulatov S. M., Pashali A.A. Analysis and selection of methods for calculating the pressure gradient in the wellbore. "Oil and gas business", 2005
3. Vasiliev V.A., Belogortsev G.P., Guzhov A.I. "Determination relative's gas velocity from results of field trials for Artificial lift wells (article) "Oil Industry", No. 2, 1986.
4. Vasiliev V.A., Belogortsev G.P., Guzhov A.I. "Determination operation's parameters of Artificial lift in the regime of maximum fluid extraction" (article) Collection of scientific works of the All-Union Scientific Research Institute, No. 97, 1986.
5. Vasiliev V.A., Belogortsev G.P., Guzhov A.I. Optimal fluid production rate of gaslift wells. (article) "Oil Industry", No. 5, 1987.

6. Vasiliev V.A., Gun'kina T.A., Shesteren' A.O. / Analysis of methods for calculating multiphase flows / "Oilfield business", No. 2, 2016.
7. Guzhov A.I. "Joint collection and transportation of oil and gas." Moscow: Nedra, 1973. 469 p.
8. Mishchenko I.T. Downhole oil production. M.: "OIL AND GAS" of the Gubkin RSU of oil and gas, 2007. 826 p.
9. Development of oil, gas and gas condensate fields. M.: Proc. for universities. Ed. Sh.K. Gimatudinov. Moscow: Nedra, 1988. 302 p.

Сведения об авторе

Шестерень Алена Олеговна, старший преподаватель ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
(г. Ставрополь, пр. Кулакова, 16/1, корпус № 16)
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8784-1798>;
ResearcherID: O-9746-2018,
E-mail: 026stav@gmail.com

About the authors

Shesteren Alena Olegovna, senior lecture FSAEI of HE «North-Caucasus Federal University» (Kulakova avenue, 16/1, Stavropol, Russia) ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8784-1798>;
ResearcherID: O-9746-2018, E-mail: 026stav@gmail.com

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ
И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

УДК 911.52

Т.В. Дегтярева*,
А.А. Лиховид,
Н.Г. Лиховид

Северо-Кавказский федеральный университет,
г. Ставрополь, Россия.
*dtb.70@mail.ru

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ
ЛИТОГЕННОЙ ОСНОВЫ ЛАНДШАФТОВ
БОЛЬШОГО КAVKAZA

Введение:

актуальность исследования обусловлена необходимостью выявления роли литогенной основы ландшафтов Большого Кавказа в формировании их геохимических особенностей и закономерностей миграции и концентрации химических элементов в различных ландшафтно-геохимических условиях. Цель статьи заключается в изучении специфики геохимической дифференциации приповерхностных (почвообразующих) отложений ландшафтов Большого Кавказа.

Материалы
и методы:

использован метод сравнения химического состава основных почвообразующих комплексов физико-географических подобластей северных склонов Большого Кавказа с региональным литогеохимическим фоном.

Результаты
исследования:

Выявлена геохимическая дифференциация почвообразующих комплексов пород для физико-географических подобластей северных склонов Большого Кавказа, выделяемых при физико-географическом районировании территории. Области распространения отдельных комплексов почвообразующих пород рассматриваются как литогеохимические поля региональных геосистем. На основании расчета коэффициентов региональной концентрации для литогеохимических полей проведено выделение выше- и нижефоновых ассоциаций химических элементов относительно регионального литогеохимического фона, за который принято среднее содержание химических элементов в почвообразующих комплексах Северного Кавказа.

Обсуждение и
заключения:

авторами сделан вывод, что на формирование геохимических особенностей поверхностных почвообразующих комплексов отложений ландшафтов северных склонов Большого Кавказа определенное влияние оказали длительные процессы выветривания в течении орогенного этапа развития региона в позднем кайнозое. Выше- и нижефоновые ассоциации химических элементов в почвообразующих комплексах, рассчитанные относительно регионального литогеохимического фона Северного Кавказа, в какой-то мере отражают степень геохимической подвижности химических элементов, эволюционно сложившейся в литогенной основе ландшафтов Большого Кавказа. Практическая значимость полученных результатов заключается в определении базовой информации по литогенной основе ландшафтов Большого Кавказа, необходимой для обоснованного геоэкологического мониторинга.

Ключевые слова:

Большой Кавказ, литогенная основа, почвообразующие породы, литогеохимические поля, ассоциации химических элементов.

Degtyarova T.V.*,
Likhovid A.A.,
Likhovid N.G.

North-Caucasian Federal University,
Stavropol, Russia.
* dtb.70@mail.ru

GEOCHEMICAL DIFFERENTIATION OF THE LITHOGENIC BASE OF THE LANDSCAPES OF THE GREATER CAUCASUS

Introduction: the relevance of the study is due to the need to identify the role of the lithogenous basis of the landscapes of the Greater Caucasus in the formation of their geochemical features and patterns of migration and concentration of chemical elements in various landscape and geochemical conditions. The purpose of the article is to study the specific geochemical differentiation of near-surface (soil-forming) sediments of the landscapes of the Greater Caucasus.

Materials and methods: a method was used to compare the chemical composition of the main soil-forming complexes of the physico-geographical subregions of the northern slopes of the Greater Caucasus with a regional lithogeochemical background.

Results: Geochemical differentiation of soil-forming rock complexes was revealed for the physico-geographical subregions of the northern slopes of the Greater Caucasus, which are allocated in the physico-geographical zoning of the territory. Areas of distribution of individual complexes of soil-forming rocks are considered as lithogeochemical fields of regional geosystems. Based on the calculation of regional concentration coefficients for lithogeochemical fields, the above and below-background associations of chemical elements were distinguished relative to the regional lithogeochemical background, for which the average content of chemical elements in the soil-forming complexes of the North Caucasus was adopted.

Discussion and conclusion: the authors concluded that the formation of geochemical features of surface soil-forming complexes of sediments in the landscapes of the northern slopes of the Greater Caucasus was greatly influenced by long-term weathering processes during the orogenic stage of the region's development in the Late Cenozoic. The practical significance of the results obtained is to determine the basic information on the lithogenic basis of the landscapes of the Greater Caucasus, which is necessary for sound geoecological monitoring.

Key words: Greater Caucasus, lithogenic base, soil-forming rocks, lithogeochemical fields, associations of chemical elements.

For citation: Degtyareva T.V., Likhovid A.A. Geochemical differentiation of the lithogenic base of the landscapes of the Greater Caucasus // Integration of education. 2018. DOI:

Введение

Одним из наиболее значимых факторов эволюции геохимии ландшафтов Большого Кавказа является литогенный фактор. Литогенная основа ландшафтов по сравнению с прочими компонентами среды отличается относительной стабильностью, определяющей устойчивый характер

геосистем. Как отмечает Ф.Н. Мильков [1], в широком смысле под литогенной основой ландшафтов понимается весь комплекс геолого-геоморфологических особенностей территории, включающий стратиграфию и литологию горных пород, древнюю и новейшую тектонику, современные тектонические движения, рельеф поверхности. Частью литогенной основы ландшафта является сравнительно маломощный поверхностный слой горных пород, в котором осуществляется обмен веществом и энергией с поверхностью, биотой и атмосферой. Такие поверхностные слои горных пород, подвергаясь процессам гипергенеза (выветривания) и переотложения, представляют верхнюю часть коры выветривания, т.е. «...самую наружную часть земной коры, которая преобразована (или преобразуется) под непосредственным влиянием ландшафтно-геохимических условий» [2, с. 229].

Становление геохимических особенностей литогенной основы ландшафтов Большого Кавказа происходило в контексте геологической истории и воздействия процессов гипергенеза в постоянно менявшихся ландшафтно-геохимических условиях. В настоящее время для региона характерны большие различия в генезисе, литологии и геохимии коренных пород. В силу высокой степени обнаженности коренных пород и низкой мощности покровных рыхлых образований для большей части территории Большого Кавказа В.В. Дьяченко [3, 4] рассматривает коренные горные породы как почвообразующие. При этом их геохимическая специфика и дифференциация по генезису, возрасту, гранулометрическому и минеральному составам, ассоциациям химических элементов оказывала непосредственное влияние на образование четвертичных отложений и процессы почвообразования [5].

Целью исследования было изучение геохимической дифференциации почвообразующих комплексов крупных геосистем Большого Кавказа относительно регионального литогеохимического фона. Геохимические особенности отложений рассматриваются в аспекте гипергенных преобразований, происходивших в горных породах и слагающих их минералах при выходе пород на поверхность, и миграции подвижных соединений химических элементов по элементам рельефа. Как отмечает В.В. Добровольский, «выветривание (гипергенез) представляет собой единый процесс перераспределения химических элементов применительно к ландшафтно-геохимическим условиям» [2, с. 230].

Материалы и методы исследований

Геохимическая дифференциация литогенной основы изучена для физико-географических подобластей северных склонов Большого Кавказа, выделение которых проведено В.А. Шальневым в границах физико-географических областей при физико-географическом районировании Северного Кавказа [6]. На северном склоне Большого Кавказа выделены высокогорная и среднегорно-низкогорная физико-географические области. Высо-

когорная область включает Эльбрус-Казбековскую высокогорную подобласть альпийского рельефа на доюрских складчато-глыбовых структурах и Северо-Дагестанскую высокогорно-среднегорную подобласть на раннеальпийских складчато-глыбовых структурах. Среднегорно-низкогорная область также в своем составе содержит две подобласти: Кубано-Дагестанскую среднегорную на позднеальпийских складчатых и моноклинальных структурах и Кубано-Терско-Сунженскую низкогорную на новейших складчатых структурах и предгорных равнин.

Физико-географические подобласти соответствуют крупным геотектоническим и геологическим структурам изучаемого региона с определенными структурно-формационными комплексами горных пород. Области распространения комплексов почвообразующих пород рассматриваются как литогеохимические поля данных региональных геосистем, отличающиеся относительной однородностью в распределении химических элементов. Характеристика литогеохимических полей микроэлементов проводится путем сравнения уровней содержания элементов с региональными фоновыми показателями. За региональный литогеохимический фон принято среднее содержание химических элементов в почвообразующих комплексах Северного Кавказа, рассчитанное на основании данных В.В. Дьяченко [3, 4]. Вариабельность литогеохимического фона в пределах литогеохимических полей выявляется с помощью коэффициентов региональной концентрации ($K_{рк}$), представляющих отношение содержания химического элемента в почвообразующем комплексе пород к региональному литогеохимическому фону. Вышефоновые содержания (значения $K_{рк} > 1,0$) свидетельствуют об относительном обогащении химическим элементом литогеохимического поля, нижефоновые содержания ($K_{рк} < 1,0$) – об его обеднении, выносе химического элемента.

Результаты исследований и их обсуждение

В орогенный этап развития Большого Кавказа, в связи с общим формированием горного сооружения, геологические структуры физико-географических подобластей испытывали поднятие и последовательно освобождались от моря [7]. Слагающие их коренные породы выходили на поверхность и подвергались процессам выветривания разной продолжительности, характера и интенсивности в зависимости от меняющихся ландшафтно-геохимических условий. Воздействие процессов выветривания приводило к специфичным для каждого комплекса пород изменениям их минералогического и химического состава, появлению в них соединений химических элементов различной геохимической подвижности. «В процессе гипергенеза происходит своеобразная сортировка минералов исходных пород, обусловленная разрушением гипергенно неустойчивых минералов и относительной концентрацией устойчивых минералов» [2, с. 21].

В течение позднего кайнозоя создавались различные геохимические обстановки, по-разному влияющие на устойчивость минеральных соединений поверхностных комплексов пород и вовлечение в миграцию химических элементов из пород. Косвенным результатом гипергенного перераспределения химических элементов стали вышефоновые и нижефоновые ассоциации элементов в почвообразующих комплексах пород. В ходе длительного гипергенного преобразования исходных пород неустойчивые минералы разрушались и подвижные формы химических элементов постепенно выносились из толщи выветривающихся пород. В настоящее время такие химические элементы, входившие в состав неустойчивых к выветриванию минералов, отличаются нижефоновым содержанием в породах. Химические элементы с вышефоновым содержанием могут рассматриваться как элементы, находившиеся в прочносвязанных и устойчивых к длительному выветриванию первичных минералах, и, в силу этого, слабо выносившиеся из пород. К концентрированию определенных химических элементов в отложениях приводило также возникновение особых устойчивых минералов, порожденных конкретными ландшафтно-геохимическими условиями, – минеральных гипергенных новообразований [8–11]. Локальные аномальные вышефоновые концентрации химических элементов в пределах литогеохимических полей формировались и в связи с месторождениями рудных элементов и их ореолами рассеяния.

Процессы выветривания приповерхностных (почвообразующих) отложений неразрывно сопровождалась денудацией, т.е. перемещением продуктов выветривания. Латеральное перемещение химических элементов и их вторичная концентрация в приповерхностных комплексах пород во многом определялись рельефом, который воздействовал на перераспределение воды, подвижных форм химических элементов и окислительно-восстановительные условия. В этом аспекте существенна принадлежность почвообразующих комплексов к автоморфным и гидроморфным семействам кор выветривания, их остаточным и переотложенным формам [8, 12–16].

Рассмотрим геохимическую дифференциацию почвообразующих комплексов пород физико-географических подобластей северных склонов Большого Кавказа и ассоциации химических элементов с выше- и нижефоновыми значениями относительно регионального литогеохимического фона.

Эльбрус-Казбековская высокогорная физико-географическая подобласть северного склона Большого Кавказа включает современные высокогорные ландшафты, образованные на метаморфических и магматических породах. Преобладание в рельефе высоких эрозионно-тектонических гор позволяет рассматривать поверхностные слои горных пород высокогорной подобласти как элементы автоморфной коры выветривания остаточной и переотложенной форм. В пределах морфоструктурных комплексов Главного Кавказского и Бокового хребтов выделяются региональные

литогеохимические поля протерозойских кристаллических сланцев и гнейсов и палеозойских гранитоидов. В пределах Передового хребта развиты литогеохимические поля палеозойских вулканогенно-терригенных и терригенных отложений, а также протерозойских метаморфических образований. В поверхностных отложениях формируются геохимические ореолы и потоки рассеяния Cu, Zn, S, Au, Ag и Co, связанные с их месторождениями. Определение коэффициентов региональной концентрации (Крк) относительно среднего содержания элементов в почвообразующих комплексах Северного Кавказа позволяет выявить ассоциации химических элементов с выше- и нижефоновыми значениями (табл. 1).

В протерозойских кристаллических сланцах и гнейсах преобладает тенденция превышения содержания большинства химических элементов над региональным литогеохимическим фоном, о чем свидетельствует среднее значение коэффициента региональной концентрации для 25 химических элементов, равное 1,24. Нижефоновое содержание имеют такие химические элементы, как Ba, Mn, Pb и Sr.

В палеозойских гранитоидах характерным является почти одинаковое количество химических элементов с выше- и нижефоновыми концентрациями относительно регионального фона. Среднее значение коэффициента региональной концентрации по 25 химическим элементам составляет 1,02.

Для вулканогенно-терригенных отложений палеозоя типично повышенное содержание химических элементов группы железа в связи с наличием в составе основных пород [3]. Относительно литогеохимического фона Северного Кавказа микроэлементный состав данного комплекса отложений характеризуется преобладанием вышефоновых содержаний химических элементов. Среднее значение коэффициента региональной концентрации для 25 химических элементов составляет 1,17. Интенсивнее накапливаются такие химические элементы, как Ag, Nb, Cu, W, Co, Yb, Y, Sc, Cr, Ni и V. В дефиците к региональному фону находятся Pb, Mn, Zn, Ba, Be и Sr.

Почвообразующий комплекс терригенных отложений верхнего палеозоя образован пестрыми кварцевыми песчаниками, алевролитами, глинистыми сланцами [17]. В микроэлементном составе отложений преобладают ассоциации химических элементов, накапливающихся относительно регионального литогеохимического фона, о чем свидетельствует среднее значение коэффициента региональной концентрации по 25 химическим элементам – 1,14. В дефиците по отношению к региональному фону Zn, Ba, Mn, Be и Sr.

Литогеохимическое поле терригенно-карбонатных отложений триаса располагается в районе северо-западного погружения Передового хребта в верхнем течении рек Лабы и Белой. Геохимическими особенностями данных отложений, как отмечает В.В. Дьяченко [3], является превышение ими кларков карбонатных пород по большинству химических элементов, что обусловлено существенной примесью терригенного материала (в основном глины и

Таблица 1.

АССОЦИАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ОТНОСИТЕЛЬНО РЕГИОНАЛЬНОГО ЛИТОГЕОХИМИЧЕСКОГО ФОНА В ОСНОВНЫХ ПОЧВООБРАЗУЮЩИХ КОМПЛЕКСАХ ВЫСОКОГОРНОЙ ПОДОБЛАСТИ

Table 1. Associations of chemical elements relative to the regional lithogeochemical background in the main soil-forming complexes of the high-mountainous subregion

Почво-образующие комплексы / Soil-forming complexes	С вышефоновым содержанием (Крк > 1,0) / With above-mentioned content (Крк > 1,0)	С нижефоновым содержанием (Крк < 1,0) / With below-background content (Крк > 1,0)
Протерозойские кристаллические сланцы и гнейсы / Proterozoic crystalline schists and gneisses	Mo _{1,92>} Y _{1,61>} Yb _{1,55>} W _{1,54>} Cu _{1,50>} V _{1,43>} Ni _{1,42>} Sn _{1,41>} Zr _{1,39>} Ga _{1,38>} Co _{1,34>} Cr _{1,24>} Ag _{1,21>} Li _{1,18>} Ti _{1,18>} Nb _{1,10>} Zn _{1,09>} Sc _{1,09>} Ge _{1,09>} P _{1,08>} Be _{1,02}	Ba _{0,93>} Mn _{0,87>} Pb _{0,83>} Sr _{0,49}
Палеозойские гранитоиды / Paleozoic granitoids	Ga _{1,54>} Sn _{1,51>} Be _{1,36>} P _{1,34>} Pb _{1,28>} Nb _{1,27>} Ag _{1,14>} Yb _{1,12>} Ge _{1,09>} Ti _{1,08>} Y _{1,08>} Ba _{1,06} Mo _{1,00}	V _{0,97>} Li _{0,96>} Sc _{0,95>} W _{0,94>} Cr _{0,93>} Zn _{0,90>} Cu _{0,87>} Zr _{0,79>} Co _{0,72>} Mn _{0,57>} Sr _{0,54>} Ni _{0,53}
Терригенно-вулканогенные палеозоя / Terrigenous-volcanogenic Paleozoic	Ag _{1,67>} Nb _{1,61>} Cu _{1,58>} W _{1,43>} Co _{1,43>} Yb _{1,43>} Y _{1,39>} Sc _{1,38>} Cr _{1,32>} Ni _{1,31>} V _{1,28>} Mo _{1,16>} Li _{1,14>} Zr _{1,13>} Ga _{1,13>} Ge _{1,09>} P _{1,04>} Sn _{1,03>} Ti _{1,02}	Pb _{0,95>} Mn _{0,91>} Zn _{0,90>} Ba _{0,85>} Be _{0,76>} Sr _{0,47}
Терригенные палеозоя / Terrigenous Paleozoic	Cr _{1,63>} Ni _{1,59>} Nb _{1,49>} Mo _{1,28>} Y _{1,28>} Zr _{1,27>} V _{1,27>} Cu _{1,24>} Ga _{1,20>} Sc _{1,20>} Li _{1,17>} W _{1,16>} Sn _{1,15>} Co _{1,15>} Ge _{1,09>} P _{1,08>} Yb _{1,05>} Ti _{1,05>} Pb _{1,05>} Ag _{1,04}	Zn _{0,91>} Ba _{0,91>} Mn _{0,89>} Be _{0,83>} Sr _{0,51}
Терригенно-карбонатные триаса / Terrigenous-carbonate Triassic	Sr _{2,88>} Ba _{1,41>} Mn _{1,38>} Ni _{1,05}	Ag _{0,98>} W _{0,88>} Sn _{0,84>} Li _{0,81>} Sc _{0,78>} Zn _{0,77>} Ti _{0,75>} Ge _{0,75>} Co _{0,67>} Pb _{0,67>} Cu _{0,66>} Y _{0,59>} Ga _{0,56>} Yb _{0,56>} P _{0,56>} Zr _{0,50>} Cr _{0,50>} Nb _{0,45>} Be _{0,42>} V _{0,34>} Mo _{0,32}

алевритов), характеризующегося более высокими кларками. Отличительной особенностью микроэлементного состава терригенно-карбонатных отложений триаса являются нижефоновые концентрации подавляющего большинства химических элементов. Это показывается средним значением коэффициента региональной концентрации, который меньше 1,0 и составляет 0,80. Тенденция накопления относительно регионального литогеохимического фона в терригенно-карбонатных отложениях триаса характерна только для четырех химических элементов: Sr, Ba, Mn и Ni.

Североюрско-Дагестанская высокогорно-среднегорная физико-географическая подобласть объединяет структурные элементы ниже- и среднеюрских отложений, образовавшихся в ранние стадии альпийского (киммерийского) цикла геологического развития Кавказа. Выделяются региональные литогеохимические поля терригенно-вулканогенных и терригенных комплексов юрских отложений.

Метаморфизованные терригенно-вулканогенные отложения юры приурочены к Гойтскому антиклинорию в Западном Кавказе и антиклинориям Главного и Бокового хребтов Дагестана. Выраженный рельеф высоко- и средневысотных структурно-денудационных гор позволяет рассматривать почвообразующий комплекс данных пород как верхние слои автоморфной остаточной коры выветривания. В микроэлементном составе терригенно-вулканогенных отложений юры преобладают вышефоновые содержания химических элементов (табл. 2). Почвообразующий комплекс терригенных юрских отложений приурочен к Северо-Юрской депрессии. Ниже- и среднеюрские терригенные отложения представлены различными песчаниками, алевролитами, аргиллитами, песчано-глинистыми аспидными сланцами. Геоморфологические условия их распространения позволяют рассматривать поверхностные слои пород в качестве переотложенной коры выветривания, в долинах рек – гидроморфной переотложенной. В составе отложений преобладает ассоциация химических элементов с вышефоновым содержанием относительно литогеохимического фона. Тенденция сильного накопления характерна для Zn, Nb, V, Pb, Co, Cr, Ni, Ti, Ga, P, Yb и Ge. Среднее значение коэффициента региональной концентрации для 25 химических элементов составляет 1,17. Ассоциацию микроэлементов с содержаниями, ниже регионального литогеохимического фона, составляют Be, Ag, Ba, Mn, Mo и Sr.

Кубано-Дагестанская физико-географическая подобласть среднегорий включает моноклиналильные и сложноскладчатые структуры верхнеюрских и меловых отложений Большого склона Большого Кавказа и северо-западной его части. Почвообразующий комплекс терригенно-карбонатных отложений юры-мела и мела-палеогена приурочен к куэстовым хребтам и может рассматриваться в качестве элемента автоморфной остаточной коры выветривания. Почвообразующий комплекс терригенных меловых отложений занимает межкуэстовую депрессию между Скалистым и Пастбищным хребтом и представляет собой верхние слои переотложенной коры выветривания, в долинах рек – гидроморфной переотложенной.

Терригенно-карбонатные отложения верхней юры и мела относятся к морфоструктурному комплексу Скалистого хребта. Определение коэффициентов региональной концентрации химических элементов в терригенно-карбонатных отложениях юры и мела показывает их значительное обеднение по сравнению с региональным литогеохимическим фоном (табл. 3).

Таблица 2.

АССОЦИАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ОТНОСИТЕЛЬНО РЕГИОНАЛЬНОГО ЛИТОГЕОХИМИЧЕСКОГО ФОНА В ОСНОВНЫХ ПОЧВООБРАЗУЮЩИХ КОМПЛЕКСАХ ВЫСОКОГОРНО-СРЕДНЕГОРНОЙ ПОДОБЛАСТИ

Table 2. Association of chemical elements in relation to the regional lithogeochemical background in the main soil-forming complexes of the high-middle-mountainous subregion

Почво-образующие комплексы / Soil-forming complexes	С вышефоновым содержанием (Крк > 1,0) / With above-mentioned content (Kpk > 1,0)	С нижефоновым содержанием (Крк < 1,0) / With below-background content (Kpk < 1,0)
Терригенно-вулканогенные юры / Terrigenous-volcanogenic Jurassic	Zn _{1,38>} Ti _{1,37>} V _{1,34>} P _{1,34>} Ga _{1,31>} Nb _{1,31>} Ge _{1,29>} Ni _{1,28>} Co _{1,23>} Yb _{1,18>} Sn _{1,17>} Cr _{1,16>} Pb _{1,15>} Be _{1,13>} W _{1,10>} Li _{1,05>} Y _{1,04}	Mn _{0,98>} Sc _{0,95>} Zr _{0,92>} Cu _{0,89>} Ag _{0,88>} Ba _{0,87>} Mo _{0,80>} Sr _{0,61}
Терригенные юры / Terrigenous Jurassic	Zn _{1,67>} Nb _{1,37>} V _{1,35>} Pb _{1,34>} Co _{1,34>} Cr _{1,30>} Ni _{1,29>} Ti _{1,26>} Ga _{1,26>} P _{1,25>} Yb _{1,24>} Ge _{1,23>} Sc _{1,16>} W _{1,16>} Zr _{1,15>} Sn _{1,15>} Li _{1,14>} Y _{1,13>} Cu _{1,12}	Be _{0,98>} Ag _{0,96>} Ba _{0,95>} Mn _{0,94>} Mo _{0,92>} Sr _{0,59}

Таблица 3.

АССОЦИАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ОТНОСИТЕЛЬНО РЕГИОНАЛЬНОГО ЛИТОГЕОХИМИЧЕСКОГО ФОНА В ОСНОВНЫХ ПОЧВООБРАЗУЮЩИХ КОМПЛЕКСАХ СРЕДНЕГОРНОЙ ПОДОБЛАСТИ

Table 3. Association of chemical elements in relation to the regional lithogeochemical background in the main soil-forming complexes of the mid-range subregion

Почво-образующие комплексы / Soil-forming complexes	С вышефоновым содержанием (Крк > 1,0) / With above-mentioned content (Kpk > 1,0)	С нижефоновым содержанием (Крк < 1,0) / With below-background content (Kpk < 1,0)
Терригенно-карбонатные юры и мела / Terrigenous-carbonate jura and mel	–	Mn _{0,98>} Be _{0,95>} Sr _{0,93>} Y _{0,86>} Zr _{0,77>} Ba _{0,74>} Sc _{0,69>} Pb _{0,67>} Ag _{0,65>} Mo _{0,64>} Yb _{0,62>} Li _{0,61>} W _{0,61>} Ti _{0,57>} Nb _{0,55>} Ge _{0,54>} P _{0,54>} Sn _{0,48>} Ni _{0,45>} Co _{0,44>} Cu _{0,43>} Zn _{0,40>} V _{0,37>} Ga _{0,32>} Cr _{0,29}
Терригенно-карбонатные мела и палеогена / Terrigenous-carbonate mel and Paleogene	Sr _{1,69>} Mn _{1,32>} Be _{1,02}	Ba _{0,93>} Y _{0,92>} Zr _{0,85>} Ag _{0,77>} Sc _{0,73>} Mo _{0,72>} W _{0,72>} Ti _{0,70>} Cu _{0,69>} Li _{0,65>} Pb _{0,63>} P _{0,63>} Yb _{0,62>} Ge ₀ Cr _{0,61>} V _{0,59>} Sn _{0,57>} Co _{0,56>} Nb _{0,53>} Zn _{0,48>} Ni _{0,45>} Ga _{0,39}
Терригенные мела / Terrigenous mel	Zr _{1,55>} Co _{1,35>} Zn _{1,30>} Y _{1,30>} Nb _{1,30>} Ti _{1,29>} Cr _{1,17>} W _{1,17>} Sr _{0,83>} Mo _{0,80} V _{1,29>} Ga _{1,28>} Yb _{1,28>} Li _{1,24>} Ni _{1,19>} Sc _{1,19>} Cu _{1,16>} Be _{1,13>} P _{1,13>} Ba _{1,11>} Ag _{1,11>} Ge _{1,09>} Sn _{1,08>} Mn _{1,06>} Pb _{1,01}	

Литогеохимическое поле терригенно-карбонатных отложений мела и палеогена располагается в пределах Пастбищного, Дарьинского, Боргустанского и Джинальского хребтов. По сравнению с региональным литогеохимическим фоном почвообразующих пород Северного Кавказа в терригенно-карбонатных отложениях мела и палеогена происходит обеднение большинс-

твом химических элементов. Среднее значение коэффициента региональной концентрации для 25 химических элементов составляет 0,74. Вышефоновые уровни характерны для трех элементов (Sr, Mn и Be), а нижефоновые - у всех остальных химических элементов.

В терригенных меловых отложениях большинство микроэлементов имеют превышение содержаний над региональным литогеохимическим фоном. Среднее значение коэффициента региональной концентрации для 25 химических элементов составляет 1,16. Ряд сильного накопления ($K_{рк} > 1,2$) образуют Zr, Co, Zn, Y, Nb, Ti, Cr, V, Ga и Yb.

Черноморско-Терско-Сунженская физико-географическая подобласть низкогорий и предгорных равнин характеризуется развитием литогеохимических полей, связанных с палеогеновыми и неогеновыми отложениями. Почвообразующие комплексы терригенных отложений палеогена и неогена приурочены к межуэстовой депрессии между Лесистым и Пастбищным хребтами и по условиям залегания в рельефе являются верхними слоями переотложенной коры выветривания, в долинах рек – гидроморфной переотложенной. Относительно регионального фона почвообразующих пород Северного Кавказа в данных отложениях преобладает обогащение химическими элементами (табл.4). Среднее значение коэффициента региональной концентрации по 25 химическим элементам составляет 1,17.

Литогеохимическое поле терригенно-карбонатных неогеновых отложений приурочено к низкогорьям, включающим останцы неогеновой куэсты и систему низких горных гряд Лесистого хребта. По геоморфологическим особенностям залегания поверхностные отложения относятся к верхним слоям автоморфной остаточной коры выветривания. Микроэлементный состав отложений отличается преобладанием ассоциации химических элементов с нижефоновыми содержаниями. Среднее значение коэффициента региональной концентрации для 25 химических элементов составляет 0,78.

Предгорные наклонные аллювиальные равнины Черноморско-Терско-Сунженской физико-географической подобласти сложены аллювиальными и флювиогляциальными отложениями, прикрытыми сверху лёссовидными суглинками. К более высоким эрозионно-аккумулятивным террасам предгорных наклонных равнин, имеющих верхнеплиоценовый возраст, приурочено литогеохимическое поле терригенных отложений неогена. В микроэлементном составе отложений преобладает ассоциация химических элементов, имеющих концентрации выше регионального фона с незначительным обогащением. Это показывает и среднее значение коэффициента региональной концентрации для 25 химических элементов, равное 1,06.

К более низким аккумулятивным террасовым уровням наклонных равнин, являющихся по возрасту четвертичными, приурочено литогеохимическое поле аллювиальных четвертичных отложений. Относительно регио-

Таблица 4. АССОЦИАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ОТНОСИТЕЛЬНО РЕГИОНАЛЬНОГО ЛИТОГЕОХИМИЧЕСКОГО ФОНА В ОСНОВНЫХ ПОЧВООБРАЗУЮЩИХ КОМПЛЕКСАХ ПОДОБЛАСТИ НИЗКОГОРИЙ И ПРЕДГОРНЫХ РАВНИН
Table 4. Associations of chemical elements in relation to the regional lithogeochemical background in the main soil-forming complexes of the subregion of lowlands and foothill plains

Почво-образующие комплексы / Soil-forming complexes	С вышефоновым содержанием (Крк > 1,0) / With above-mentioned content (Крк > 1,0)	С нижефоновым содержанием (Крк < 1,0) / With below-background content (Крк < 1,0)
Терригенные палеогена и неогена / Terrigenous Paleogene and Neogene	Mo _{1,84>} Zn _{1,53>} V _{1,44>} Cr _{1,32>} Ge _{1,29>} Pb _{1,27>} Ga _{1,23>} Cu _{1,23>} Nb _{1,21>} Sn _{1,20>} Co _{1,18>} Ni _{1,18>} Li _{1,17>} P _{1,17>} Ti _{1,17>} Zr _{1,14>} Yb _{1,12>} Ba _{1,10>} Sc _{1,08>} Be _{1,06>} W _{1,05>} Ag _{1,04>}	Y _{0,93>} Sr _{0,81>} Mn _{0,58>}
Терригенно-карбонатные неогена / Terrigenous-carbonate Neogene	Sr _{1,10>} Ba _{1,00>}	Mn _{0,97>} Be _{0,95>} Y _{0,88>} W _{0,88>} Mo _{0,88>} Zr _{0,88>} Co _{0,87>} Pb _{0,82>} Nb _{0,79>} Ti _{0,79>} Sc _{0,78>} Li _{0,77>} Ge _{0,75>} Ag _{0,74>} Yb _{0,74>} P _{0,73>} Zn _{0,69>} Ga _{0,63>} Cu _{0,62>} Cr _{0,61>} Ni _{0,61>} Sn _{0,57>} V _{0,55>}
Терригенные неогена / Terrigenous Neogene	Mn _{1,36>} Zn _{1,18>} Cr _{1,16>} Ba _{1,15>} Pb _{1,14>} Cu _{1,14>} Be _{1,13>} V _{1,13>} Yb _{1,12>} Ni _{1,11>} Ge _{1,09>} Y _{1,06>} Ti _{1,06>} Sc _{1,06>} Nb _{1,04>} Sn _{1,03>} Li _{1,02>} Zr _{1,02>} Ga _{1,00>}	W _{0,99>} Ag _{0,94>} Sr _{0,94>} P _{0,92>} Co _{0,92>} Mo _{0,80>}
Аллювиальные / Alluvial	Sc _{1,93>} Zn _{1,71>} Mn _{1,55>} Ba _{1,54>} Co _{1,49>} Ni _{1,46>} Cr _{1,43>} Pb _{1,43>} V _{1,42>} Cu _{1,39>} W _{1,38>} Ge _{1,36>} Ti _{1,36>} Sr _{1,26>} P _{1,25>} Li _{1,25>} Ag _{1,19>} Yb _{1,18>} Zr _{1,17>} Ga _{1,10>} Y _{1,09>} Sn _{1,05>} Be _{1,02>}	Mo _{0,92>} Nb _{0,75>}

нального литогеохимического фона Северного Кавказа аллювиальные четвертичные отложения являются самыми обогащенными. Среднее значение коэффициента региональной концентрации для 25 химических элементов наибольшее среди всех почвообразующих комплексов – 1,31. Как отмечает В.В. Добровольский [5], аллювиальные отложения относятся к переотложенной коре выветривания, имеют транзитный характер формирования, испытали длительное перемещение и разбавлены компонентами невыветренных пород. Их геохимические особенности для Большого Кавказа обуславливаются поступающим из высокогорных и среднегорных областей обломочным материалом устойчивых к выветриванию магматических и метаморфических пород. Сравнительно небольшая длительность гипергенного преобразования аллювиальных отложений в связи с их относительной молодостью формирования, их переотложенный характер также обуславливает наличие в их составе устойчивых компонентов и высокие концентрации многих химических элементов. Для данных отложений характерно значительное превышение литогеохимического фона у большой группы химических элементов. Ниже регионального фона находится содержание только двух химических элементов – Мо и Nb.

Выводы

Для современных физико-географических подобластей Большого Кавказа разных высотных уровней ландшафтной дифференциации (высокогорной, высокогорно-среднегорной, среднегорной и низкогорной с предгорными равнинами) характерны свои литогеохимические поля поверхностных почвообразующих отложений разного генезиса, времени формирования, литологии. Геохимическая специфика почвообразующих комплексов во многом обусловлена сложным характером процессов гипергенного преобразования пород, перераспределения продуктов выветривания в многообразных ландшафтно-геохимических условиях, менявшихся в ходе эволюционно развития ландшафтов Северного Кавказа.

В литогеохимических полях почвообразующих отложений Эльбрус-Казбековской высокогорной и Североюрско-Дагестанской высокогорно-среднегорной физико-географических подобластей преобладают химические элементы, концентрации которых превышают региональный литогеохимический фон. Вышефоновые ассоциации химических элементов характерны для поверхностных отложений автоморфной остаточной коры выветривания и терригенных отложений переотложенной коры выветривания. Несмотря на то, что эти литогеохимические поля наиболее длительное время подвергались интенсивным процессам выветривания и выноса материала в орогенный этап развития ландшафтов Большого Кавказа, их геохимические особенности в значительной степени определяются большой долей устойчивых к выветриванию минералов магматических и метаморфических пород. В имеющих другой генезис терригенно-карбонатных отложениях триаса преобладают нижефоновые ассоциации химических элементов.

В геохимической дифференциации литогенной основы Кубано-Дагестанской среднегорной и Черноморско-Терско-Сунженской низкогорной с предгорными равнинами физико-географических подобластей прослеживается определенная связь с элементами рельефа. Для литогеохимических полей положительных форм рельефа (куэстовых хребтов) с поверхностными терригенно-карбонатными отложениями автоморфной остаточной коры выветривания характерно преобладание нижефоновых ассоциаций химических элементов. Межкуэстовым депрессиям и наклонным равнинам, занятым и сформированным продуктами переотложенной коры выветривания, соответствуют обогащенные относительно регионального фона литогеохимические поля терригенных и аллювиальных отложений с преобладанием вышефоновых ассоциаций химических элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мильков Ф.Н. Физическая география: учение о ландшафте и географическая зональность. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1986. 328 с. URL: <http://www.geoversum.by/catalog/item5746>. (дата обращения 29.07.2018).
2. Добровольский В.В. Гипергенез и коры выветривания / Избранные труды. Т. 1. М.: Научный мир. 2007. 512 с. URL: <http://www.pochva.com>. (дата обращения 27.07.2018).
3. Дьяченко В.В. Геохимия, систематика и оценка состояния ландшафтов Северного Кавказа. Ростов-на-Дону: Комплекс. 2004. 268 с. URL: <https://elibrary.ru> (дата обращения 15.02.2018).
4. Дьяченко В.В., Матасова И.Ю. Региональные кларки химических элементов в почвах европейской части юга России // Почвоведение. 2016. № 10. С.1159-1166. DOI: 10.7868/S0032180X16100063.
5. Дегтярева Т.В., Шальнев В.А., Лысенко А.В. Геохимические поля горных пород и почв Большого Кавказа: эволюционный подход и методы исследования // Устойчивое развитие горных территорий. 2017. Т. 9. №3 (33). С. 219-232. DOI: 10.21177/1998-4502-2017-9-3-219-232.
6. Шальнев В.А. Эволюция ландшафтов Северного Кавказа. Ставрополь: СГУ. 2007. 309 с. URL: <https://elibrary.ru> (дата обращения 27.05.2018).
7. Сафронов И.Н. Геоморфология Северного Кавказа. Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского университета, 1969. 217 с. URL: <http://www.pochva.com>. (дата обращения 01.08.2018).
8. Ковда В.А. Основы учения о почвах. Общая теория почвообразовательного процесса. Книга вторая. М.: Наука. 1973. 467 с. URL: <http://www.pochva.com>. (дата обращения 07.07.2018).
9. Полынов Б.Б. Кора выветривания. Часть 1. Процессы выветривания. Основные фазы и формы выветривания и их распределение. Л.: Изд-во АН СССР, 1934. 242 с. URL: <http://www.pochva.com>. (дата обращения 05.07.2018).
10. Makhinova, A. F., Makhinov, A. N., Kuptsova, V. A., Yermoshin, V. V. Geochemical differentiation of soils in the amur basin (russian part). Journal of Geochemical Exploration, 2013. 132, 140-148. DOI:10.1016/j.gexplo.2013.06.011
11. Nesse, William D. Introduction to Mineralogy. New York: Oxford University Press, 2 edition. 2012. 496 p.
12. Scarciglia, F., Critelli, S., Borrelli, L., Coniglio, S., Muto, F., & Perri, F. (2016). Weathering profiles in granitoid rocks of the sila massif uplands, calabria, southern italy: New insights into their formation processes and rates. Sedimentary Geology, 336, 46-67. DOI:10.1016/j.sedgeo.2016.01.015.
13. Measurement, collaborative learning and research for sustainable use of ecosystem services: landscape concepts and europe as laboratory / P. Angelstam, M. Grodzynski, K. Andersson et al. // Ambio. 2013. Vol. 42, no. 2. P. 129–145.

14. FAO (2015.): Mapping the vulnerability of mountain peoples to food insecurity. Rome.
15. Reimann, C., Fabian, K., Birke, M., Filzmoser, P., Demetriades, A., Négrel, P., de Caritat, P. (2017). GEMAS: Establishing geochemical background and threshold for 53 chemical elements in european agricultural soil. *Applied Geochemistry*, DOI:10.1016/j.apgeochem.2017.01.021
16. Roudposhti, G. M., Karbassi, A., & Baghvand, A. (2016). A pollution index for agricultural soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(10), 1411-1424. DOI: 10.1080/03650340.2016.1154542.
17. Черкасов М.И. Инженерно-геологическое районирование Северного Кавказа. Изд-во РГУ. 1985. URL: <http://www.pochva.com>. (дата обращения 22.07.2018).

References

1. Milkov F.N. Physical geography: the study of the landscape and geographical zoning. Voronezh: Izd. VGU, 1986. 328 p. URL: <http://www.geoversum.by/catalog/item5746>. (accessed 29.07.2018).
2. Dobrovolsky V.V. Hypergenesis and weathering crust / Selected works. T.1. M.: The scientific world. 2007. 512 pp. URL: <http://www.pochva.com>. (accessed 27.07.2018).
3. Dyachenko V.V. Geochemistry and assessment of landscapes of the North Caucasus: dis. d-ra. geogr. nauk. Novorossiisk. 2004. 36 p. URL: <https://elibrary.ru> (accessed 15.02.2018).
4. Dyachenko V.V., Matasova I.Y. Regional'nye klarki himicheskikh elementov v pochvah evropeiskoi chasti yuga Rossii // *Pochvovedenie*. 2016. № 10. C.1159-1166. DOI: 10.7868/S0032180X16100063.
5. Degtyareva TV, Shalnev VA, Lysenko A.V. Geochemical fields of rocks and soils of the Greater Caucasus: an evolutionary approach and methods of research // *Sustainable development of mountain territories* - 2017. T. 9. № 3 (33). Pp. 219-232. DOI: 10.21177/1998-4502-2017-9-3-219-232.
6. Shalnev V.A. The evolution of the landscapes of the North Caucasus. Stavropol: SGU. 2007. URL: <https://elibrary.ru> (accessed 27.05.2018).
7. Safronov I.N. Geomorphology of the North Caucasus. Rostov-on-Don: Publishing House of Rostov University, 1969. 217 p. URL: <http://www.pochva.com>. (accessed 01.08.2018).
8. Kovda V.A. Fundamentals of the doctrine of soils. General theory of the soil-forming process. The second book. M.: Science. 1973. 467 p. URL: <http://www.pochva.com>. (accessed 07.07.2018).
9. Polynov B.B. Weathering crust. Part 1. Processes of weathering. The main phases and forms of weathering and their distribution. L.: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1934. 242 p. URL: <http://www.pochva.com>. (accessed 07.07.2018).
10. Makhinova, A. F., Makhinov, A. N., Kuptsova, V. A., Yermoshin, V. V. Geochemical differentiation of soils in the amur basin (russian

- part). *Journal of Geochemical Exploration*, 2013. 132, 140-148. DOI:10.1016/j.gexplo.2013.06.011
11. Nesse, William D. *Introduction to Mineralogy*. New York: Oxford University Press, 2 edition. 2012. 496 p.
 12. Scarciglia, F., Critelli, S., Borrelli, L., Coniglio, S., Muto, F., & Perri, F. (2016). Weathering profiles in granitoid rocks of the sila massif uplands, calabria, southern italy: New insights into their formation processes and rates. *Sedimentary Geology*, 336, 46-67. DOI:10.1016/j.sedgeo.2016.01.015
 13. Measurement, collaborative learning and research for sustainable use of ecosystem services: landscape concepts and europe as laboratory / P. Angelstam, M. Grodzynski, K. Andersson et al. // *Ambio*. 2013. Vol. 42, no. 2. — P. 129–145.
 14. FAO (2015.): *Mapping the vulnerability of mountain peoples to food insecurity*. Rome.
 15. Reimann, C., Fabian, K., Birke, M., Filzmoser, P., Demetriades, A., Négrel, P., de Caritat, P. (2017). GEMAS: Establishing geochemical background and threshold for 53 chemical elements in european agricultural soil. *Applied Geochemistry*, DOI:10.1016/j.apgeochem.2017.01.021
 16. Roudposhti, G. M., Karbassi, A., & Baghvand, A. (2016). A pollution index for agricultural soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(10), 1411-1424. DOI: 10.1080/03650340.2016.1154542.
 17. Cherkasov M.I. *Engineering-geological zoning of the North Caucasus*. RSU Publishing House. 1985. <http://www.pochva.com>. (accessed 22.07.2018).

**Рукопись поступила в редакцию: 12.07.2018,
принята к публикации 26.08.2018**

Об авторах

Дегтярева Татьяна Васильевна, кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии и кадастров ИМЕН СКФУ (Российская Федерация, 355009, СКФО, Ставропольский край, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1), Scopus ID: 57196119839, Researcher ID: dtb.70@mail.ru, телефон: 89197318498.

Лиховид Андрей Александрович, доктор географических наук, кандидат биологических наук, профессор СКФУ, профессор кафедры экологии и природопользования ИМЕН СКФУ (Российская Федерация, 355009, СКФО, Ставропольский край, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1), Scopus ID: 57200209407, Researcher ID: alikhovid@ncfu.ru, телефон: (8652) 95-64-87.

Лиховид Наталья Геннадьевна, доктор биологических наук, профессор кафедры общей биологии и биоразнообразия СКФУ (Российская Федерация, 355009, СКФО, Ставропольский край, г. Ставрополь, ул. Пушкина, д. 3), Scopus ID:..., Researcher ID: alikhovid@ncfu.ru, телефон: (8652) 33-08-55.

About the authors

Degtyareva Tatyana Vasilyevna, candidate of geographical sciences, associate Professor of the Department of physical geography and cadastre SKFU. Phone: 89197318498. E-mail: dtb.70@mail.ru

Likhovid Andrey Aleksandrovich, Professor of the Department of Ecology and Nature Management of the Institute of Mathematics and Natural Sciences, Doctor of Geographical Sciences, Candidate of Biological Sciences, Professor of SKFU. Phone: (8652) 95-64-87; E-mail: alikhovid@ncfu.ru

Likhovid Natalya Gennadievna, Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of General Biology and Biodiversity of SKFU (Russia, 355009, SKFO, Stavropol Territory, Stavropol, Pushkin St., 3), Scopus ID:..., Researcher ID :, alikhovid@ncfu.ru, phone: (8652) 33-08-55.

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ
И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

Зуев Р.В.*,
Сигида С.И.

УДК 595.6

Северо-Кавказский федеральный университет.

г. Ставрополь, Россия

* romus00@yandex.ru

**БИОТОПИЧЕСКАЯ ПРИУРОЧЕННОСТЬ
CHILORODA И DIPLOPODA ФАУНЫ
ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ**

Аннотация:

Центральное Предкавказье с XIX в. испытывает значительные антропогенные нагрузки. Так, в настоящее время, около 90% территории Ставропольского края используются под сельскохозяйственные нужды, что оказывает значительное влияние на обитателей почвы. Важным компонентом почвенной фауны являются представители классов Diplopoda и Chilopoda. В данной работе приводится анализ приуроченности этих членистоногих к естественным и антропогенным биотопам, чтобы оценить влияние человеческой деятельности на представителей этих групп. Материалом для настоящей работы послужили сборы 2004–2017 гг. в естественных и антропогенных биоценозах Центрального Предкавказья. Экземпляры собирались методами ручного сбора и почвенных раскопок. Всего было собрано и обработано более 3 тыс. Diplopoda и Chilopoda. Всего на исследуемой территории выявлено 55 видов. Наибольшее видовое разнообразие отмечено в естественных байрачных и пойменных лесах (45 видов). Менее богата фауна степей (25). При этом в различных степных биотопах наблюдается снижение видового разнообразия при уменьшении влажности (до 5 видов в полынных степях). Исследуемая территория претерпела значительную антропогенную трансформацию. На полях выявлено лишь 6 видов многоножек. Полезащитные лесополосы – наиболее богатый видами антропогенный биоценоз. Они послужили рефугиумом для естественной степной фауны и «коридорами» для распространения некоторых лесных видов. В садах обитает 9 видов Chilopoda и 4 – Diplopoda. Для садов и урбоценозов характерно наличие антропохорных видов.

Наибольшее разнообразие Diplopoda и Chilopoda (82% видов) наблюдается в лесных биотопах, которые занимают около 1,5% площади исследуемой территории.

Обеднение видового состава многоножек в степях связано, в первую очередь, с уменьшением влажности почвы. Данная тенденция наблюдается и среди степей различных типов: 25 видов в разнотравно-злаковых, 12 видов – в типчаково ковыльных и 5 – в полынных степях. При этом в последних диплоподы полностью отсутствуют. Scolopendra cingulata является единственным видом, приуроченным только к степным биотопам. Антропогенная трансформация естественных биотопов отрицательно сказывается на разнообразии многоножек. Наибольший ущерб наносит распашка земель: на полях встречается только 2 вида диплопод и 4 – хилопод, в плодовых садах обнаружено 13 видов многоножек, в урбоценозах – 20.

Создание полезащитных лесополос сыграло некоторую положительную роль. Они способствуют сохранению элементов естественной фауны Центрального Предкавказья.

Ключевые слова:

Chilopoda, Diplopoda, антропогенная трансформация, Предкавказье, экология.

Zuev R.V.
Sigida S.I.

North-Caucasian Federal University,
Stavropol, Russia

HABITAT PREFERENCE OF CHILOPODA AND DIPLOPODA OF THE FAUNA OF THE CENTRAL CISCAUCASIA

Abstract:

Central Ciscaucasia is experiencing significant anthropogenic loads from the XIX century. About 90% of the territory of the Stavropol Territory is used for agricultural needs, which has a significant impact on the inhabitants of the soil. An important component of the soil fauna are representatives by the Diplopoda and Chilopoda. In the given work the analysis of habitat preference of these arthropods to native and anthropogenic biotopes is analyzed to assess the impact of human activity on members of these groups.

The material for the present work was collected from 2004-2017 in the native and anthropogenic biocenoses of the Central Ciscaucasia. Specimens were taken either by hand or using soil sampling. In total, more than 3 thousand Diplopoda and Chilopoda were collected and processed.

A total of 55 species were identified in the study area. The largest species diversity in the natural gully and floodplain forests (45 species). The fauna of the steppes is less rich (25). In this case, a decrease in species diversity is observed in various steppe biotopes with a decrease in humidity (up to 5 species in sagebrush steppes). The study area has undergone a significant anthropogenic transformation. Only 6 species of millipedes were found on the field. Field-protecting forest belts are the richest species between anthropogenic biocenosis. They served as a refugium for the natural steppe fauna and "corridors" for spreading of some forest species. In the gardens there are 9 species of Chilopoda and 4 – Diplopoda. The gardens and urbocenosis characterized by the presence of anthropochoric species.

The greatest variety of Diplopoda and Chilopoda (82% of species) is observed in forest biotopes, which occupy about 1.5% of the area under study.

Reduction of species composition of the Myriapoda in the steppes is connected with a decrease in soil moisture. This trend is also observed among the steppes of various types: 25 species in mixed-grass, 12 species in fescue feather grass and 5 in sagebrush steppes. In sagebrush steppes millipedes are completely absent. *Scolopendra cingulata* is the only species confined to steppe biotopes only.

Anthropogenic transformation of natural biotopes adversely affects the diversity of millipedes. The greatest damage is caused by plowing of the land: in the fields there are only two types of diplopods and 4 – chilopods, 13 species of millipedes are found in gardens, 20 in urban areas.

The creation of field-protecting forest belts has played a certain positive role. They contribute to the preservation of elements of the native fauna of the Central Ciscaucasia.

Key words:

Chilopoda, Diplopoda, Ciscaucasia, anthropogenic transformation, ecology.

Введение

Надкласс многоножки (Myriapoda) в мировой фауне представлен четырьмя классами: двупарноногие (Diplopoda), губоногие (Chilopoda), симфилы (Symphyla) и пауроподы (Paupoda). Среди них наиболее богаты видами диплоподы (в мире описано более 11000 видов) [12] и хилоподы (около 3100 видов) [11].

Губоногие, в основном, почвообитающие хищники, предпочитающие влажные местообитания. Пищевую активность они проявляют ночью, а в светлое время суток прячутся в почве, под камнями, брёвнами и листовом опаде. Для них тип почвы и растительности не имеют большого значения, однако они зависят от наличия добычи, на которую могут охотиться [18].

Большинство двупарноногих – сапрофаги, участвующие в разложении растительных остатков. Представители данного класса предпочитают мезофильные станции и приурочены к лесным биотопам [14]. Они обитают в верхнем слое почвы, листовом опаде, под корой и древесине мёртвых деревьев, где находят себе пищу, а также защиту от резких колебаний температуры и влажности [10]. Только небольшому числу видов удалось приспособиться к другим экологическим условиям.

Центральное Предкавказье с XIX в. испытывает значительные антропогенные нагрузки. Так в настоящее время около 90% территории Ставропольского края используются под сельскохозяйственные нужды [9]. Эти изменения оказывают влияние на различные элементы экосистем, в частности на многоножек, которые являются важным компонентом почвенной фауны.

Цель данной работы – провести анализ биотопической приуроченности Chilopoda и Diplopoda исследуемой территории.

Материалы и методы исследований

Материалом для настоящей работы послужили сборы 2004–2017 гг. в естественных (байрачные и пойменные леса, разнотравно-злаковые, типчаково-ковыльные и полынные степи, песчаные станции и пещеры) и антропогенных (лесополосы, сады, поля, теплицы, урбоценозы) биоценозах Центрального Предкавказья. Экземпляры собирались методами ручного сбора и почвенных раскопок. Всего было собрано и обработано более 3 тыс. Diplopoda и Chilopoda.

Результаты исследований и их обсуждение

На территории Центрального Предкавказья нами было выявлено 55 видов многоножек [6]. Из дальнейшего анализа был исключён *Clinopodes flavidus* Koch, 1847, так как данный вид не был нами обнаружен, и известен для Центрального Предкавказья только по литературным данным [17]. Ранее мы ошибочно отмечали его для Ставропольского края [19], однако, указанные в той работе особи относились к *C. escherichii*.

Видовой состав губоногих и двупарноногих многоножек естественных биоценозов представлен в Таблице 1, антропогенных – в Таблице 2.

Лесные биоценозы Центрального Предкавказья представлены байрачными и пойменными лесам. Байрачные леса произрастают по балкам, часто выходят к вершинам склонов, но на водоразделы выходят крайне редко и небольшими площадями. Пойменные леса на данной территории встречаются в долинах рек Кубани, Кумы и Терека. По данным министерства природных ресурсов Ставропольского края площадь лесов составляет около 1,5% от общей площади исследуемой территории [5].

Большинство видов многоножек обитает в лесных биотопах (45 видов), где имеется относительно высокий уровень влажности почвы. Таким образом, около 82% видового разнообразия губоногих и двупарноногих многоножек Центрального Предкавказья встречается именно в лесах. В байрачных лесах нами обнаружен 41 вид, а в пойменных – 32. При этом в обоих биотопах массовыми являются одни и те же виды: *Lithobius liber*, *L. peregrinus*, *L. curtipes*, *L. sselivanoffi*, *Clinopodes caucasicus*, *Nopoiulus kochii*, *Nemasoma caucasicum*, *Byzantorhopalum rossicum*, *Cylindroiulus pterophylacum*, *Omobrachiulus* aff. *roseni*. Коэффициент общности фаун пойменных и байрачных лесов для губоногих равен 60%, для двупарноногих – 65%. Наблюдаемое различие видового состава разных типов леса может иметь различные причины.

Так, среди Chilopoda в пойменных лесах не были найдены в основном редкие для Центрального Предкавказья виды: *Lithobius coloratus*, *L. dissimilis*, *L. stuxbergii*, *L. crassipes*, *Henia illyrica*, *Escaryus retusidens*, *E. ornatus*. Их отсутствие в данном биотопе, скорее всего, связано с неполнотой данных. При этом все виды губоногих, пойменных лесов, обнаружены и в байрачных.

Диплоподы *Propolyxenus trivittatus* и *Polydesmus muralewiczii* обычны в степных биотопах исследуемой территории и встречаются только в относительно сухих лесах поймы Кумы. Интересно, что *P. muralewiczii* на Западном Кавказе обитает во влажных лесных биотопах [13]. *Brachydesmus assimilis* приурочен, в основном, к горным ландшафтам. На территорию Центрального Предкавказья он проникает только по пойменным лесам Кубани, Терека и Куры. *Chaetoleptophyllum flexum* и *Julus lindholmi* очень редки на исследуемой территории, и их отсутствие в пойменных лесах можно объяснить неполнотой данных.

Большая часть территории Центрального Предкавказья находится в степной зоне. Однако естественные степные биотопы в результате хозяйственной деятельности сохранились на небольших участках: по балкам, на крутых склонах, пастбищах и в местах с неглубоким залеганием каменистых пород.

Смена растительного покрова степей в Центральном Предкавказье наблюдается при движении с юго-запада на северо-восток, что связано с изме-

Таблица 1. ВИДОВОЙ СОСТАВ DIPLOPODA И CHILOPODA ЕСТЕСТВЕННЫХ БИОТОПОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ.
Table 1. Species composition of the Diplopoda and Chilopoda in native biotopes of Central Ciscaucasia

№	Роды и Виды	Байрачный лес	Пойменный лес	Разнотравно-злаковая степь	Типчаково-ковыльная степь	Польная степь	Песчаные станции	Пещеры
1	2	3	4	5	6	7	8	9
КЛАСС CHILOPODA								
1.	<i>Scutigera coleoptrata</i> (Linnaeus, 1758)	+	–	+	–	+	–	–
2.	<i>Lithobius (Lithobius) colchicus</i> Muralevitch, 1907	++	++	–	–	–	–	–
3.	<i>L. (L.) coloratus</i> Sseliwanoff, 1881	+	–	–	–	–	–	–
4.	<i>L. (L.) dissimilis</i> Zuev, 2017	+	–	–	–	–	–	–
5.	<i>L. (L.) elegans</i> Sseliwanoff, 1881	+	+	–	–	–	–	–
6.	<i>L. (L.) forficatus</i> (Linnaeus, 1758)	+	–	++	++	–	–	–
7.	<i>L. (L.) liber</i> Lignau, 1903	+++	+++	–	–	–	–	–
8.	<i>L. (L.) mutabilis</i> L. Koch, 1862	++	++	–	–	–	–	–
9.	<i>L. (L.) peregrinus</i> Latzel, 1880	+++	+++	–	–	–	–	–
10.	<i>L. (L.) rufus</i> Muralevitch, 1926	++	++	+	–	–	–	–
11.	<i>L. (L.) stuxbergii</i> Sseliwanoff, 1881	+	–	–	–	–	–	–
12.	<i>L. (Monotarsobius) crassipes</i> L. Koch, 1862	+	–	+	–	–	–	–
13.	<i>L. (M.) curtipes</i> C.L. Koch, 1847	+++	+++	+++	++	+	–	–
14.	<i>L. (M.) sselivanoffi</i> (Garbowski, 1897)	+++	+++	++	++	+	–	–
15.	<i>Scolopendra cingulata</i> Latreille, 1789	–	–	++	++	++	+	–
16.	<i>Cryptops (Cryptops) caucasicus</i> Verhoeff, 1934	+	+	–	–	–	–	–
17.	<i>C. (C.) hortensis</i> (Donovan, 1810)	+	+	–	–	–	–	–
18.	<i>Henia (Henia) illyrica</i> (Meinert, 1870)	+	–	–	–	–	–	–
19.	<i>H. (Meinertia) bicarinata</i> (Meinert, 1870)	+	+	+	–	–	–	–
20.	<i>Escaryus retusidens</i> Attems, 1904	+	–	–	–	–	–	–
21.	<i>E. ornatus</i> Folkmanova, 1956	+	–	–	–	–	–	–

1	2	3	4	5	6	7	8	9
22.	<i>Schendyla nemorensis</i> (C.L. Koch, 1837)	+	+	+	+	–	–	–
23.	<i>Clinopodes caucasicus</i> (Sseliwanoff, 1884)	+++	+++	+	–	–	–	–
24.	<i>Diphyonyx conjungens</i> (Verhoeff, 1898)	–	–	+	–	–	–	–
25.	<i>Geophilus flavus</i> (De Geer, 1778)	+	+	–	–	–	–	–
26.	<i>Pachymerium ferrugineum</i> (Koch, 1835)	+	+	++	++	++	–	–
27.	<i>Strigamia</i> cf. <i>caucasia</i> (Verhoeff, 1938)	++	–	–	–	–	–	–

КЛАСС DIPLOPODA

28.	<i>Propolyxenus trivittatus</i> (Verhoeff, 1941)	–	+	++	++	–	–	–
29.	<i>Trachysphaera costata</i> (Waga, 1857)	++	++	–	–	–	–	–
30.	<i>Caucaseuma</i> cf. <i>variabile</i> Antić & Makarov, 2016	–	+	–	–	–	–	–
31.	<i>Vegrandosoma tabacarui</i> Antić & Makarov, 2016	++	–	–	–	–	–	–
32.	<i>Strongylosoma kordylamythrum</i> Attems, 1898	++	++	–	–	–	–	+
33.	<i>Brachydesmus</i> (s. str.) <i>assimilis</i> Lohmander, 1936	–	+	–	–	–	–	–
34.	<i>B. (Haplobrachidesmus) kalischewskyi</i> Lignau, 1915	++	+	–	–	–	–	–
35.	<i>Polydesmus muraleticus</i> Lohmander, 1936	–	+	+	+	–	–	–
36.	<i>Nopoiulus kochii</i> (Gervais, 1847)	+++	+++	+	–	–	–	–
37.	<i>Nemasoma caucasicum</i> (Lohmander, 1932)	+++	+++	–	–	–	–	–
38.	<i>Byzantorhopalum rossicum</i> (Timotheew, 1897) (= <i>Megaphyllum rossicum</i>)	+++	+++	+++	+++	–	–	–
39.	<i>Chaetoleptophyllum flexum</i> Golovatch, 1979	+	–	–	–	–	–	–
40.	<i>Cylindroiulus arborum</i> Verhoeff, 1928	+	+	–	–	–	–	–
41.	<i>C. pterophylacum</i> Read, 1992	+++	+++	–	–	–	–	–
42.	<i>Julus colchicus</i> Lohmander, 1936	+	+	+	+	–	–	–
43.	<i>J. lindholmi</i> Lohmander, 1936	+	–	+	–	–	–	–
44.	<i>Rossiulus kessleri</i> (Lohmander, 1927)	++	++	+++	+++	–	–	+
45.	<i>Unciger transsilvanicus</i> (Verhoeff, 1899)	+	+	++	–	–	–	–
46.	<i>Omobrachiulus brachyurus</i> (Attems, 1899)	++	++	–	–	–	–	–
47.	<i>O. aff. roseni</i> (Verhoeff, 1921)	+++	+++	+	+	–	–	+

Примечание: + – редкий вид; ++ – обычный вид; +++ – массовый вид.
Designations: + – rare species; ++ – common species; +++ – numerous species.

нением высоты над уровнем моря и уменьшением количества осадков. При этом уменьшается количество злаков и начинает преобладать полынь [1].

В результате мы наблюдаем закономерное уменьшение разнообразия многоножек в различных степных биотопах: наибольшее число видов (21) отмечено в относительно влажной разнотравно-злаковой степи, 12 – в типчаково-ковыльной и только 5 – в полынной степи.

Все представители *Diplopoda* исследуемой территории, обнаруженные в степных биотопах, встречаются также в байрачных или пойменных лесах. В разнотравно-злаковой степи встречается 9 видов диплопод, в типчаково-ковыльной – 5. В обоих биотопах массовыми видами являются эвритопные *Byzantorhopalum rossicum* и *Rossiulus kessleri*. В полынных степях двупарноногие отсутствуют.

Среди *Chilopoda* в степных биотопах наиболее обычны *Lithobius forficatus*, *L. curtipes*, *L. sselivanoffi*, *Pachymerium ferrugineum* и *Scolopendra cingulata*. Причём *S. cingulata* является единственным видом, приуроченным только к степным биотопам. Обнаруженный в естественных биотопах лишь в разнотравно-злаковой степи, *Diphyonux conjungens* на Кавказе обычно встречается в лесах [19, 16].

Песчаные станции распространены в восточной части исследуемой территории. Низкий уровень влажности и разреженность растительного покрова делает такие биотопы практически непригодными для обитания многоножек. В них крайне редко встречается *Scolopendra cingulata*.

Помимо того, на территории Центрального Предкавказья нами было обследовано несколько пещер: на горе Стрижамент, Монахова пещера, расположенная к северу от Кисловодска, и группа пещер Каменные сараи, находящиеся к западу от села Александровское. Живые многоножки были обнаружены только в пещере на г. Стрижамент и представлены единственным видом *Strongylosoma kordylamythrums*. В Каменных сараях нам удалось найти только погибшие экземпляры *Rossiulus kessleri* и *Omobrachiulus aff. roseni*, которые, скорее всего, попали туда в летний период в поисках влаги. Следует отметить, что на исследуемой территории нет больших пещеры, в которых могли бы сформироваться троглобионтные виды многоножек.

Как уже было сказано, более 90% исследуемой территории используется под сельскохозяйственные нужды. При этом антропогенная трансформация не может не влиять на разнообразие и численность многоножек. Наиболее сильное воздействие оказывает распашка земель. Так на полях нами было обнаружено 2 вида *Diplopoda*: *Byzantorhopalum rossicum* и *Rossiulus kessleri*, а также 4 вида *Chilopoda*: *Cryptops caucasicus*, *Clinopodes caucasicus*, *Pachymerium ferrugineum* и *Lamycetes emarginatus*. Причём *L. emarginatus* в Центральном Предкавказье был встречен нами лишь в данном биотопе. Поля характеризуются не только обеднённым видовым составом, но и низкой численностью многоножек.

С распашкой земель связано и создание полезащитных лесополос, площадь которых составляет примерно 1,5% от площади Центрального Предкавказья [3]. Древесная растительность лесополос удерживает больше влаги, чем окружающие открытые участки, защищает поверхность почвы от прямых солнечных лучей и формирует лесную подстилку. Эти условия благоприятно сказываются на разнообразии и численности беспозвоночных. Так, в пределах Ставропольской возвышенности численность беспозвоночных в лесополосах в 4–4,8 раза выше, чем на пашнях, и в 1,7–2,3 раза выше, чем в прилегающей агростепи [2].

По сравнению с другими антропогенными биоценозами, в лесополосах наблюдается максимальное видовое разнообразие многоножек: 24 вида (14 Chilopoda и 10 Diplopoda). Среди губоногих массовыми видами являются *Lithobius liber*, *L. curtipes* и *Clinopodes caucasicus*, кроме того, обычны *L. sselivanoffi* и *Pachymerium ferrugineum*. Массовые диплоподамы лесополос *Byzantorhopalum rossicum* и *Rossiulus kessleri*.

Коэффициент общности фаун Мугларода лесополос и байрачных лесов составляет 43,5%, лесополос и пойменных лесов – 47,4%, лесополос и разнотравно-злаковых степей – 53,6%. По всей видимости, видовой состав Мугларода полезащитных лесонасаждений формировался из нескольких источников.

В первую очередь, лесополосы послужили рефугиумами для естественной степной фауны. Так, судя по нашим данным, здесь встречаются практически все виды характерные для степей Центрального Предкавказья за исключением *L. forficatus*, *Scolopendra cingulata*, *Julus lindholmi* и *Unciger transsylvanicus*. Отсутствие *L. forficatus* и *U. transsylvanicus* возможно связано с неполнотой данных, так как оба этих вида встречаются в лесополосах Ростовской области [20].

Во-вторых, лесополосы служат своеобразными «коридорами» для некоторых лесных видов, которые сумели по ним распространиться на недоступную им ранее территорию. К таковым можно отнести *L. liber*, *L. mutabilis*, *Clinopodes caucasicus*, *Strigamia* cf. *caucasia*, *Strongylosoma kordylamythrum*, *Chaetoleptophyllum flexum*, *Omobrachiulus brachyurus* и, возможно, *Diphyonyx conjungens*.

Наконец, некоторые виды могут быть интродуцированы вместе с посадочным материалом лесополос. Видимо, с этим связано распространение *L. melanops*, который встречается на исследуемой территории только в искусственных лесонасаждениях [19].

В садах нам удалось обнаружить только 9 видов Chilopoda и 4 – Diplopoda. Столь низкое видовое разнообразие связано с проведением агротехнических мероприятий: рыхлением почвы, внесением удобрений, обработку плодовых деревьев инсектицидами. В результате, в данных антропогенных биоценозах могут обитать только эвритопные (например, *L. curti-*

Таблица 2. ВИДОВОЙ СОСТАВ DIPLOPODA И CHILOPODA АНТРОПОГЕННЫХ БИОТОПОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ
Table 2. Species composition of the Diplopoda and Chilopoda in anthropogenic biotopes of Central Ciscaucasia

№	Роды и Виды	Лесополосы	Теплицы	Сады	Поля	Урбоценоз
1	2	3	4	5	6	7
КЛАСС CHILOPODA						
1.	<i>Scutigera coleoptrata</i> (Linnaeus, 1758)	+	–	–	–	++
2.	<i>Lamyttes emarginatus</i> (Newport, 1844)	–	–	–	+	–
3.	<i>Lithobius (Lithobius) forficatus</i> (Linnaeus, 1758)	–	–	+	–	+
4.	<i>L. (L.) liber</i> Lignau, 1903	+++	–	–	–	–
5.	<i>L. (L.) melanops</i> Newport, 1845	+	–	+	–	+
6.	<i>L. (L.) mutabilis</i> L. Koch, 1862	+	–	–	–	–
7.	<i>L. (Monotarsobius) crassipes</i> L. Koch, 1862	+	–	–	–	–
8.	<i>L. (M.) curtipes</i> C.L. Koch, 1847	+++	+	+	–	++
9.	<i>L. (M.) sselivanoffi</i> (Garbowski, 1897)	++	–	+	–	++
10.	<i>Scolopendra cingulata</i> Latreille, 1789	–	–	–	–	+
11.	<i>Cryptops (Cryptops) caucasicus</i> Verhoeff, 1934	–	–	–	+	+
12.	<i>Henia (Meinertia) bicarinata</i> (Meinert, 1870)	+	–	–	–	–
13.	<i>Schendyla nemorensis</i> (C.L. Koch, 1837)	+	+	+	–	+
14.	<i>Clinopodes caucasicus</i> (Sselivanoff, 1884)	+++	–	+	+	+
15.	<i>C. escherichii</i> (Verhoeff, 1896)	–	–	+	–	–
16.	<i>Diphyonyx conjungens</i> (Verhoeff, 1898)	+	–	–	–	–
17.	<i>Geophilus flavus</i> (De Geer, 1778)	+	–	–	–	+
18.	<i>Pachymerium ferrugineum</i> (Koch, 1835)	++	+	+	+	+
19.	<i>Strigamia cf. caucasia</i> (Verhoeff, 1938)	+	–	+	–	+
КЛАСС DIPLOPODA						
20.	<i>Propolyxenus trivittatus</i> (Verhoeff, 1941)	+	–	–	–	–
21.	<i>Caucaseuma variabile</i> Antić & Makarov, 2016	–	–	–	–	+
22.	<i>Strongylosoma kordylamythrum</i> Attems, 1898	+	–	–	–	+
23.	<i>Oxidus gracilis</i> (C.L. Koch, 1847)	–	++	–	–	–

1	2	3	4	5	6	7
24.	<i>Brachydesmus (Eubrachydesmus) superus</i> Latzel, 1884	–	–	–	–	+
25.	<i>Polydesmus murelewiczi</i> Lohmander, 1936	+	–	–	–	–
26.	<i>Archiboreoiulus pallidus</i> (Brade–Birks, 1920)	–	–	–	–	+
27.	<i>Nopoiulus kochii</i> (Gervais, 1847)	++	++	+	–	+
28.	<i>Brachyiulus jawlowskii</i> Lohmander, 1928	–	–	+	–	+
29.	<i>Byzantorhopalum rossicum</i> (Timotheew, 1897) (= <i>Megaphyllum rossicum</i>)	+++	–	++	+	++
30.	<i>Chaetoleptophyllum flexum</i> Golovatch, 1979	+	–	–	–	–
31.	<i>Julus colchicus</i> Lohmander, 1936	+	–	–	–	–
32.	<i>Rossiulus kessleri</i> (Lohmander, 1927)	+++	–	++	+	++
33.	<i>Omobrachiulus brachyurus</i> (Attems, 1899)	++	–	–	–	–
34.	<i>O. aff. roseni</i> (Verhoeff, 1921)	++	–	–	–	–

Примечание:
Designations:

+ – редкий вид;
+ – rare species;

++ – обычный вид;
++ – common species;

+++ – массовый вид.
+++ – numerous species.

pes, *L. sselivanoffi*, *Pachymerium ferrugineum*, *Byzantorhopalum rossicum* и *Rossiulus kessleri*) и антропохорные виды. К последним на исследуемой территории можно отнести *Clinopodes escherichii* и *Brachyiulus jawlowskii*. Хотя *C. escherichii* обитает в естественных биотопах Краснодарского края и Ростовской области [16, 20], на исследуемой территории он обнаружен только в садах.

В ходе исследования нами были проведены сборы в оранжерее Ставропольского ботанического сада. Здесь удалось найти 5 видов многоножек. Из них 4 встречаются в естественных биотопах: *L. curtipes*, *Schendyla nemorensis*, *Pachymerium ferrugineum* и *Nopoiulus kochii*. Пятый вид – субкосмополит *Oxidus gracilis* был обнаружен только на территории оранжереи, где постоянно поддерживается высокая температура и влажность. При этом известно, что *O. gracilis* натурализовался на Западном Кавказе и в Северо-западном Закавказье [4, 7, 8, 15]. Отсутствие данного вида в открытых грунтах Центрального Предкавказья связано с более сухим климатом данной территории.

В урбоценозах нами обнаружено 12 видов хилопод и 8 – диплопод. Характерной особенностью данных ценозов является присутствие синантропных (*Scutigera coleoptrata*) и антропохорных видов: *L. melanops*, *Archiboreoiulus pallidus*, *Brachydesmus superus* и *Brachyiulus jawlowskii*. Однако наибольшей численности достигают эвритопные *L. curtipes*, *L. sselivanoffi*, *Byzantorhopalum rossicum* и *Rossiulus kessleri*.

Выводы

В результате проведённой работы было выявлено, что на территории Центрального Предкавказья наибольшее разнообразие Diplopoda и Chilopoda (45 видов или 82%) наблюдается в лесных биотопах, которые занимают около 1,5% площади исследуемой территории.

При переходе от лесных биотопов к степным наблюдается обеднение видового состава. Это связано, в первую очередь, с уменьшением влажности почвы. Даная тенденция наблюдается и среди степей различных типов: 25 видов в разнотравно-злаковых, 12 видов – в типчаково ковыльных и 5 – в полынных степях. При этом в последних диплоподы полностью отсутствуют. Все степные виды многоножек, за исключением *Diphyonyx conjungens* и *Scolopendra cingulata*, встречаются и в лесах. *S. cingulata* является единственным видом, приуроченным только к степным биотопам. По-видимому, *D. conjungens* проникает в степи по лесополосам.

Антропогенная трансформация естественных биотопов отрицательно сказывается на разнообразии многоножек. Наибольший ущерб наносит распашка земель: на полях встречается только 2 вида диплопод и 4 – хилопод, среди которых один антропохорный: *Lamyctes emarginatus*. В плодовых садах обнаружено 13 видов многоножек, в урбоценозах – 20. При этом для последних характерно наличие *L. melanops*, *Archiboreoiulus pallidus*, *Brachydesmus superus* и *Brachyiulus jawlowskii*, которые не встречаются в естественных биотопах.

Создание полезащитных лесополос сыграло некоторую положительную роль. Они послужили рефугиумом для степной фауны многоножек, а также способствуют расселению некоторых лесных видов.

Библиографический список

1. Антыков А. Я., Стоморев А.Я. Почвы Ставрополя и их плодородие. Ставрополь, Книжное издательство, 1970. 413 с.
2. Годунова Е.И., Патюта М.Б., Сигида С.И. Почвенная мезофауна степных и лесостепных агроландшафтов Центрального Предкавказья. Ставрополь: «АГРУС». 2014. 176 с.
3. Клопов А.А. Полезащитные насаждения. Ставрополь: Краевое книжное изд-во. 1950. 131 с.
4. Лигнау Н.Г. К фауне многоножек Кавказа // Ежегодник Зоологического музея Императорской Академии наук. 1907. Т. 12. С. 195–200.
5. Общие сведения о лесных ресурсах края // www.mpr26.ru URL: <http://www.mpr26.ru/forest/o-lesnykh-resursakh-kraya/> (дата обращения 21.05.2018).
6. Сигида С.И., Зуев Р.В. Зоогеографический анализ Chilopoda и

- Diplopoda фауны Центрального Предкавказья // Наука. Инновации. Технологии. 2017. № 4. С. 185–196.
7. Чумаченко Ю.А. Особенности высотного распределения почвенной мезофауны на Северо-Западном Кавказе // Труды Кавказского государственного природного биосферного заповедника. 2013. Вып. 20. С. 44–60.
 8. Чумаченко Ю.А. Население двупарноногих многоножек (Diplopoda) в тисо-самшитовой роще Кавказского заповедника (Россия) // Зоологический журнал. 2016. Т. 95, вып. 4. С. 406–416.
 9. Шальнев В.А. Ландшафты Северного Кавказа. Эволюция и современность. Ставрополь: Изд-во СГУ, 2004. 265 с.
 10. David J.-F. Diplopoda – ecology // Anatomy, Taxonomy, Biology. The Myriapoda, Volume 1. 2010. P. 303–327.
 11. Edgecombe D.G., Zapparoli M., Bonato L. Chilopoda – Taxonomic overview // Anatomy, Taxonomy, Biology. The Myriapoda, Volume 1. 2010. P. 363–443.
 12. Enghoff H., Golovatch S.I., Short M., Stoev P., Wesener T. Diplopoda – taxonomic overview // Anatomy, Taxonomy, Biology. The Myriapoda, Volume 2. 2015. P. 363–453.
 13. Golovatch S.I., Evsyukov A.P., Reip H.S. The millipede family Polydesmidae in the Caucasus (Diplopoda: Polydesmida) // Zootaxa, 4085, 1. 2016. P. 1–51.
 14. Kime R. D., Golovatch S.I. Millipede (Diplopoda) distributions: A review // Soil organisms. 2009. Vol. 81 (3). P. 565–597.
 15. Kokhia M.S., Golovatch S.I. A checklist of the millipedes of Georgia, Caucasus (Diplopoda) // ZooKeys. 2018. Vol. 741. P. 35–48.
 16. Korobushkin D.I., Semenyuk I.I., Tuf I.H. An annotated checklist of the Chilopoda and Diplopoda (Myriapoda) of the Abrau Peninsula, northwestern Caucasus, Russia // Biodiversity Data Journal. 2016. Vol. 19(4). P. 1–33.
 17. Muralewicz W.S. Übersicht über die Chilopodenfauna des Kaukasus // Zoologischer Anzeiger 69. 1927. P. 27–44.
 18. Voigtländer K. Chilopoda – Ecology // Anatomy, Taxonomy, Biology. The Myriapoda, Volume 1. 2010. P. 309–325.
 19. Zuev R.V. Centipedes (Chilopoda) from the Stavropol Territory, northern Caucasus, Russia // Arthropoda Selecta. 2016. Vol.25. No.1. P. 23–38.
 20. Zuev R.V., Evsyukov A.P. Centipedes (Chilopoda) from the Rostov-on-Don Region, southern Russia // Russian Entomological Journal. 2016. Vol. 25 (4). P. 417–426.

References

1. Antykov A.Ya., Stomorev A.Ya. Pochvy Stavropol'ya i ikh plodorodie (Soils of Stavropol Territory and their fertility). Stavropol, Knizhnoe izdatelstvo. 1970. 413 p. (in Russ).

2. Godunova E.I., Patyuta M.B., Sigida S.I. Pochvennaya mezofauna stepnykh i lesostepnykh agrolandshaftov Tsentralnogo Predkavkaz'ya (Soil mesofauna of steppe and forest-steppe agrolandscapes of Central Ciscaucasia). Stavropol: «AGRUS». 2014. 176 p. (in Russ).
3. Klopov A.A. Polezashitnye nasazhdeniya (Field-protective plantations). Stavropol: Kraevoe Knizhnoe izdatelstvo. 1950. 131 p. (in Russ).
4. Lignau N.G. K faune mnogonozhek Kavkaza (To the fauna of the millipedes of the Caucasus) // Ezhegodnik Zoologicheskogo muzeya Imperatorskoy Akademii nauk. 1907. T. 12. P. 195–200 (in Russ).
5. Obshie sveden'ya o lesnykh resursakh kraya (General information about the forest resources of the region) // [www.mpr26.ru URL: http://www.mpr26.ru/forest/o-lesnykh-resursakh-kraya/](http://www.mpr26.ru/forest/o-lesnykh-resursakh-kraya/) (date accessed 21.05.2018) (in Russ).
6. Sigida S.I., Zuev R.V. Zoogeograficheskiy analiz Chilopoda i Diplopoda fauny Tsentralnogo Predkavkaz'ya (Zoogeographic analysis of Chilopoda and Diplopoda of the fauna of the Central Ciscaucasia) // Nauka. Innovatsii. Tekhnologii. 2017. № 4. P. 185–196 (in Russ).
7. Chumachenko Yu.A. Osobennosti vysotnogo raspredeleniya pochvennoy mezofauny na Severo-Zapadnom Kavkaze (Features of the altitudinal distribution of soil mesofauna in the North-Western Caucasus) // Trudy Kavkazskogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika. 2013. Vol. 20. P. 44–60 (in Russ).
8. Chumachenko Yu.A. Naselenie dvuparnonogikh mnogonozhek (Diplopoda) v tiso-samshitovoy rosh'e Kavkazskogo Zapovednika (Rossiya) (The population of millipede (Diplopoda) in a yew-boxtree grove of the Caucasian Nature Reserve (Russia)) // Zoologicheskii zhurnal. 2016. T. 95, vol. 4. P. 406–416 (in Russ).
9. Shalnev V.A. Landshafty Severnogo Kavkaza. Evolutsiya i sovremennost' (Landscapes of the Northern Caucasus. Evolution and modernity). Stavropol: Izdatelstvo SGU, 2004. 265 p (in Russ).
10. David J.-F. Diplopoda – ecology // Anatomy, Taxonomy, Biology. The Myriapoda, Volume 1. 2010. P. 303–327.
11. Edgecombe D.G., Zapparoli M., Bonato L. Chilopoda – Taxonomic overview // Anatomy, Taxonomy, Biology. The Myriapoda, Volume 1. 2010. P. 363–443.
12. Enghoff H., Golovatch S.I., Short M., Stoev P., Wesener T. Diplopoda – taxonomic overview // Anatomy, Taxonomy, Biology. The Myriapoda, Volume 2. 2015. P. 363–453.
13. Golovatch S.I., Evsyukov A.P., Reip H.S. The millipede family Polydesmidae in the Caucasus (Diplopoda: Polydesmida) // Zootaxa, 4085, 1. 2016. P. 1–51.
14. Kime R. D., Golovatch S.I. Millipede (Diplopoda) distributions: A review // Soil organisms. 2009. Vol. 81 (3). P. 565–597.
15. Kokhia M.S., Golovatch S.I. A checklist of the millipedes of Georgia, Caucasus (Diplopoda). // ZooKeys. 2018. Vol. 741. P. 35–48.

16. Korobushkin D.I., Semenyuk I.I., Tuf I.H. An annotated checklist of the Chilopoda and Diplopoda (Myriapoda) of the Abrau Peninsula, northwestern Caucasus, Russia // Biodiversity Data Journal. 2016. Vol. 19(4). P. 1–33.
17. Muralewicz W.S. Übersicht über die Chilopodenfauna des Kaukasus // Zoologischer Anzeiger 69. 1927. P. 27–44.
18. Voigtländer K. Chilopoda – Ecology // Anatomy, Taxonomy, Biology. The Myriapoda, Volume 1. 2010. P. 309–325.
19. Zuev R.V. Centipedes (Chilopoda) from the Stavropol Territory, northern Caucasus, Russia // Arthropoda Selecta. 2016. Vol. 25. No. 1. P. 23–38.
20. Zuev R.V., Evsyukov A.P. Centipedes (Chilopoda) from the Rostov-on-Don Region, southern Russia // Russian Entomological Journal. 2016. Vol. 25 (4). P. 417–426.

**Рукопись поступила в редакцию: 12.07.2018,
принята к публикации 26.08.2018**

Об авторах

Зуев Роман Владимирович, ассистент кафедры общей биологии и биоразнообразия Северо-Кавказского федерального университета. Scopus ID: 56441746400, Researcher ID: Q-6566-2018. Телефон: 8 (988) 755-42-50. Email: romus00@yandex.ru.

Сигида Сергей Иванович, доктор биологических наук, профессор кафедры общей биологии и биоразнообразия Северо-Кавказского федерального университета. Researcher ID: Q-6600-2018. Телефон 8 (905) 411-44-58. Email: Omophron@yandex.ru.

About the authors

Zuev Roman Vladimirovich, assistant of the Department of general biology and biodiversity Northern Caucasus Federal University. Scopus ID: 56441746400, Researcher ID: Q-6566-2018. Phone: 8 (988) 755-42-50. Email: romus00@yandex.ru.

Sigida Sergey Ivanovich, Doctor of Biological Science, professor of the Department of general biology and biodiversity Northern Caucasus Federal University. Researcher ID: Q-6600-2018. Phone: 8 (905) 411-44-58. Email: Omophron@yandex.ru.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, ПОЛИТИЧЕСКАЯ
И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

УДК 913(470.63)

Зольникова Ю.Ф. Северо-Кавказский федеральный университет,
г. Ставрополь, Россия
zolnst@mail.ru

**ИЗУЧЕНИЕ КЛИМАТА КАВКАЗСКИХ
МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД КАК
РЕКРЕАЦИОННОГО РЕСУРСА
В КОНЦЕ XIX – НАЧАЛЕ XX ВЕКА**

Введение: Кавказские Минеральные Воды (КМВ) – один из старейших курортных регионов России, на территории которого сосредоточены разнообразные рекреационные ресурсы и функционируют различные виды рекреационной деятельности. Разнообразные рекреационные ресурсы Кавказских Минеральных Вод вызывают интерес не только с хозяйственной точки зрения, актуально исследовать их и в историческом аспекте.

Материалы и методы: Исторический подход позволяет исследовать историю и особенности развития научных представлений о характере освоения климата как рекреационного ресурса Кавказских Минеральных Вод. Анализ исторических источников способствовал выявлению факторов изучения климата как рекреационного ресурса, и определить вклад отдельных ученых в исследование климата региона.

Результаты исследования: Обобщены научные труды ученых и врачей, работающих в регионе Кавказские Минеральные Воды в конце XIX – начале XX в. Наряду с изучением гидроминеральных ресурсов в исследуемый период на Кавказских Минеральных Водах начинается активное исследование климатических условий с точки зрения использования их в лечебных целях. Проанализировано ряд научных работ, посвященных характеристике лечебного значения климата. Рассмотрены работы исследователей, занимающихся анализом влияния климата региона Кавказские Минеральные Воды или отдельных городов-курортов на организм человека. Показано значение работ членов Русского Бальнеологического Общества в исследовании климата как лечебного фактора, а также их вклад в развитие климатолечения на Кавказских Минеральных Водах.

Обсуждение и заключения: В XIX в. в результате проведения метеорологических исследований появляются первые научные работы о климатических условиях Кавказских Минеральных Вод и климат региона приобретает большое значение в лечебных целях. Благодаря исследованиям климатических факторов курортного региона с 1910 г. Кисловодск как курорт начал функционировать и в зимний период.

Ключевые слова: Кавказские Минеральные Воды, климат, климатические условия, рекреационные ресурсы, курорт, Русское Бальнеологическое Общество.

Zolnikova Yu. F. North-Caucasian Federal University, Stavropol, Russia

THE STUDY OF THE CLIMATE OF THE CAUCASIAN MINERAL WATERS AS A RECREATIONAL RESOURCE IN THE LATE XIX-EARLY XX CENTURIES.

- Introduction:** Caucasian Mineral Waters (KMW) – one of the oldest resort regions of Russia, on the territory of which are concentrated a variety of recreational resources and operate various types of recreational activities. A variety of recreational resources of Caucasian Mineral Waters are of interest not only from an economic point of view, it is important to explore them in the historical aspect.
- Materials and methods:** The historical approach allows us to study the history and features of the development of scientific ideas about the nature of the development of climate as a recreational resource of Caucasian Mineral Waters. The analysis of historical sources contributed to the identification of factors in the study of climate as a recreational resource, and to determine the contribution of individual scientists to the study of climate in the region.
- Research result:** Summarized scientific works of scientists and doctors, working in the region Caucasian Mineral Waters in the late XIX – early XX centuries. Along with the study of hydromineral resources in the study period in the Caucasian Mineral Waters begins an active study of climatic conditions in terms of their use for medicinal purposes. A number of scientific works devoted to the characteristics of the therapeutic value of climate are analyzed. The work of researchers involved in the analysis of the influence of climate in the region of Caucasian Mineral Waters or individual resort cities on the human body. The importance of the works of members of the Russian Balneological Society in the study of climate as a therapeutic factor, as well as their contribution to the development of climate treatment in the Caucasian Mineral Waters.
- Discussion and conclusions:** In the XIX century, as a result of meteorological studies, the first scientific works on the climatic conditions of the Caucasian Mineral Waters appeared and the climate of the region acquired great importance for medicinal purposes. Due to researches of climatic factors of the resort region since 1910 Kislovodsk as the resort began to function and in the winter period.
- Key words:** Caucasian Mineral Waters, climate, climatic conditions, recreation resources, kurort, Russian Balneological Society.

Введение

Климатические факторы с лечебной и профилактической целью начали использовать еще в глубокой древности, когда солнце, воздух и вода широко применялись в целях укрепления здоровья. Но научное изучение вопросов климатолечения началось в Европе лишь с XIX в.

Климат курортного региона Кавказские Минеральные Воды (КМВ) отличается разнообразием. На формирование климата КМВ оказывают влияние следующие факторы: положение региона на юге страны, обеспечивающее большое поступление солнечной энергии; особенности циркуляции атмосфе-

ры в южной части умеренных широт; рельеф и высота солнца над уровнем моря, создающие климатические различия в разных частях региона. Характер и изменчивость погоды на Кавказских Минеральных Водах определяется взаимодействием многих факторов формирования климата. Большое значение имеет происхождение и характер воздушных масс, локализация и перемещение барических систем и атмосферных фронтов, их структура, размер, изменение во времени и по пути перемещения в сложных орографических условиях, которые определяют характер погоды в различных городах-курортах Кавказских Минеральных Вод [9]. В Пятигорске лето теплое, зима умеренно мягкая. Кисловодск известен как зимний климатический курорт, на территории которого благодаря господствующим зимой воздушным массам и замкнутым условиям котловины наблюдается ясная сухая погода. Климат Железноводска соответствует горно-лесному и умеренно сухому климату среднегорий Альп. Климат Ессентуков отличается контрастностью – лето здесь жаркое и сухое, а зима морозная и дождливая.

Воздух в городах-курортах Кавказских Минеральных Вод характеризуется прозрачностью, высокой естественной ионизацией при низком коэффициенте униполярности ионов. Эти условия в совокупности с благоприятным режимом солнечного излучения позволяют проводить на КМВ все виды климатолечения. А курортные парки городов-курортов Кавказских Минеральных Вод очищают воздух от загрязнения и обогащают целебными летучими фитоорганическими веществами.

Лечебное действие климата Кавказских Минеральных Вод отмечалось еще в первые годы формирования курортов региона. На курортах КМВ неорганизованное, стихийное использование климатических факторов началось с первых лет существования этих курортов. Одной из форм климатолечения было пребывание лечащихся на свежем воздухе. Живя в кибитках и палатках, больные большую часть времени проводили на воздухе.

Материалы и методы исследования

В качестве источников использовались и анализировались научные труды и монографии исследователей Кавказских Минеральных Вод XIX – начала XX в.: Ф.А. Баталина, С.А. Смирнова, А.И. Воейкова, И.О. Зарубина и др., внесших большой вклад в изучение климата региона Кавказские Минеральные Воды как рекреационного ресурса. Изучены Протоколы и Записки Русского Бальнеологического Общества (РБО), в которых отражены результаты изучения климата Кавказских Минеральных Вод членами РБО, а также приводятся сведения об основах климатолечения в регионе. В результате, на основе разнообразного историко-географического материала обобщен опыт, исследованы подходы и методики, применяемые отдельными исследователями, работающими на Кавказских Минеральных Водах на рубеже XIX–XX вв. в исследовании климатических условий как рекреационного ресурса.

Результаты исследований и их обсуждение

Климат Кавказских Минеральных Вод давно высоко оценен курортологами, успешно и широко используется в курортном регионе как лечебный фактор.

Почти с момента возникновения курорт Кисловодск был признан одной из лучших горноклиматических станций. Исследователи Кавказских Минеральных Вод, побывавшие в Кисловодске в период его возникновения, отмечали живительный воздух данной территории. В последствие появлялись и более серьезные характеристики климата, основанные на научных наблюдениях. В 1861 г. Ф. А. Баталин, описывая Кисловодск, утверждал, что «климат Кисловодска – один из самых приятных и здоровых на Кавказе... Воздух чисто горный, легкий..., им дышится как-то легко...» [1]. Основной формой климатолечения в тот период являлось нахождение больных на свежем воздухе. Длительному пребыванию на воздухе способствовали хороший климат и благоприятные погодные условия теплого периода года.

Уже в 1874 г. в отчете по управлению Кавказскими Минеральными Водами отмечалось, что для изучения климатических условий в Пятигорске, Железноводске и Кисловодске были построены правильные метеорологические станции. Из Пятигорска в Тифлисскую обсерваторию посылались ежедневные телеграммы и ежемесячные отчеты о барометрических и термометрических изменениях атмосферы. Такие же наблюдения проводились в Кисловодске и Железноводске. В Ессентуках, из-за нехватки необходимых инструментов, наблюдались только температура воздуха и направление ветра [7].

В конце XIX в. появились первые научные работы, посвященные характеристике климатических условий отдельных местностей Северного Кавказа, в том числе и региона Кавказских Минеральных Вод. Так, работа директора КМВ С. А. Смирнова «Климат Пятигорска» (1869), была посвящена характеристике климата курорта с учетом его физико-географических условий, а также анализу влияния климата Пятигорска на организм человека [4].

В 70-80-е гг. XIX в. признается лечебное значение климата Кисловодского курорта. Этой проблеме затрагивали ряд работ (Погожев, 1873; Зарубин, 1879; Скотовский, 1873 и др.) [7, 10, 12]. В 1873 г. П. Погожев на основе проведенных им наблюдений на метеорологической станции, сделал вывод, что климат Кисловодска имеет важное лечебное значение. Исследователь подчеркнул, что воздух Кисловодска возбуждал активную деятельность легких [10].

Большой вклад в научное исследование климата Кавказских Минеральных Вод внесли члены Русского Бальнеологического Общества. Значительная часть исследований обсуждалась на заседаниях РБО. Так, на заседании Русского Бальнеологического Общества в 1874 г., В.А. Георгиевский сделал доклад на тему «Перечень метеорологических наблюдений в Пятигорске за последние 5 лет» на основе авторских исследований. В 1891 г. Ф.И. Пастернацкий в докладе на заседании Русского Бальнеологического Общества отме-

тил, что природные свойства Кисловодска как горной местности, обладающей живительным воздухом, создали курорту славу для прекрасного дачного местопребывания здоровых людей и полезное для больных [8].

Доклады о климатических особенностях Кисловодского курорта были сделаны также на заседании Русского Бальнеологического Общества в 1898 г. на темы «Кисловодск как курорт для сердечных больных» (В. И. Подановский и Н.И. Попов) и «О значении Кисловодска, как зимней горной климатолечебной станции» (П.И. Скотовский и В.Д. Спицын) [5].

Доктор П.И. Скотовский, постоянно живущий в Кисловодске, считал, что курорт пригоден для пребывания больных в более поздние осенние и зимние месяцы. Такие результаты им были сделаны на основе метеорологических данных, на собственных наблюдениях над больными, зимовавшими в Кисловодске и на изучении заболеваемости малярией местного населения. П.И. Скотовский отмечал, что зимние месяцы в Кисловодске выгодно отличаются от других курортов обилием солнца, малым количеством осадком и отсутствием ветра [5].

На основе метеорологических наблюдений, врачом был сделан вывод, что Кисловодск по своим климатическим условиям может в течение 9-10 месяцев – с 1 июля по 1 апреля или 1 мая – служить при надлежащих предосторожностях, местом непрерывного пребывания больных. В докладе отмечалась благоприятность климатических условий Кисловодска, но вместе с тем говорилось, что условия не настолько идеальны, что можно пренебречь всеми прочими факторами. В частности, для пребывания больных в зимнее время на курорте нужны приспособления (квартиры), необходим санитарный надзор для обеспечения чистоты воздуха и почвы. Но все эти указанные условия на курорте пока отсутствуют. Поэтому в настоящее время только очень ограниченное число больных может найти в Кисловодске сносные зимние помещения [5]. По результатам исследования авторы доклада рекомендовали построить в Кисловодске санаторий, который послужил бы ядром для будущей климатической станции. Причем в докладе отмечалось, что для устройства санатория не может служить первый попавшийся дом. Необходимо новое здание, расположенное на возвышенности, правильно ориентированное по сторонам света, специально приспособленное для быстрой дезинфекции, с защитными галереями для лечения воздухом и собственным парком. Для постройки санатория была рекомендована местность около «Красных камней».

Доклад П. И. Скотовского «О значении Кисловодска, как зимней горной климатолечебной станции» Русское Бальнеологическое Общество рекомендовало для обсуждения на первом Всероссийском съезде деятелей по климатологии, гидрологии и бальнеологии [4]. На обсуждение на съезде членами Русского Бальнеологического Общества были предложены следующие положения доклада:

1. Характеристика климатических условий Кисловодска для непрерывного пребывания больных на курорте;
2. Постановка проблем по существующим в настоящее время бытовым и санитарным условиям Кисловодска для осеннего и зимнего пребывания больных на курорте;
3. Предложения по постройке в Кисловодске санатория с лечебным парком на возвышенном месте и вне жилого района для легочных больных.

В сентябре 1899 г. на заседании Русского Бальнеологического Общества П. И. Скловским был сделан доклад на тему «Количество солнечных часов в Кисловодске с 6 августа 1898 г. по 6 августа 1899 г.» [13]. В данном исследовании врачом проводился подсчет числа солнечных часов на курорте в течение календарного года. В результате максимальное количество солнечных часов в Кисловодске составило 14,5 часов, а минимальное – 8 (при продолжительности летнего дня по календарю в 17 часов). Количество солнечных часов в год составило 2640 часов. По месяцам данные распределялись следующим образом:

февраль – 122 часа
декабрь – 152 часа
январь – 163 часа
март – 208 часов
ноябрь – 216 часов
октябрь – 218 часов
август – 232 часа
сентябрь – 238 часов
июль – 244 часа
май – 251 час
июнь – 257 часов
апрель – 339 часов.

По временам года выявлены следующие данные:

весна – 798 часов
лето – 731 час
осень – 674 часа
зима – 437 часов.

Наибольшее количество солнечных дней было зафиксировано в октябре и составило 22 дня, в том числе 18 дней подряд. За октябрём следует ноябрь – 21 солнечный день и 18 подряд, далее сентябрь – 16 дней и 13 подряд, а затем декабрь – 14 и 12 и январь – 14 дней с перерывами [13]. Наименьшее число солнечных дней пришлось на февраль и равнялось 6, что совпадает с

наименьшим количеством солнечных часов. Наибольшее количество солнечных дней не совпало с наибольшим количеством солнечных часов в месяц. Максимальное количество дней зафиксировано в октябре и ноябре, а часов – в апреле и июне, что объясняется высотой стояния солнца, то есть длиной дня в эти месяцы.

В течение 191 дня солнце светило не менее 8 часов, а в течение 150 дней солнце светило почти весь день.

Автор отмечает, что если допустить маловероятное явление, что наблюдаемый год самый солнечный из 27 лет прожитых им в Кисловодске, то и тогда Кисловодск будет занимать середину между средней Италией и центральной Испанией, где солнце светит 2000–3000 часов в год [13].

И. П. Скотовский насчитал 27 дней, в течение которых солнце или вовсе не показывалось или проглядывало на время менее часа, а также выявил, что никогда более двух дней подряд Кисловодск не оставался вовсе без солнца. Это обилие солнца одна из самых привлекательных сторон Кисловодска.

Обилие солнца, при других благоприятных климатических условиях – отсутствие жары летом и значительного холода зимой, отсутствие туманов, сильных и частых ветров, – высокий аргумент в пользу Кисловодска, как климатического лечебного места.

В начале XX в. руководством Кавказских Минеральных Вод был поставлен вопрос о значении Кисловодска как климатического курорта. В этот период были изучены и подробно описаны климатические условия Кисловодска в зимнее время А.И. Воейковым. В 1910 г. ученым было дано заключение о том, что Кисловодск, благодаря обилию солнечных дней, отсутствию сильных ветров, большой редкости ненастья, небольшому количеству осадков и чистому горному воздуху может стать одной из лучших климатических станций. А.И. Воейков отметил, что на пространстве Европейской России Кисловодск – это единственное место с очень солнечным зимним климатом и выгодным транспортно-географическим положением, куда можно доехать по железной дороге [3]. В результате курорт Кисловодск стал приобретать славу климатического курорта не только в теплое время года, но и в холодное. С 1910 г. он начал функционировать круглогодично как горно-климатический курорт. Таким образом, Кисловодск стал не только местом для отдыха и последовательного лечения после лечения гидроминеральными ресурсами в Пятигорске и Ессентуках, но и курортом, на котором с большим успехом стало применяться климатолечение легочных и сердечных заболеваний. С 1 октября 1910 г. в Кисловодске был открыт зимний лечебный сезон. Численность отдыхающих в зимний сезон изменялась следующим образом: 1911 г. – 600 чел., 1912 г. – 800 чел., 1913 г. – 1000 чел. [2].

На рубеже XIX–XX вв. в городах-курортах Кавказских Минеральных Вод появился и приобрел широкую популярность новый метод лечения – ис-

пользование пересеченного рельефа. На курортах начали проводить лечение терренкуром – это лечение дозированными прогулками по пересеченной местности по системе Эртели. Правильно организованные прогулки по горам – это средство, способное быстро восстанавливать здоровье. В таких прогулках сочетается несколько благоприятных для организма условий: высокое местоположение, чистый горный разреженный воздух, солнечный свет и др. Наличие таких условий было отмечено изначально в Железноводске [15]. Но постепенно такой способ лечения появляется и на других курортах региона Кавказских Минеральных Вод. Уже в 1910 г. терренкур в Железноводске имел 8 маршрутов, протяженностью более 10 км; почти 12 км маршрута терренкура было проложено в Кисловодске; были созданы маршруты терренкура в Пятигорске и Ессентуках.

Выводы

Благоприятные климатические условия Кавказских Минеральных Вод и их положительное лечебное влияние на организм человека отмечались местными жителями еще в древности. В XIX в. с возникновением городов-курортов Кавказских Минеральных Вод климат региона приобретает все больший интерес с лечебной точки зрения, появляются первые научные работы о климатических условиях КМВ в ходе проведения метеорологических исследований. С тех пор интерес к климату Кавказских Минеральных Вод постоянно возрастал. Благодаря исследованиям ряда ученых и врачей, работающих на Кавказских Минеральных Водах в конце XIX – начале XX вв. климатические условия региона приобрели большую известность, отдельные работы имели довольно глубокие сведения о климате КМВ, как рекреационном ресурсе.

Значительный вклад в научное изучение климата Кавказских Минеральных Вод как лечебного фактора внесло Русское Бальнеологическое Общество. Ряд работ членов РБО послужили толчком для последующих исследований климата региона и способствовали развитию климатолечения на Кавказских Минеральных Водах.

При изучении климата Кавказских Минеральных вод и отдельных городов-курортов ученые всегда в первую очередь выделяли Кисловодск, как город с большим количеством солнечных дней, в том числе в зимний период. Благодаря исследованиям климатических факторов С.А. Смирнова (1869), П.И. Погожева (1873), П. Скловского (1889), А.И. Воейкова (1910) в 1910 г. Кисловодск становится круглогодичным курортом.

Библиографических список

1. Баталин Ф. А. Пятигорский край и Кавказские Минеральные Воды. СПб, 1861, ч. I-II. 601с.
2. Владикавказская железная дорога и лечебные местности Кавказа. 2-е изд., перераб. Пятигорск, 1915. 55 с.
3. Воейков А.И. Климат Кисловодска в зимнее полугодие и сравнение его с другими климатолечебными местами. СПб., 1910. 35 с.
4. Всероссийский съезд деятелей по климатологии, гидрологии и бальнеологии. I-й 1898 (программа). СПб., 1898. 15 с.
5. Записки Русского Бальнеологического общества в Пятигорске. Т. I. №1, 3, 5-6. Пятигорск, 1898.
6. Зарубин И.О. В Кисловодске как в лечебном приюте для страдающих грудными болезнями // Сборник материалов для изучения Кавказских Минеральных Вод. СПб., 1873. Т. I. С. 255-273.
7. Отчет по управлению Кавказскими Минеральными Водами 1871-1872. Тифлис, 1874. 44 с.
8. Пастернацкий Ф.И. Кисловодск и его лечебные средства: Отчет группового врача за сезон 1890 г. СПб., 1891. 79 с.
9. Поволоцкая Н.П. Климато-курортологические особенности Кавказских Минеральных Вод // Проблемы использования рекреационных ресурсов на курортах Кавказских Минеральных Вод. М., 1986. С. 83-81.
10. Погожев П.И. Кисловодск и его источник Нарзан. СПб., 1873. 346 с.
11. Протоколы заседаний Русского Бальнеологического Общества в Пятигорске. XIV. Пятигорск, 1874.
12. Скотовский П. Кисловодск как место лечения слабогрудных// Сборник материалов для изучения Кавказских Минеральных Вод. СПб., 1873. Т. 1. С. 290-309.
13. Скотовский П.И. Количество солнечных часов в Кисловодске с 6 августа 1898 г. по 6 августа 1899 г.//Записки Русского Бальнеологического общества в Пятигорске. Т. II. №3. Пятигорск, 1899.
14. Смирнов С. Климат Пятигорска//Сборник статистических сведений Ставропольской губернии. Ставрополь, 1869.
15. Терренкуры в Железноводске. Лечение систематическими восхождениями по системе Oertel,а. Пятигорск, 1910. 12 с.

References

1. Batalin F. A. Pyatigorsk region and the Caucasian Mineral Waters. St. Petersburg, 1861, part I-II. 601 p.
2. Vladikavkaz railway and therapeutic areas of the Caucasus. 2nd ed., pererab. Pyatigorsk, 1915. 55 p.
3. Voejkov A.I. Kislovodsk Climate in the winter half-year and its comparison with other climatological places. SPb., 1910. 35 p.
4. The All-Russian Congress of figures in climatology, hydrology and balneology. The I-th 1898 (the program). SPb., 1898. 15 p.

5. Notes of a Russian Balneological society in Pyatigorsk. T. I. No. 1, 3, 5–6. Pyatigorsk, 1898.
6. Zarubin I.O. In Kislovodsk as in a medical shelter for the suffering from thoracic diseases // Collection of materials for studying of the Caucasian Mineral Waters. SPb., 1873. T. I. P. 255-273.
7. Report on management of Caucasian Mineral Waters 1871–1872. Tiflis, 1874. 44 p.
8. Pasternatskij F.I. Kislovodsk and its therapeutic agents: report of the group doctor for the season 1890. St. Petersburg., 1891. 79 p.
9. Povolotskaja N.P. Climatic and balneological features of Caucasian Mineral Waters // Problems of recreational resources use in Caucasian Mineral Waters resorts. M., 1986. P. 83-81.
10. Pogozhev P.I. Kislovodsk and its source Narzan. SPb., 1873. 346 p.
11. Protocols of meetings Of the Russian Balneological Society in Pyatigorsk. XIV Pyatigorsk, 1874.
12. Sklotovskij P. Kislovodsk as the place of treatment of the weak-chested//Collection of materials for the study of the Caucasian Mineral Waters. SPb., 1873. Vol.1. P. 290-309.
13. Sklotovskij P.I. The Number of Sunny hours in Kislovodsk on August 6, 1898 6 Aug 1899//Zapiski of the Russian Balneological society in Pyatigorsk. Vol. III. No. 3. Pyatigorsk, 1899.
14. Smirnov S. The Climate of Pyatigorsk // the Collection of statistical data of the Stavropol province. Stavropol, 1869.
15. Terrenkura in Zheleznovodsk. Treatment systematic climbing on the system of Oertel and. Pyatigorsk, 1910. 12 p.

**Рукопись поступила в редакцию: 12.05.2018,
принята к публикации 26.08.2018**

Об авторах

Зольникова Юлия Федоровна, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры социально-экономической географии, геоинформатики и туризма Северо-Кавказский федеральный университет, ул. Пушкина, 1, к. 2, ауд. 120, Тел. (928) 631-88-30. E-mail: zolnst@mail.ru.

About the authors

Zolnikova Yuliya Fedorovna, candidate of geographical Sciences, associate Professor, associate Professor of the Department of socio-economic geography, Geoinformatics and tourism North Caucasus Federal University, Pushkin str., 1, building 2, AUD. 120, Tel. (928) 631-88-30. E-mail: zolnst@mail.ru.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, ПОЛИТИЧЕСКАЯ
И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

УДК 314.9

Черкасов А.А.
Чернова И.В.

Северо-Кавказский федеральный университет,
г. Ставрополь, Россия
cherkasov_stav@mail.ru

**ЭТНИЧЕСКАЯ КАРТА КАРАЧАЕВО-
ЧЕРКЕССКОЙ РЕСПУБЛИКИ:
ВТОРАЯ ПОЛОВИНА XX НАЧАЛО XXI ВЕКА**

Введение:

На протяжении последних 50 лет в Республике Карачаево-Черкесия наблюдается трансформация этнической структуры населения, а вместе с ней и изменение географии расселения титульных этносов республики. Изучение этих процессов требует особого внимания, т.к. данный регион традиционно является многонациональным, а любые изменения в этнонациональной сфере происходят более чувствительно. Таким образом, цель исследования – изучение этнической структуры населения и особенностей расселения титульных этносов в Карачаево-Черкессии во второй половине XX и в начале XXI века.

Материалы и методы
исследования:

в ходе исследования использованы авторские разработки – ГИС: «Горное расселение Северного Кавказа» и «Атласная информационная система «Расселение народов в России». В работе применяются такие методы и способы как: картографический, сравнительный, статистического анализа. Полимасштабный подход является ключевым, т.к. он позволил изучить этническую структуру населения как в целом в республике, так и на уровне отдельных муниципальных образований.

Результаты исследований
и их обсуждение:

в работе подробно рассмотрены особенности расселения 5 титульных этносов Республики Карачаево-Черкесия: абазин, карачаевцев, ногайцев, русских, черкесов. Анализ представлен по периодам: советский (с 1959 по 1989 г.) и постсоветский (с 1989 по 2010 г.). Уделяется особое внимание изменениям этнических пропорций на уровне муниципальных районов, а также описаны события и процессы, которые в разной степени способствовали изменению этнической структуры населения республики. Авторами рассмотрены особенности вовлечения титульных этносов Карачаево-Черкесии в урбанизационные процессы.

Основные выводы
и дискуссия:

авторами сделан ряд выводов, в том числе отмечается, что этническая структура населения, а вместе с ней и география расселения этносов в Карачаево-Черкессии, во второй половине XX – начале XXI века менялась под влиянием роста (сокращения) численности отдельных этносов. Рост численности происходил за счет активных демографических процессов, в первую очередь у карачаевцев, и в меньшей степени абазин, черкесов, ногайцев, на этом фоне активные миграционные процессы – выезд русских за пределы республики в постсоветский период – влияли на сокращение их численности. Карачаевцы достаточно активно расширили свой ареал расселения, в первую очередь за счет муниципальных районов, компактного проживания русских. Черкесы, абазины и ногайцы фактически не расширяют свой ареал расселения, в постсоветский период у абазин и ногайцев наблюдается повышенная концентрация численности в населенных пунктах, составляющих традиционный ареал их расселения. На современном этапе наблюдается участие в урбанизационных процессах титульных этносов республики.

Ключевые слова:

этническая структура населения, система расселения, урбанизация, Республика Карачаево-Черкесия, геоинформационные технологии.

Cherkasov A.A.
Chernova I.V.

North-Caucasian Federal University,
Stavropol, Russia

THE ETHNIC CARD OF THE KARACHAYEVO- CHERKES REPUBLIC: THE SECOND HALF XX THE BEGINNING OF THE XXI CENTURY

Introduction:

Karachay-Cherkessia is a type of regions in which there is an active change in the ethnic structure of the population. Over the past 50 years, there have been changes in proportions in the ethnic structure of the region's population, as well as changes in the geography of the resettlement of the titular ethnic groups of the republic. The purpose of the study is to conduct a comparative analysis of the resettlement of titular ethnic groups in Karachaevo-Cherkessia in the second half of the XX century and at the beginning of the 21st century.

Materials and methods of research:

author's GIS: "Mountainous settlement of the North Caucasus" and "Atlas Information System" Settlement of Peoples in Russia "were used. Cartographic methods and methods are applied as well as the method of statistical analysis, the Comparative method. The multiscale approach is the key, allowed to study the ethnic structure in general in the republic and at the level of individual municipalities.

The results of the research and their discussion: the work details the resettlement of 5 titular ethnic groups of the Republic of Karachaevo-Cherkessia: Abazin, Karachais, Nogais, Russians, Circassians. The analysis is presented for the periods: Soviet from 1959 to 1989 and post-Soviet from 1989 to 2010. A significant place is given to the peculiarities of changing ethnic proportions at the level of municipal districts, as well as events and processes that to varying degrees contributed to a change in the ethnic structure of the population of the republic. The authors consider the features of the involvement of the titular ethnic groups of Karachay-Cherkessia in urbanization processes.

The main conclusions and discussion:

the authors made a number of conclusions, including that the ethnic structure of the population, and with it the geography of the settlement of ethnic groups in Karachaevo-Cherkessia during the second half of the XXth century beginning of the 21st century, changed under the influence of the growth (reduction) in the number of individual ethnic groups. The growth in numbers was due to active demographic processes, primarily among the Karachais, and to a lesser extent the Abazin, Circassians, and Nogais, against this background active migration processes - the departure of Russians outside the republic in the post-Soviet period influenced their decline in numbers. Karachaevs quite actively expanded their settlement area, primarily due to the municipal districts, the compact residence of Russians. Circassians, Abazins and Nogais practically do not expand their settlement area; in the post-Soviet period, the Abazin and Nogai people have an increased concentration of populations in the settlements that make up the traditional area of their resettlement. At the present stage there is an active involvement of the titular ethnoses of the republic in urbanization processes.

Key words:

ethnic structure of the population, settlement system, urbanization, Republic of Karachaevo-Cherkessia, geoinformation technologies.

Введение

Северный Кавказ – традиционно многонациональный регион, при этом за последние 50 лет наблюдаются активные изменения в этнической структуре населения. На современном этапе усиливается роль титульных этносов за счет увеличения их численности в структуре населения и сокращения численности русских и других не титульных народов, что приводит к усилению моноэтничности республик. У отдельных титульных этносов отмечается расширение границ ареалов расселения, в первую очередь за счет активных демографических процессов, а также сокращения сети сельских и образования городских поселений [4]. Важным аспектом является вовлечение титульных этносов республик Северного Кавказа в урбанизационные процессы, в том числе за счет формирования сети городских поселений на территориях их компактного проживания [12].

Карачаево-Черкесская Республика (КЧР) относится к группе регионов с активно меняющимся этническим составом населения [11]. В республике расселены 5 титульных этносов (абазины, карачаевцы, ногайцы, русские, черкесы), традиционно имеющих свои ареалы расселения, в целом совпадающих с административными границами муниципальных районов. Отметим, что исторически карачаевцы расселены в более горной (южной) части республики, черкесы и абазины в предгорной, более равнинной (центральной и северной), ногайцы в равнинной (северной) части республики [5]. Расселение русских, проживающих в КЧР, связано с историей кубанского казачества, расселялись, в первую очередь, в станицах, в юго-западной и центральной частях республики.

Титульные этносы Карачаево-Черкесии, с точки зрения принадлежности к языковым семьям и группам, являются разнородными. Так, карачаевцы и ногайцы относятся к тюркской группе алтайской языковой семьи, черкесы и абазины к абхазо-адыгской группе северокавказской языковой семьи, русские к славянской группе индоевропейской языковой семьи.

В течение последних 60 лет в республике наблюдается трансформация сети поселений, в том числе связанная с административно-территориальными изменениями: образованием городских поселений, а затем переводом отдельных пгт в сельские поселения, образованием муниципальных районов по этническому признаку [3]. Постсоветский период принёс свои проблемы, прежде всего связанные с социально-экономическим кризисом. Так, КЧР раньше других национальных образований Северного Кавказа стала относиться к «абсолютно-депрессивным» регионам. На этом фоне наблюдался активный миграционный отток населения за пределы республики, а в силу особенностей этнической структуры населения отмечалась существенная дифференциация демографических процессов муниципальных районов [1]. Все это сопровождалось обострением межнациональных отношений – парадой суверенитетов. Эти процессы и факторы повлияли на формирование современной этнической карты республики.

Материалы и методы исследования

Авторский коллектив на протяжении ряда лет занимается исследованием этнической структуры населения регионов России, применяя геоинформационный метод в качестве базового. В этой связи активно используются две авторские ГИС: «Горное расселение Северного Кавказа»¹, и «Атласная информационная система «Расселение народов в России»². Геоинформационные системы развернуты на программной платформе ArcGis Spatial Analyst фирмы ESRI, что позволило беспрепятственно интегрировать базы данных ГИС. В качестве исходных статистических данных, характеризующих этническую структуру населения, демографические и миграционные процессы, административно-территориальное устройство, а также сеть поселений, использовались результаты переписей населения (РСФСР: 1959, 1970, 1979, 1989; РФ: 2002, 2010), материалы Госкомстата РФ, а также нормативно-правовые акты КЧР [15].

В исследовании применяются такие методы и способы как: картографический, сравнительный, статистического анализа. Использование картографического метода позволило подготовить серию карт, способствующих более детальному анализу особенностей формирования этнической структуры населения; метод статистического анализа дает возможность провести оценку количественных показателей, характеризующих этническую структуру населения, демографические и миграционные процессы. С помощью сравнительного метода нам удалось сопоставить этническую структуру населения в пространстве и во времени. Применение полимасштабного подхода также играет важную роль, так как это позволило оценить в целом общереспубликанские тенденции и более подробно проанализировать этнические процессы на муниципальном уровне.

Результаты исследований и их обсуждение

С 1957 г. Карачаево-Черкесия получила статус Автономной области в составе Ставропольского края и приобрела современные административные границы. В 1959 г. численность населения КЧР составляла 277,9 тыс. чел. В значительной степени преобладало сельское население, удельный вес которого в 1959 г. составил 76,4% (рис. 1). Сеть городских поселений была представлена следующими населенными пунктами: республиканский центр – город Черкесск (1931 г.³) (14,6% населения республики),

- 1 ГИС «Горное расселение Карачаево-Черкессии» (свидетельство о регистрации базы данных №2016621311 от 23.09.2016 г.) Чернова И.В., Турун П.П.
- 2 Атласная информационная система «Расселение народов в России» (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2013620523 от 17 апреля 2013 г.) Белозеров В.С., Панин А.Н., Черкасов А.А., Коржов И.Ю.
- 3 Здесь и далее годы образования городских поселений.

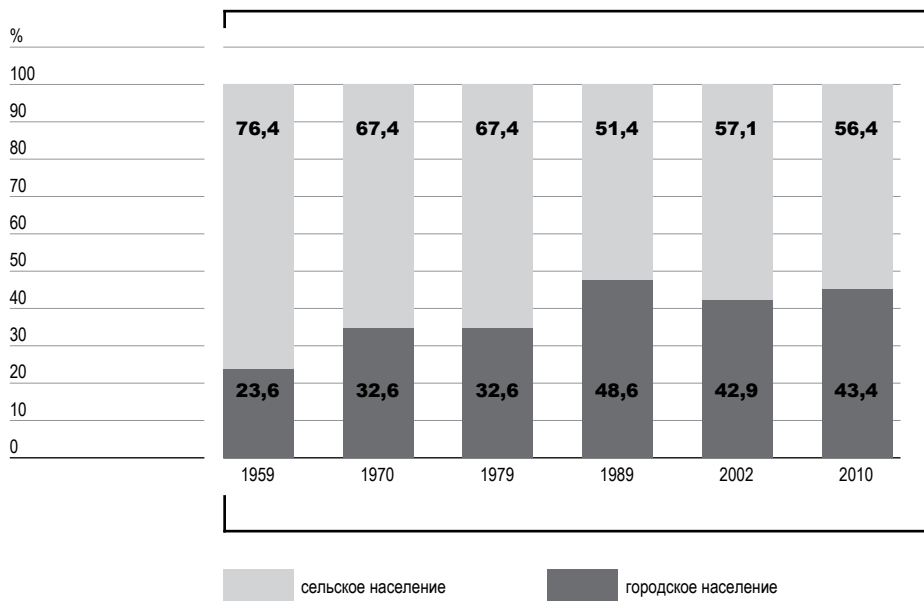


Рис. 1. Удельный вес городского и сельского населения в Республике Карачаево-Черкесия, 1959–2002 гг., %

Fig. 1. Share of urban and rural population in the Republic of Karachaevo-Cherkessia, 1959-2002, %

город Карачаевск (1929 г.), пгт Орджоникидзевский (1938 г.), пгт Эльбрусский (1953 г.), пгт Новый Карачай (1958 г.), пгт Уруп (1958 г.).

Что касается распределения населения по муниципальным районам, то наиболее населенным в 1959 г. являлся Зеленчукский район (55,5 тыс. чел.) и городской округ Черкесск (41,7 тыс. чел.), в остальных численность составляла от 20 до 29 тыс. чел. [13] (табл. 1).

В этот период в этнической структуре населения преобладают русские, их удельный вес составил 51% (рис.2). География их расселения в республике складывалась не равномерно. Так, русские преобладали в Урупском (80,6%), Зеленчукском (76,5%) и Прикубанском (47,6%), районах, а также в городах – Черкесске (89,2%) и Карачаевске (61,8%) (рис.3). Достаточно высокий удельный вес отмечается в тот период в Усть-Джегутинском (43,1%) и Адыге-Хабльском (24,1%) районах, где они вторые по численности. Вторыми по численности они были и в Карачаевском районе, но здесь их доля была значительно ниже и составляла 8,7%. В Малокарачаевском районе русские являлись третьими по численности, но при этом их удельный вес составлял 16,2%.

Карачаевцы в 1959 г. по численности второй этнос республики, удельный вес в структуре населения составлял 24,4%. Ареал их расселения формировался в горной части республики, в основном концентрировался в

Таблица 1. ЧИСЛЕННОСТИ НАСЕЛЕНИЯ МУНИЦИПАЛЬНЫХ РАЙОНОВ И ГОРОДСКИХ ОКРУГОВ, ЧЕЛ.
Table 1. Population sizes of municipal districts and urban districts, people

		1959	1970	1979	1989	2002	2010
1	Черкесский городской округ	41709	67186	90907	112307	116163	127544
2	Карачаевский городской округ	20625	26489	26540	34203	37392	39532
3	Абазинский						16997
4	Адыге-Хабльский	22325	26840	25449	26876	28426	16064
5	Зеленчукский	55500	55482	51654	52020	53414	51393
6	Карачаевский	20740	21747	22630	25177	26255	30199
7	Малокарачаевский	23176	29350	32048	36613	39453	43024
8	Ногайский						15447
9	Прикубанский	25500	32387	31519	32750	35547	29191
10	Урупский	24071	22862	22281	21769	18654	24320
11	Усть-Джегутинский	28410	36171	38112	46332	52193	50407
12	Хабезский	22667	26337	25971	26923	31885	30242

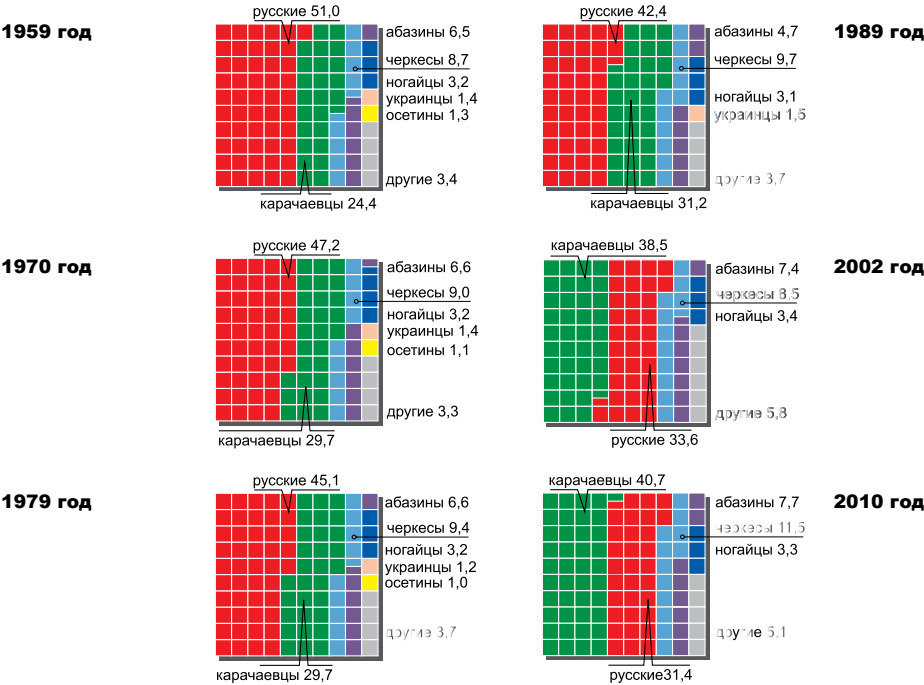


Рис. 2. Этническая структура населения Республики Карачаево-Черкесия, 1959–2010 гг., %
Fig. 2. The ethnic structure of the population of the Republic of Karachay-Cherkessia, 1959–2010, %

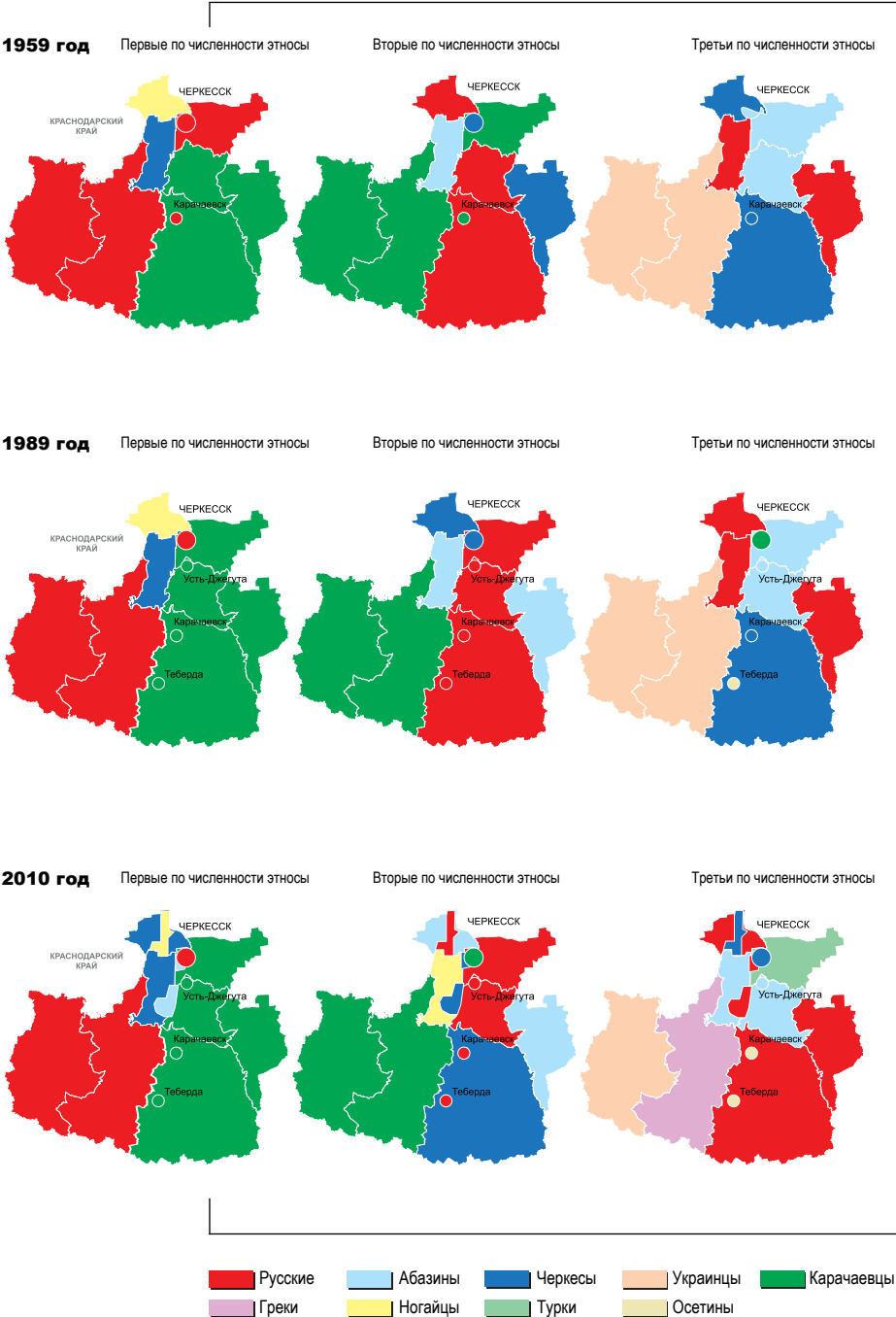


Рис. 3. Первые, вторые, третьи этносы в муниципальных районах и городах Республики Карачаево–Черкесия, 1959, 1989 и 2010 гг., %

Fig. 3. The first, second, third ethnic groups in the municipal districts and cities of the Republic of Karachaevo-Cherkessia, 1959, 1989, 2010, %

границах трех муниципальных районов: Карачаевском (70,3%), Малокарачаевском (61,0%) и Усть-Джегутинском (48,2%), где они были преобладающим по численности этносом. Важно отметить депортацию карачаевцев в Центральную Азию 1943 г. и их возвращение только в 1957 г. [8]. Это событие оставило значимый след на их расселении в пределах республики.

Черкесы являлись третьим по численности населения этносом республики с удельным весом 8,7%. Преобладали по численности в Хабезском (73,8%) и вторыми в Адыге-Хабльском районе (19,2%) и городе Черкесске (2,1%).

Абазины, являясь коренным малочисленным народом Российской Федерации, были четвертыми по численности этносом и имели удельный вес 6,5%. Ни в одном из районов республики они не преобладали, при этом были вторыми по численности в Хабезском (14,2%), третьими в Прикубанском (13,9%) и Усть-Джегутинском (7,8%) районах. Достаточно высок их удельный вес в Адыге-Хабльском районе (17,2%).

Ногайцы являлись пятым по численности этносом с удельным весом 3,2%, концентрировались они преимущественно в Адыге-Хабльском районе, где по численности в 1959 г. они преобладали с удельным весом 17,2%.

В период с 1959 по 1989 г. в республике наблюдался ряд процессов, в той или иной степени повлиявших на географию расселения отдельных этносов. В этот период произошло образование новых городских поселений, в том числе путем преобразования сельских населенных пунктов в городские поселения, что несомненно повлияло на рост городского населения в целом и рост уровня урбанизированности отдельных титульных этносов [6]. Так были образованы города: индустриальный центр республики г. Усть-Джегута (1975 г.) и центр климато-бальнеологического лечения г. Теберда (1971 г.). Образованы поселки городского типа: рекреационный центр горно-спортивного туризма Домбай (1965 г.); лесопромышленный центр Курджиново (1961), центры горнодобывающей промышленности: пгт Медногорский (1981 г.), Центр пищевой промышленности (производство сахара) Эркен-Шахар (1962 г.), посёлок энергетиков Ударный (1965 г.), Правокубанский (1984 г.). Важно отметить, что после 1970 г. динамика сети поселений значительно меняется, наблюдается сокращение сети в результате особенностей государственной политики в области расселения (свертывание сети малокомплектных школ, закрытие «неперспективных» сел и т.д.) и естественного хода эволюции сети.

К 1989 г. численность населения в республике по отношению к 1959 г. выросла на 66,5% и составила 417,6 тыс. чел. Что касается распределения населения по муниципальным районам, то наиболее населенным в 1989 г. остался Зеленчукский район, при этом его численность немного сократилась до 52,0 тыс. чел. В городском округе Черкесске проживало 112,3 тыс. чел., в остальных численность составляла от 21,7 тыс. чел. в Урупском до 46,3 тыс. чел. в Усть-Джегутинском районе.

Пропорциональное соотношение этносов в республике принципиально не изменилось, численность русских к 1989 г. продолжала расти, что подтверждает перепись населения, при этом их удельный вес сократился до 42,4%. В первую очередь это объясняется более активным ростом численности карачаевцев, у которых в этот период отмечался высокий демографический прирост. Их удельный вес вырос в 1989 г. до 31,2%. Что касается внутрирегиональных особенностей расселения, то русские в этот период преобладали только в Урупском (76,6%) и Зеленчукском (66,5%) районах и городе Черкесске (67,8%). В Прикубанском (24,7%), Усть-Джегутинском (34,3%) и Карачаевском (10,5%) районах, городах Карачаевске и Теберде они являлись вторыми по численности, и третьими по численности в Адыге-Хабльском, Хабезском и Малокарачаевском районах.

Карачаевцы увеличили свой удельный вес фактически во всех районах и городах, за исключением Урупского (16%) и Хабезского (0,5%) районов. Закрепили лидерство по удельному весу в структуре населения в Карачаевском (73,9%), Малокарачаевском (75,2%), Усть-Джегутинском (51,8%) районе, вышли в лидеры по этому показателю в Прикубанском (49,7%) районе и в городах Карачаевске (44,9%) и Теберде. Вторым этносом по численности они остались в Урупском (16%) и Зеленчукском (27,8%) районах, а также стали третьими в г. Черкесске (7,8%).

Что касается черкесов, то их численность продолжала расти, немного вырос и их удельный вес до 9,7%. По численности они также преобладали в Хабезском районе где их доля выросла до 78,3%. Вторыми по численности черкесы стали в Адыге-Хабльском районе (19,1%) (прежде всего за счет сокращения численности русских), а также городах Черкесске и Усть-Джегуте.

Численность абазин также увеличилась, но по причине своей малочисленности, на фоне более многочисленных этносов (прежде всего карачаевцев), они сократили свой удельный вес до 4,7%. Остались они вторыми по численности в Хабезском (15,3%) районе, ввиду активного сокращения численности русских, стали вторыми в Малокарачаевском (9,4%) районе. Увеличив свой удельный вес в Прикубанском (16,2%) и сократив в Усть-Джегутинском (6,8%) районе, абазины остались по численности третьими.

Что касается ногайцев, то их численность продолжала увеличиваться, сохраняя долю в структуре населения республики на уровне 3,1%. Ногайцы упрочили лидерство по численности в Адыге-Хабльском районе (37,4%).

Конец советского и начало постсоветского периода привнесли новые веяния, в том числе повлиявшие на этническую структуру населения КЧР. Так, в 1990 г. Карачаево-Черкесская автономная область выходит из состава Ставропольского края, в последующем в республике обостряется национальный вопрос. Данный период принято называть парадом сувере-

нитетов [10]. Прямого межэтнического противостояния не произошло, но как показывает ряд исследований того периода, межэтническая напряжённость была на достаточно высоком уровне [2]. Ситуация дошла до референдума, на котором обсуждалась административная целостность региона, по результатам которого целостность удалось сохранить. В значительной степени сыграли и проблемы социально-экономического характера постсоветского периода (закрывались производства, росла безработица, ухудшалась социальная инфраструктура). Все это повлияло на миграционный отток населения из республики [14]. В первую очередь в миграциях принимали участие русские и другие не титульные этносы (украинцы, армяне, евреи и др.). Несмотря на то, что в 2000-х г. ситуация начала меняться, инерционные процессы этнической консолидации для титульных этносов продолжились. В первую очередь они привели к разделению отдельных муниципальных районов по национальному признаку. Так, в 2005 г. принято решение об образовании Абазинского муниципального района из населённых пунктов с преобладающим населением абазин. По факту это поселения, ранее входившие в Хабезский, Прикубанский и Усть-Джегутинский район. В 2006 г. принято решение об образовании Ногайского района, и уже в 2008 г. сельские поселения с компактным проживанием ногайцев выделены в самостоятельную административную единицу. Они были выведены из состава Адыге-Хабльского района. Важно подчеркнуть, что при организации новых муниципальных районов никакие социально-экономические, транспортно-географические особенности, кроме национального состава населённых пунктов (сельских поселений), в целом не учитывались. Данные процессы позволили отдельным этносам максимально сконцентрировать свои ареалы расселения вокруг национальных районов.

С начала 1990-х гг. новые поселения практически не образовывались, стабильность сети выражалась в постоянстве числа населённых пунктов. При этом статус некоторых поселений был изменён с городских на сельские: пгт Эркен-Шахар (с 1992 г.), пгт Курджиново (с 1995 г.), пгт Уруп (с 1997 г.). Данное реформирование напрямую повлияло на урбанизированность республики, доля городского населения сократилась в 2002 г. до 42,9% (в 1989 г. показатель составлял 48,6%).

Что касается этнической структуры населения, то ситуация на современном этапе следующая: перепись населения 2002 г. зафиксировала, что карачаевцы стали первым по численности этносом республики с удельным весом 38,5%. В дальнейшем эта тенденция усилилась, доля карачаевцев в 2010 г. составила 40,7%. Данный процесс стал возможен за счёт сохранения положительного демографического прироста. При этом русские активно выезжали за пределы республики, отток сопровождался отрицательными демографическими процессами [7]. К 2002 г. численность русских сократилась ниже уровня 1959 г. (до 147,9 тыс.). В дальнейшем ситуация немно-

го улучшилась, и уже в 2010 г. численность составила 150,0 тыс. Это привело к тому, что они стали вторым по численности этносом в республике, а их удельный вес в 2010 г. составил 31,4%. Важно отметить, что русские сохранили свое лидерство по численности в Урупском (77,6%) и Зеленчукском (62,3%) районах, в г. Черкесске (54,7%). Во всех остальных муниципальных районах и городах доля русских сократилась. Вторыми по численности они стали в Прикубанском (17,7%), Усть-Джегутинском (21,9%) и Ногайском (12,4%) районах. Третьи по численности русские в Карачаевском (3,4%), Малокарачаевском (2,2%), Адыге-Хабльском (10%), Абазинском (4,1%) районах и г. Усть-Джегута (17,3%).

Карачаевцы в большинстве районов продолжили увеличивать свой удельный вес, в 2010 г. они сохранили свое лидерство в Малокарачаевском (87,5%), Прикубанском (75,1%) и Усть-Джегутинском (69,3%) районах, а также Карачаевском ГО (75,3%). Вторыми по численности они остались в Урупском (18,3%) и Зеленчукском (33,1%) районах, а также стали вторыми в г. Черкесске (16,4%).

Черкесы к 2010 г. также увеличили свою численность и удельный вес до 11,5%. В связи с тем, что административные реформы коснулись территорий компактного проживания черкесов, а населенные пункты, в которых преобладали абазины и ногайцы, вывели из состава Хабезского и Адыге-Хабльского района, в этих районах доля черкесов увеличилась до 95,5% и 39,3% соответственно. Вторые по численности черкесы только в Абазинском (5,0%) и Карачаевском (5,0%) районе, третьи в Ногайском (3,1%) районе и г. Черкесске (13,2%).

Абазины к 2010 г. увеличили свою численность и удельный вес до 7,7%. Как было сказано раньше, образование Абазинского района по факту позволило выделить моноэтничную административную единицу. Доля абазин здесь составила 87,1%. Вторыми по численности абазины стали в Адыге-Хабльском (30%) и Малокарачаевском (7,8%), третьими в Усть-Джегутинском (4,5%) и Хабезском (1,2%) районах.

Ногайцы немного увеличили свою численность к 2010 г., их удельный вес остался фактически неизменным – 3,3%. Ногайцы значительно преобладают в Ногайском (76,7%) и стали вторыми по численности в Хабезском районе (2%).

Этнические особенности урбанизации в Карачаево-Черкессии

Необходимо отметить, что степень вовлеченности этносов в урбанизационные процессы в Карачаево-Черкессии на всех этапах различна. На протяжении всего рассматриваемого периода русские являются наиболее урбанизированным этносом. Среди русских удельный вес горожан в 1959 г. составил 33,7% что ниже общероссийского показателя (52,2%), но выше

среднего показателя по республике (23,6%). У других этносов доля городского населения ещё ниже: карачаевцы (7,1%), черкесы (5,9%), абазины (6,7%), ногайцы (3,9%).

К концу советского периода уровень урбанизированности республики вырос, удельный вес городского населения в 1989 г. достиг абсолютного максимума 48,6% (в дальнейшем показатель снизился). Среди этносов также вырос данный показатель, в том числе у русских до 68,4% (в среднем по стране 73,4%), у абазин до 34,4%, карачаевцев и черкесов до 30%, ногайцев до 25,4% [12].

В постсоветский период произошли следующие изменения: доля городского населения в 2010 г. в республике снизилась до 43,4%, у русских данный показатель опустился до 61,5%. Также доля горожан сократилась у ногайцев до 12,9%, и у абазин до 33,8%. Среди карачаевцев удельный вес горожан вырос до 36%, у черкесов до 31,2%. Важно отметить, что на всех этапах не титульные этносы, проживающие в республике, обладали более высокой долей городского населения. Например, в 2010 г. доля горожан в КЧР среди армян составила 70,0%, а среди азербайджанцев 68,4%.

Что касается этнической структуры городских поселений КЧР, то на современном этапе выявлены следующие особенности: русские преобладают в республиканском центре – г. Черкесске, их удельный вес в структуре населения в 2010 г. составляет 54,1%, далее идут карачаевцы (16,2%) и черкесы (13,0%), другие этносы составляют оставшиеся 16,7%. Также русские преобладают в пгт Медногорский (88,2%). В остальных городских поселениях Карачаево-Черкесии, в том числе в городах Усть-Джегута и Карачаевск, преобладают карачаевцы, а вторые по численности русские. В пгт Новый Карачай доля карачаевцев составляет в 2010 г. 99,0%.

Основные выводы и дискуссия

Этническая структура населения, а вместе с ней и география расселения народов в Карачаево-Черкесии, на протяжении второй половины XX – начала XXI века менялась. Во-первых, изменения связаны с ростом численности карачаевцев, черкесов, абазин и ногайцев. Их удельный вес в структуре населения растет, в настоящее время лидеры по данному показателю – карачаевцы. На этом фоне русские, а вместе с ними другие не титульные этносы (украинцы, белорусы, армяне и др.), в постсоветский период сокращают численность населения. В настоящее время русские являются вторым по численности этносом.

Во-вторых, для карачаевцев характерно активное расширение ареала расселения, в первую очередь за счет Зеленчукского, Усть-Джегутинского районов, территорий компактного проживания русских, а также города Черкесска. При этом карачаевцев фактически нет в населенных пунктах компактного проживания черкесов, абазин и ногайцев.

В-третьих, черкесы, абазины и ногайцы фактически не расширяют свои ареалы расселения, сохраняя их традиционные границы. В постсоветский период у абазин и ногайцев наблюдается повышенная концентрация численности в населенных пунктах, составляющих традиционный ареал расселения. При этом абазины и черкесы расселяются в городе Черкесске.

В-четвертых, на современном этапе наблюдается вовлечение в урбанизационные процессы титульных этносов республики. Однако, удельный вес городского населения у карачаевцев, черкесов, абазин и ногайцев не дотягивает до среднего показателя по республике [11]. Русские, а также другие не титульные этносы остаются наиболее урбанизированными, проживают преимущественно в городской местности, в первую очередь в г. Черкесске [9] и других индустриальных центрах республики.

Библиографический список

1. Аргунова Ж.А. Демографические процессы и их регулирование в Карачаево-Черкесской Республике: дис. ... кандидата экономических наук. Ставрополь, 2007. 223 с.: ил.
2. Апажева Е.Х. Межнациональные отношения в процессах общественной трансформации в этнически родственных Республиках Северного Кавказа (Кабардино-Балкария, Карачаево-Черкесия, Республика Адыгея). 1985-2000 гг.: дис. ... доктора исторических наук: Владикавказ, 2003. 390 с.
3. Белозеров В.С., Белозерова Л.П., Турун П.П. Эволюция расселения Ставрополья и Карачаево-Черкесии. М.; Ставрополь, 1993. 210 с.
4. Белозеров В.С. Этническая карта Северного Кавказа: монография. М., 2005. 304 с.
5. Волкова Н.Г. Миграция и этнокультурная адаптация горцев в условиях равнинного Кавказа (XIX–XX вв.) // Этнические процессы в современном мире. М., 1987. С. 125–143.
6. Лаппо Г.М. Поселки городского типа Российской Федерации: место в урбанистической и территориально-урбанистической структурах страны, новые тенденции развития / Г.М. Лаппо // Проблемы населения и рынков труда России и Кавказского региона. – Москва - Ставрополь: Изд-во СГУ, 1998. 176 с.
7. Панин А.Н., Белозеров В.С., Фурщик М.А., Приходько Р.А., Черкасов А.А., Махмудов Р.К., Клементьев Ю.В., Антипов С.О. Русский барометр Северного Кавказа // ArcReview. 2015. 1(72)
8. Полян П.М. Не по своей воле... История и география принудительных миграций в СССР. М.: Изд-во "ОГИ-Мемориал", 2001. 328 с.
9. Трифонова З.А. Особенности этнокультурной среды в столицах и городах национально-территориальных образований России / З.А. Трифонова // Региональные исследования. Смоленск, 2006. №1. С. 22–28.
10. Цуциев А.А. Атлас этнополитической истории Кавказа (1774-2004). М.: Европа, 2006. 128 с.

11. Черкасов А.А. Этнические аспекты урбанизации в России. Ставрополь: изд-во ФОК-Юг, 2016. 240 с.: ил.
12. Черкасов А.А. Мониторинг этнических аспектов урбанизации в России на основе ГИС-технологий / дис. ...канд. геогр. Ставрополь, 2013.
13. Чернова И.В. Миграционная подвижность в сельской местности республики Карачаево-Черкесия / И.В. Чернова // Наука. Инновации. Технологии. 2013. №4. С. 71-81.
14. Чернова И.В. Геоинформационный анализ эволюции расселения Республик Северного Кавказа / П.П. Турун, И.В. Чернова // ИнтерКарто/ИнтерГИС-21. Устойчивое развитие территорий: картографо-геоинформационное обеспечение: материалы международной научной конференции. Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2015. 653 с. С.149-153.
15. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Карачаево-Черкесской Республике [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://kchrstat.gks.ru/default.aspx>, свободный.

References

1. Argunova Zh.A. Demograficheskie processy i ih regulirovanie v Karachaevo-Cherkesskoj Respublike (Demographic processes and their regulation in the Karachay-Cherkess Republic): dissertaciya kandidata ehkonomicheskikh nauk: 08.00.05. Stavropol', 2007. 223 p. (in Russ).
2. Apazheva E.Kh. Mezhnacional'nye otnosheniya v processah obshchestvennoj transformacii v ehnicheski rodstvennyh Respublikah Severnogo Kavkaza (Kabardino-Balkariya, Karachaevo-Cherkesiya, Respublika Adygeya) (Interethnic relations in the processes of social transformation in ethnically related Republics of the North Caucasus (Kabardino-Balkaria, Karachaevo-Cherkessia, Republic of Adygea). 1985-2000: dissertaciya doktora istoricheskikh nauk: 07.00.02. Vladikavkaz, 2003. 390 p. (in Russ).
3. Belozеров V.S, Belozерova L.P, Turun P.P. EHvoluciya rasseleniya Stavropol'ya i Karachaevo-Cherkessii (Evolution of the settlement of Stavropol and Karachay-Cherkessia). M.; Stavropol, 1993. 210 p. (in Russ).
4. Belozеров V.S. Etnicheskaya karta Severnogo Kavkaza: monografiya (Ethnic map of the North Caucasus: monograph). M., 2005. 304 p. (in Russ).
5. Volkova N.G. Migraciya i ehtnokul'turnaya adaptaciya gorcev v usloviyah ravinnogo Kavkaza (XIX–XX vv.) (Migration and ethno cultural adaptation of mountain people in the conditions of the plains of the Caucasus (XIX–XX centuries): EHnicheskie processy v sovremennom mire. M., 1987. P. 125-143. (in Russ).
6. Lappo G.M. Poselki gorodskogo tipa Rossijskoj Federacii: mesto v urbanisticheskoy i territorial'no-urbanisticheskoy strukturah strany,

- novye tendencii razvitiya (Urban settlements of the Russian Federation: a place in the urban and territorial-urban structure of the country, new development trends): Problemy naseleniya i rynkov truda Rossii i Kavkazskogo regiona. Moscow; Stavropol: Publishing House of the SSU, 1998. 176 p. (in Russ).
7. Panin A.N, Belozero V.S, Furshchik M.A, Prihodko R.A, Cherkasov A.A, Makhmudov R.K, Klementyev Yu.V., Antipov S.O. Russkij barometr Severnogo Kavkaza (Russian Barometer of the North Caucasus): ArcReview. 2015. 1 (72) (in Russ)
 8. Polyan P.M. Ne po svoej vole... Istoriya i geografiya prinuditel'nyh migracij v SSSR (Not at will... History and geography of forced migrations in the USSR). M.: Publishing house "OGI-Memorial", 2001. 328 p. (in Russ).
 9. Trifonova Z.A. Osobennosti etnokul'turnoj sredy v stolicah i gorodah nacional'no-territorial'nyh obrazovanij Rossii (Features of the ethno-cultural environment in capitals and cities of national-territorial entities of Russia): Regional studies. Smolensk, 2006. №1. P. 22–28. (in Russ).
 10. Tsutsiev A.A. Atlas etnopoliticheskoj istorii Kavkaza (1774-2004) (Atlas of the ethnopolitical history of the Caucasus (1774-2004)). M.: Europe, 2006. 128 p. (in Russ).
 11. Cherkasov A.A. Etnicheskie aspekty urbanizacii v Rossii (Ethnic aspects of urbanization in Russia): Stavropol: FOK-South, 2016. 240 p.: ill. (in Russ).
 12. Cherkasov A.A. Monitoring etnicheskikh aspektov urbanizacii v Rossii na osnove GIS-tehnologij (Monitoring of ethnic aspects of urbanization in Russia on the basis of GIS-technologies) / dissertaciya kandidata geograficeskikh nauk; Stavropol, 2013. (in Russ).
 13. Chernova I.V. Migracionnaya podvizhnost' v sel'skoj mestnosti respublik Karachaevo-CHerkessiya (Migration mobility in rural areas of the Republic of Karachay-Cherkessia): Nauka. Innovacii. Tekhnologii. 2013. №4. P. 71-81. (in Russ).
 14. Chernova I.V. Geoinformacionnyj analiz ehvolucii rasseleniya Respublik Severnogo Kavkaza (Geoinformation Analysis of the Evolution of the Settlement of the Republics of the North Caucasus): InterCarto/InterGIS-21. Krasnodar: Kubanskij gos. un-t, 2015. 653 p. (in Russ).
 15. Territorial'nyj organ Federal'noj sluzhby gosudarstvennoj statistiki po Karachaevo-CHerkesskoj Respublike [EHlektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://kchrstat.gks.ru/default.aspx>, svobodnyj (in Russ).

**Рукопись поступила в редакцию: 13.06.2018,
принята к публикации 26.08.2018.**

Об авторах

Черкасов Александр Александрович, кандидат географических наук, доцент кафедры социально-экономической географии, геоинформатики и туризма Северо-Кавказского федерального университета. Scopus ID: 57192379694, Researcher ID: 57192379694 Телефон: +7(906) 460-99-98. E-mail: cherkasov_stav@mail.ru

Чернова Ирина Владимировна, кандидат географических наук, доцент кафедры социально-экономической географии, геоинформатики и туризма Северо-Кавказского федерального университета. Scopus ID: 57195869694, Researcher ID: 57195869694 Телефон: +7(918) 885-79-37. E-mail: chernova_skfu@mail.ru.

About the authors

Cherkasov Alexander Alexandrovich, Candidate of geographical sciences, associate professor of the department of socio-economic geography, geoinformatics and tourism of the North-Caucasus federal university. Scopus ID: 57192859694, Researcher ID: 57192379694 Phone: +7(906) 460-99-98. E-mail: cherkasov_stav@mail.ru.

Chernova Irina Vladimirovna, Candidate of geographical sciences, associate professor of the department of socio-economic geography, geoinformatics and tourism of the North-Caucasus federal university. Scopus ID: 57195869694, Researcher ID: 57195869694 Phone: +7(918) 885-79-37. E-mail: chernova_skfu@mail.ru.

Исследование выполнено в рамках Гранта РФФИ 18-35-00173 «Полимасштабный геоинформационный мониторинг трансформации этнической структуры населения городской и сельской местности в России».

Исследование выполнено в рамках Гранта РФФИ 16-06-00179 «Разработка и апробация системы геоинформационного мониторинга этнодемографических процессов (на примере регионов Северного Кавказа)».

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 504.05

Бондарь Е.В., Северо-Кавказский федеральный университет
Скрипчинский А.В., г. Ставрополь, Россия
Седых Р. Ю. Ron1975@list.ru

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ
ОЦЕНКИ ЗЕМЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ СЕЛЬ-
СКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ С
ПРИМЕНЕНИЕМ РИСК-ОРИЕНТИРОВАН-
НОГО ПОДХОДА НА ОСНОВЕ ГЕОИНФОР-
МАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Введение: риск-ориентированный подход позволяет значительно снизить общее количество проверок, их планирование, ранжируя по степени риска.

Материалы и методы исследования: при разработке методических приемов оценки земельных участков учитывались критерии отнесения деятельности субъектов хозяйственной деятельности. Для выявления земельных участков использовались общедоступные данные дистанционного зондирования Земли. Сформированная база данных содержит координаты цетроидов земельных участков и категории риска. На основании созданных картографических материалов производится анализ эффективности применения риск-ориентированного подхода для оценки земельных участков сельскохозяйственного назначения.

Результаты и их обсуждение: основываясь на предлагаемой методике применения риск-ориентированного подхода земельные участки, расположенные в Ипатовском, Арзгирском, Благодарненском, Труновском, Александровском, Изобильненском, Георгиевском, Курском районах, а также большей части Грачевского и Андроповского районах будут проверяться только по заявлениям граждан и в случае возникновения угрозы жизни и здоровью людей. Сопоставление земельных участков, подлежащих проверкам с данными административных правонарушений земельного законодательства в период с 2015 по 2017 гг. выявил муниципальные районы, где показатели правонарушений имели значения выше средекраевого, но плановые проверки земельных участков не будут проводиться. Это следующие районы - Ипатовский, Благодарненский и Новоселецкий. Пространственный анализ расположения земельных участков подлежащих проверкам в муниципальных районах с максимальной долей правонарушений выявил только четыре земельных участка в Туркменском районе, отсутствие проверяемых участков в западной части Кочубеевского района, северо-западной части Новоалександровского района, южной части Предгорного района и западной и южной частей Красногвардейского района.

Выводы: пространственный анализ показал слабую эффективности применения риск-ориентированного подхода без учета региональных особенностей, возможные угрозы для устойчивого развития землепользования и охраны земель сельхозназначения Ставропольского края.

Ключевые слова: риск-ориентированный подход, категории риска, геоинформационные технологии, методологические приемы, землепользование, устойчивое развитие.

**Bondar E.V.,
Skrpichinskiy A.V.,
Sedykh R.Y.**

North-Caucasian Federal University,
Stavropol, Russia

DEVELOPMENT OF METHODOLOGICAL METHODS FOR ASSESSING AGRICULTURAL LAND PLOTS USING A RISK-BASED APPROACH BASED ON GEOINFORMATION SYSTEMS

Introduction: A risk-based approach can significantly reduce the total number of inspections, their planning, ranking by the degree of risk.

Materials and methods of research: when developing methodological methods for assessing land plots, the criteria for classifying the activities of economic entities were taken into account. To identify land plots, the publicly available remote sensing data of the Earth was used. The generated database contains the coordinates of the centroids of the land parcels and the risk category. Based on the created cartographic materials, an analysis of the effectiveness of the application of the risk-based approach for the assessment of agricultural land is made.

Results and discussion: Based on the proposed methodology for applying the risk-based approach, the land plots located in the Ipatovsky, Arzgirsky, Blagodnenskoye, Trunovsky, Aleksandrovsky, Izobilnensky, Georgievsky, Kursk districts, as well as most of the Grachevsky and Andropov districts, will be checked only on applications from citizens and in the event of a threat to the life and health of people. Mapping of land subject to checks with the data of administrative violations of the land legislation in the period from 2015 to 2017 has identified municipal areas, where the rates of offences had values above medium-range, but the planned inspection of land will not be carried out, namely in the following areas: Ipatovskiy, Blagodarnenskiy and Novoseletskiy. Spatial analysis of the location of land areas subject to inspections in municipal areas with the maximum share of offenses identified only four land plots in the Turkmen district, the lack of audited sites in the western part of the Kochubeevskiy district, the northwestern part of the Novoaleksandrovskiy district, the southern part of the Predgorniy district, and the western and southern parts of the Krasnogvardeyskiy district.

Summary: spatial analysis showed weak effectiveness of the risk-based approach without taking into account regional characteristics, possible threats to sustainable development of land use and protection of agricultural land in the Stavropol region.

Key words: risk-oriented approach, risk categories, geoinformation technologies, methodological techniques, land use, sustainable development.

Введение

Термин «риск-ориентированное регулирование» (risk-based regulation) используется в двух основных значениях. Во-первых, риск-ориентированное регулирование означает регулирование рисков, которым подвергается общество, включая угрозы здоровью и жизни граждан, вреда животным, растениям, окружающей среде. Во-вторых, это использование систематических подходов к организации инспектирования и надзора, предназначенных для управления регуляторным риском.

Международная практика весьма однозначно свидетельствует о необходимости внедрения риск-ориентированного подхода при осуществлении государственного контроля и надзора. Так совет организации экономического сотрудничества и развития Европейского Союза в «Рекомендациях по вопросам регуляторной политики и государственного управления» определил необходимость законодательного закрепления принципов риск-ориентированного подхода: «В процессе разработки и внедрения инструментов регулирования применять, оценки рисков, контроль рисков... Регулирующие органы должны создать систему анализа и учета оценок риска, которые сопутствуют наиболее значимым предложениям в нормотворческой сфере, имеющим глубокие или новые научные аспекты». Изданный в Великобритании Кодекс работы инспекций, являющийся основополагающим документом методологического характера, определяет принцип управления рисками как принцип, в соответствии с которым регулирующие органы должны избегать введения излишнего регулирующего бремени, выбирать пропорциональные подходы к контролируемым субъектам, на основе соответствующих факторов, включая, например, размер бизнеса.

Все контролирующие ведомства в Великобритании осуществляют внедрение принципов проведения проверок, с использованием обобщенных показателей рейтинга компании и принятых критериев риска в сфере ее деятельности, что позволяет определить оптимальные рамки проведения контрольных и надзорных мероприятий.

В странах ближнего зарубежья: Украине, Республиках Казахстан, Беларусь и Армения, проводят работы в целях оптимизации планирования контрольно-надзорной деятельности. Предусмотрен переход государственного контроля на организацию и осуществление деятельности по принципам обнаружения и предупреждения риска на основе внедренной системы оценки и управления рисками с одновременным обеспечением минимизированного администрирования, прозрачности.

Мировой опыт использования риск-ориентированного подхода показывает, что его применение позволяет снизить общее количество проверок от 30 до 90%, а отдельные категории бизнеса освободить от планового контроля полностью.

Еще 25 ноября 2010 года Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (Inter-Governmental Council on Standardization, Metrology, and Certification) утверждены, разработанные Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии Российской Федерации рекомендации по межгосударственной стандартизации № 113-2010 «Оценка степени риска при планировании госнадзора». Согласно рекомендациям, под риском следует понимать – вероятность причинения вреда в результате деятельности субъекта хозяйственной деятельности или использования продукции жизни или здоровью граждан, имуществу физических и юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений с учетом тяжести его последствий. Понятие «риск» нашло свое определение и в Федеральном законе № 184-ФЗ «О техническом регулировании», как «вероятность причинения вреда жизни и здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений с учетом тяжести этого вреда».

Под оценкой степени риска понимается совокупность количественных и качественных показателей, связанных с непосредственной деятельностью субъекта хозяйственной деятельности, особенностями отраслевого развития и факторами, влияющими на это развитие, позволяющих отнести субъект хозяйственной деятельности к различным степеням риска.

Под системой оценки рисков понимается комплекс мероприятий, проводимых уполномоченными на осуществление контрольных и надзорных функций государственным органом с целью планирования проверок.

Степень риска ранжируется, исходя из критериев оценки степени риска с учетом требований к организации проверок, регламентированных законодательными и нормативно-правовыми актами.

Согласно статье 8.1 Федерального закона от 26.12.2008 № 294-ФЗ «О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля», применение риск-ориентированного подхода при организации государственного надзора направлено на оптимизацию использования трудовых, материальных и финансовых ресурсов, задействованных при осуществлении государственного надзора, снижение издержек юридических лиц, индивидуальных предпринимателей и повышение результативности своей деятельности органов государственного надзора.

Переход на новую модель контрольно-надзорной деятельности в сфере земельного надзора связан с принятием в 2007 году перечня, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 17.08.2016 № 806 (ред. от 22.07.2017 «О применении риск-ориентированного подхода при организации отдельных видов государственного контроля (надзора) и внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации»).

Концепция риск-ориентированного подхода при осуществлении государственного земельного надзора должна позволить сконцентрировать внимание государства на тех территориях, где есть вероятность потенциального риска нарушений земельного законодательства РФ. Одновременно существует возможность снижения административной нагрузки на добросовестных землепользователей.

Для формирования рассматриваемой системы контрольно-надзорной деятельности, Федеральной службе по ветеринарному и фитосанитарному надзору необходимо создать базовую модель определения категории риска, основанной, на реалистичной оценке вероятности причинения вреда, тяжести последствий, анализе фактического распределения ущерба, формировании исчерпывающих реестров подконтрольных объектов с использованием ведомственных информационных систем, отнесения подконтрольных объектов к определенным категориям риска, что обеспечит доступность и понятность информации о подконтрольных объектах.

Целью работы является анализ применения риск-ориентированного подхода для оценки земельных участков сельскохозяйственного назначения Ставропольского края на основе геоинформационных технологий.

Материалы и методы исследования

В основе методов исследования лежат критерии отнесения деятельности субъектов хозяйственной деятельности к определенной категории риска (классу (категории) опасности) в соответствии с Постановлением Правительства РФ «Об утверждении Положения о государственном земельном надзоре» от 02.01.2015 № 1, на основании которых выявлены земельные участки и получены их кадастровые номера. При идентификации участков использовались общедоступные данные дистанционного зондирования Земли - сервисы Google Maps, Яндекс. Карты, информационного ресурса – «Публичная кадастровая карта» (<http://pkk5.rosreestr.ru/>). Были получены географические координаты центров земельных участков и сформирована база данных более чем по 650 участкам, которые отвечают вышеуказанным критериям. В дальнейшем на основании них были созданы точечные объекты в QGIS и ArcGIS. Для каждого земельного участка определена категория риска, исходя из «Положения о государственном земельном надзоре».

С использованием данных Россельхознадзора по Ставропольскому краю и Карачаево-Черкесской Республике в период с 2015 по 2017 год составлены карты на уровне административных районов, отражающих количество административных нарушений земельного законодательства. Проводился сравнительный анализ полученной информации с данными о бонитете земель на уровне административных районов Ставропольского края на основе открытых данных Агрохимцентра «Ставропольский» (<http://www.stavagroland.ru/activity/soil-fertility/>).

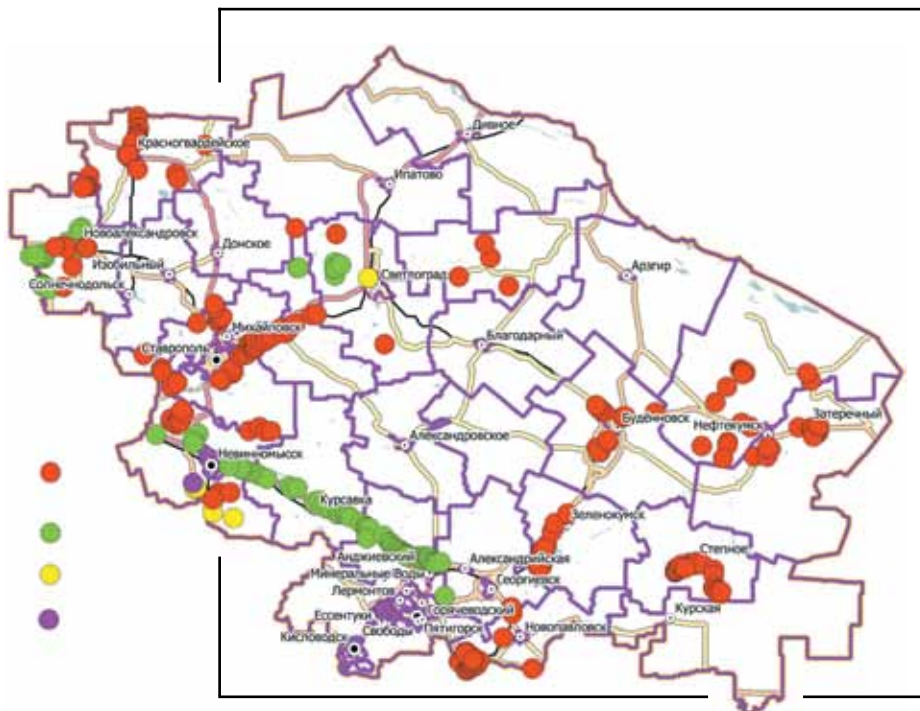


- УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ
- земельные участки, кадастровая стоимость которых на 50 и более процентов превышает средний уровень кадастровой стоимости по муниципальному району (городскому округу);
 - мелиорируемые и мелиорированные земельные участки;
 - земельные участки, смежные с земельными участками, на которых расположены комплексы по разведению сельскохозяйственной птицы (с проектной мощностью 40 тыс. птицемест и более).

Рис. 1. Земельные участки средней категории риска.
Fig. 1. Plots of land of medium risk category.

Результаты и их обсуждение

Анализ пространственного распространения земельных участков, которые могут быть отнесены к средней категории риска (рис. 1) указывает на их преимущественное расположение в Буденовском и Предгорном районах. Несколько меньшее количество таких земельных участков находится в Апанасенковском, Изобильненском и Кочубеевском районах края. Преимущественно это мелиорируемые земли.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- земельные участки, смежные с земельными участками из земель промышленности, энергетики, транспорта, связи, радиовещания, телевидения, информатики, земель для обеспечения космической деятельности, земель обороны, безопасности и земель иного специального назначения;
- земельные участки, в границах которых расположены магистральные трубопроводы;
- земельные участки, смежные с земельными участками, на которых расположены комплексы по разведению сельскохозяйственной птицы (с проектной мощностью менее 40 тыс. птицемест);
- земельные участки, смежные с земельными участками, на которых расположены комплексы по выращиванию и разведению свиней (с проектной мощностью менее 2000 мест), свиноматок (с проектной мощностью менее 750 мест).

Рис. 2. Земельные участки умеренной категории риска.

Fig. 2. Plots of land of moderate risk category.

Пространственный анализ земельных участков, отнесенных к умеренной категории риска, позволил выявить, что большинство земельных участков являются смежными с землями промышленности и иного специального назначения и земельные участки, в пределах которых расположены магистральные трубопроводы (рис. 2). Выявленных земельных участков относящихся к категории умеренного риска на территории Ставропольского края значительно больше, нежели земельных участков, относящихся к средней категории риска.

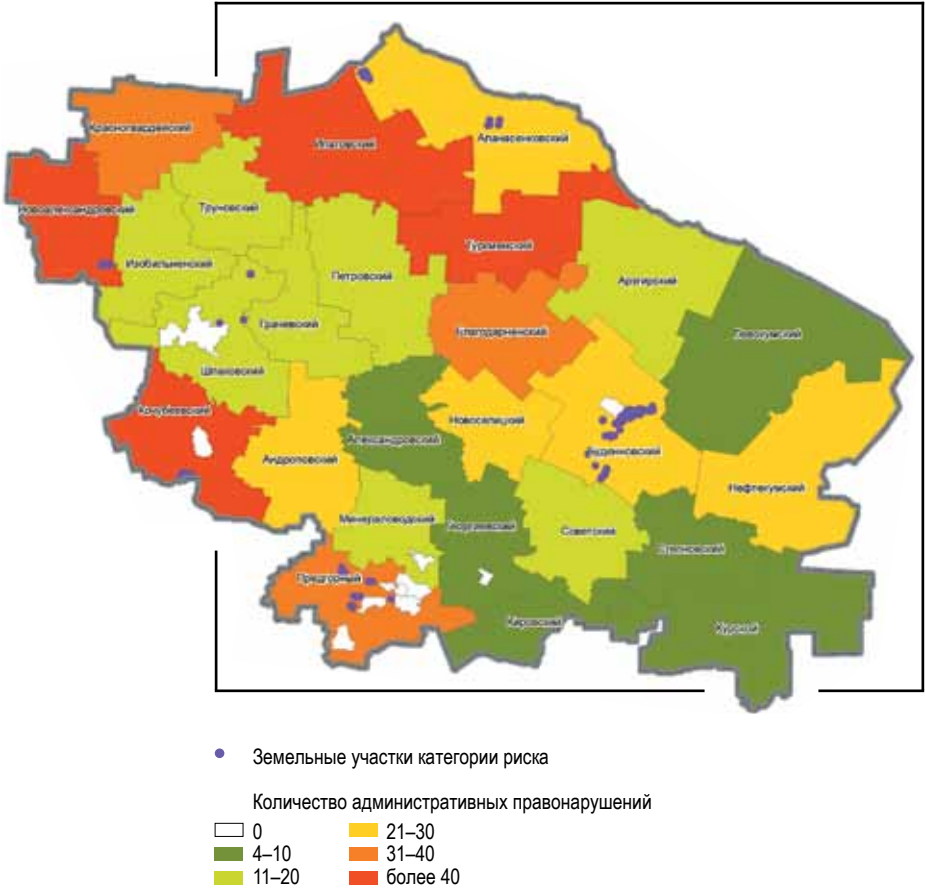


Рис. 3. Сопоставление количества административных правонарушений в период с 2015 по 2017 год с земельными участками категории среднего риска

Fig. 3. Comparison of the number of administrative offenses in the period from 2015 to 2017 with plots of land of the average risk category

Четкой структуры распространения не наблюдается. Необходимо отметить, что большая часть располагается в пределах Ставропольской агломерации. Территориальное распространение связано в основном с примыканием участков к автомобильным дорогам (Грачевский и Шпаковский районы), к местам добычи общераспространенных полезных ископаемых (Кочубеевский и Кировский районы), и граничащих с различного рода промышленными зонами (Буденовский, Степновский и Нефтекумский районы).

Важно отметить, что земельные участки, расположенные в Ипатовском, Арзгирском, Благодарненском, Труновском, Александровском, Изобильненском, Георгиевском, Курском районах, а также большей части Грачевского

и Андроповского районах избегут плановых проверок и будут проверяться только по заявлениям граждан и в случае возникновения угрозы жизни и здоровью граждан.

Сопоставив полученные данные о земельных участках, к которым будет приковано внимание Россельхознадзора в соответствии с риск-ориентированным подходом и данными административных правонарушений земельного законодательства в период с 2015 по 2017 года были выявлены следующие факты (рис. 3).

Ранжированные уровни количества административных правонарушений позволяют выявить административные районы Ставропольского края, где за рассматриваемый период чаще всего были зафиксированы административные правонарушения. Среднее количество правонарушений за изученный промежуток времени составляет порядка 20-30 случаев. К районам, с уровнем «выше среднего» по степени нарушений относятся: Ипатовский, Туркменский, Новоалександровский, Кочубеевский, Красногвардейский, Благодарненский и Предгорный районы. Только в пяти из них предполагаются плановые проверки отдельных земельных участков раз в три года, тогда как в остальных будут проводиться мероприятия государственного надзора, за исключением плановых проверок. Несмотря на факты, указывающие, что землепользование в ряде районов края ведется с нарушением земельного законодательства на уровне «выше среднего», в случае использования методики риск-ориентированного подхода как единой для Россельхознадзора будут исключены плановые проверки на данных территориях, что может усугубить и без того сложную ситуацию.

Сопоставление земельных участков отнесенных к категории умеренного риска со случаями нарушения земельного законодательства позволяет заключить, что преимущественно такие земельные участки располагаются в районах с «низким уровнем» нарушений земельного законодательства. Из районов с показателями нарушений выше среднего активно будут проверяться земельные участки в Кочубеевском и Новоалександровском районах (фрагментарно), несколько меньше – в Красногвардейском районе (рис. 4). Значительная часть земельных участков, которые будут проверяться, в соответствии с риск - ориентированным подходом, один раз в течение пяти лет, располагается в районах с уровнем административных правонарушений Земельного законодательства РФ «средний» и «ниже среднего».

Таким образом, пространственный анализ земельных участков подлежащих плановым проверкам при использовании риск-ориентированного подхода не соотносится с реальными фактами нарушений земельного законодательства в Ставропольском крае. Проведение плановых проверок земельных участков на основе риск-ориентированного подхода ставит под угрозу выполнение «Стратегии социально-экономического развития Ставропольского края до 2020 года и на период до 2025 года», утвержденной распоряжением Пра-

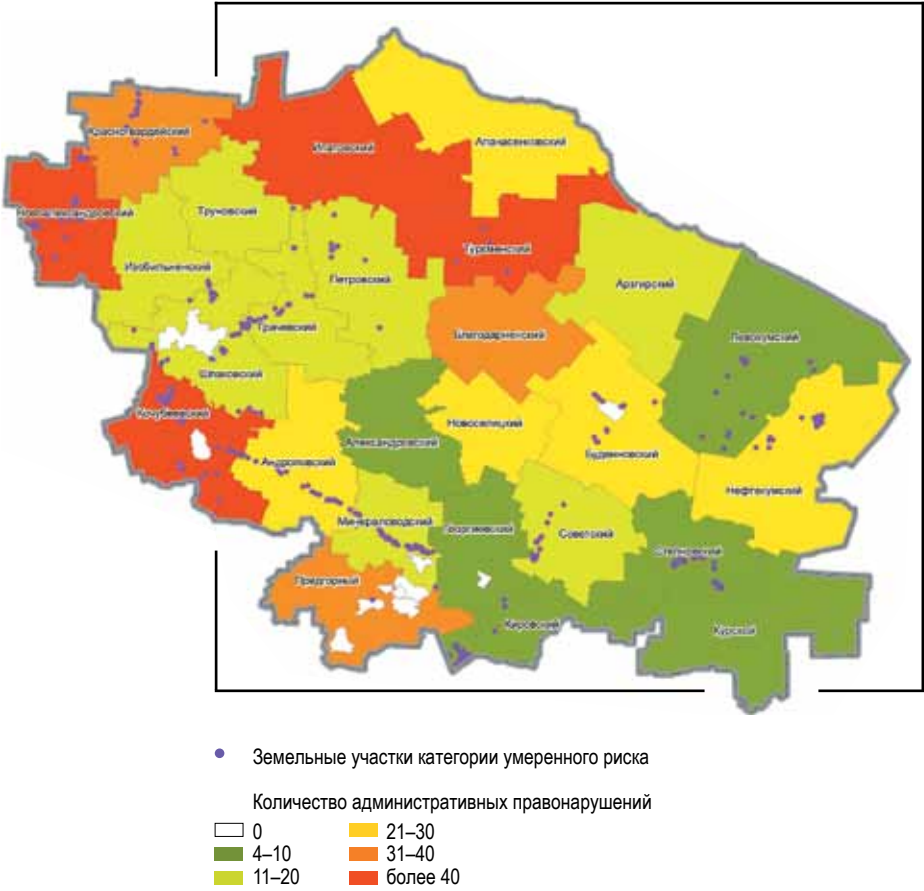


Рис. 4. Сопоставление количества административных правонарушений в период с 2015 по 2017 год с земельными участками категории умеренного риска.

Fig. 4. Comparison of the number of administrative offenses in the period from 2015 to 2017 with plots of land of the moderate risk category.

вительства Ставропольского края от 15 июля 2009 года № 221-рп, где задача повышения плодородия почв и сохранения земель сельскохозяйственного назначения определена как приоритетная, первого уровня, кроме того такой подход противоречит закону Ставропольского края от 15 мая 2006 года № 31-Кз «Об обеспечении плодородия земель сельскохозяйственного назначения в Ставропольском крае».

Сопоставление данных балла бонитета сельскохозяйственных угодий со средними показателями площадей земель, где были зафиксированы нарушения за исследуемый временной период и площадями земель с различными

категориями риска, выявляет ряд муниципальных районов, где не планируется проведение плановых проверок, а отмечается балл бонитета выше среднекраевого (табл. 1). Это Александровский, Георгиевский, Изобильненский, Ипатовский, Новоселицкий и Труновский административные районы. Во всех этих районах активно развито сельское хозяйство, доля сельскохозяйственных угодий составляет в среднем более 75% от площадей этой группы районов. Стоит выделить Георгиевский, Изобильненский и Ипатовский районы, где площадь земель, с выявленными нарушениями выше среднекраевого показателя. Сельхозпроизводители в Курском, Благодарненском и Арзгирском районах фактически не будут подвергнуты плановым проверкам, в соответствии с внедряемой методикой риск-ориентированного подхода, а балл бонитета этих сельскохозяйственных угодий ниже среднекраевого показателя.

Таким образом, не во всех муниципальных районах, где были зафиксированы нарушения земельного законодательства, будут проводиться плановые проверки сельхозпроизводителей. Большинство же этих районов имеет балл бонитета сельскохозяйственных угодий выше среднекраевого.

Выводы

1. Созданная геобазы данных земельных участков подлежащих проверке на основе риск-ориентированного подхода позволила провести их пространственный анализ, на уровне районов Ставропольского края.
2. Сельскохозяйственные угодья в Александровском, Арзгирском, Благодарненском, Ипатовском, Курском, Новоселицком и Труновском районах в перспективе будут проверяться только в случае возникновения угрозы жизни и здоровью граждан. Во всех этих муниципальных районах активно развито сельское хозяйство, а для отдельных районов свойственно активное недропользование. При этом подходе возможны потери устойчивости использования и сохранения ресурсной базы в частности земельных, почвенных ресурсов.
3. Земли сельскохозяйственного назначения неоднородны по качеству почв и ландшафтным характеристикам, агроклиматическим и почвенным условиям, местоположению, удаленности от объектов инженерной, транспортной и производственной инфраструктуры. Несомненно «кадастровое» соседство и смежность земельных участков сельскохозяйственного назначения несет в себе потенциальную опасность причинения вреда почве как природному объекту ресурсу и связано с возможностью возникновения правонарушений,

Таблица 1. ПЛОЩАДИ ЗЕМЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ С ВЫЯВЛЕННЫМИ НАРУШЕНИЯМИ, РАЗЛИЧНЫМИ КАТЕГОРИЯМИ РИСКА И БОНИТЕТОМ ЗЕМЕЛЬ ПО МУНИЦИПАЛЬНЫМ РАЙОНАМ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ

Table 1. Areas of land with identified violations, different risk categories and land quality in the municipal districts of the Stavropol region

Названия муницип- пальных районов / Names of municipal districts	Площадь з/у с нарушениями среднее, га/ disturbances in the area, ha	Площадь з/у с разными категориями рисков, га/ area with risk categories	Бонитет сельскохозяйст- венных угодий / Bonitet agricultural land
Александровский	24		52
Андроповский	132	1774	42
Апанасенковский	80	3394	23
Арзгирский	12		29
Благодарненский	38		40
Будёновский	73	10673	40
Георгиевский	82		55
Грачёвский	104	2447	48
Изобильненский	54		59
Ипатовский	91		42
Кировский	50	4599	55
Кочубеевский	76	6990	49
Красногвардейский	83	765	58
Курский	51		33
Левокумский	19	14985	24
Минераловодский	21	2827	51
Нефтекумский	17	32028	19
Новоалександровский	104	1290	74
Новоселицкий	39		50
Петровский	66	161	48
Предгорный	49	5524	68
Советский	38	10671	43
Степновский	18	2553	36
Труновский	26		56
Туркменский	56	267	30
Шпаковский	4	3997	46

связанных с порчей земель и повреждением плодородного слоя. Критерий целесообразен для зон городских агломераций, железнодорожных путей, автомобильных дорог и технически связанных с ними сооружений и не логичен для районов с низко развитой инфраструктурой, в этой связи целесообразно большее внимание уделять данному критерию для определения категории риска в промышленных районах.

4. Масса земельных участков, в границах которых расположены магистральные трубопроводы, находятся в районах с достаточно высокой сельскохозяйственной нагрузкой Изобильненском, Кочубеевском, Андроповском, Минераловодском, Георгиевском. Особое внимание стоит уделить восточным районам, где степень устойчивости ландшафтов снижена.
5. Необходимо в качестве критерия в риск-ориентированном подходе применить показатель повышенной кадастровой стоимости, поскольку средние значения удельных показателей кадастровой стоимости земель сельскохозяйственного назначения напрямую зависят от интегрального показателя плодородия почвы (разновидности или группы почв) – относительной величины совокупного влияния признаков и свойств почвы на продуктивность (урожайность) сельскохозяйственных угодий с данным почвенным покровом, измеряемой в баллах бонитета, а также интегральным показателем местоположения объекта оценки - величины эквивалентного расстояния в километрах до пунктов реализации сельскохозяйственной продукции и баз снабжения материально-техническими ресурсами.

Библиографический список

1. Публичная кадастровая карта [Электронный ресурс] – Режим доступа: [<https://pkk5.rosreestr.ru>] на 16.05.2018.
2. Плодородие почв [Электронный ресурс] – Режим доступа: [<http://www.stavagroland.ru/activity/soil-fertility/>] на 21.05.2018.
3. Statutory Code of Practice for Regulators [Электронный ресурс] – Режим доступа: [<http://www.compliance-exchange.com/governance/library/regulatorscompliancecode2007.pdf>] на 16.05.2018.
4. Risk Based Regulation London School of Economics and Political Science [Электронный ресурс] – Режим доступа: [<http://regulatoryreform.com/wp-content/uploads/2015/02/OECD-Risk-and-Regulatory-Policy-2010.pdf>] на 16.05.2018.

**Рукопись поступила в редакцию: 16.07.2018,
принята к публикации 26.08.2018**

References

1. Public cadastral map [Electronic resource] - access Mode: [https://pkk5.rosreestr.ru] on 16.05.2018.
2. Soil fertility [Electronic resource] – access Mode: [http://www.stavagroland.ru/activity/soil-fertility/] on 21.05.2018.
3. Statutory Code of Practice for Regulators [Electronic resource] - access Mode: [http://www.compliance-exchange.com/governance/library/regulatorscompliancecode2007.pdf] on 21.05.2018.
4. Risk Based Regulation London School of Economics and Political Science [Electronic resource] - access Mode: [http://regulatoryreform.com/wp-content/uploads/2015/02/OECD-Risk-and-Regulatory-Policy-2010.pdf] on 21.05.2018.

Об авторах

Бондарь Елена Васильевна, кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и природопользования Северо-Кавказского федерального университета. Scopus ID: 0, Researcher ID: S-2072-2018. Телефон: 8(928)911-2081 E-mail: evbondar68@gmail.com

Скрипчинский Андрей Владимирович, кандидат географических наук, доцент кафедры социально-экономической географии, геоинформатики и туризма, института математики и естественных наук, Северо-Кавказского федерального университета. Scopus ID: 0, Researcher ID: S-1669-2018. Телефон 8905-412-07-22, E-mail: ron1975@list.ru

Седых Роман Юрьевич, магистр экологии и природопользования Scopus ID: 0, Researcher ID: S-1722-2018. Телефон +7(918)881-1404 E-mail: romasedykh@mail.ru

About the authors

Bondar Elena Vasilievna, candidate of biological Sciences, associate Professor, Department of ecology and nature management, North Caucasian Federal University. Stavropol. Scopus ID: 0, Researcher ID: S-2072-2018. Phone: 8(928)911-20-81 E-mail: evbondar68@gmail.com.

Skipchinskiy Andrey Vladimirovich Ph.D of Geographical Sciences, associate Professor. Assistant Professor of social and economic geography, geo-Informatics and tourism, North-Caucasus Federal University, Stavropol. Scopus ID: 0, Researcher ID: S-1669-2018. Tel.: 89054120722, E-mail: ron1975@list.ru

Sedykh Roman Yurievich, master ecology and environmental management. Scopus ID: 0, Researcher ID: S-1722-2018. Phone: +7(918)881-1404, E-mail: romasedykh@mail.ru.

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК

661.183

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАННЫХ СОРБЕНТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Ларина О.Г.*

Овчаров С.Н.

Калининченко А.Ю.

Северо-Кавказский федеральный университет,

г. Ставрополь, Россия,

*oksdsolgi kh@yandex.ru

Введение:

в статье поднята актуальная на сегодняшний день комплексная проблема загрязнения окружающей среды техногенными отходами и ее составляющая – поиск эффективных методов очистки сточных вод от нефти и продуктов ее переработки. Авторы предлагают использовать для ее решения перспективные сорбционные технологии. Номенклатура сорбционных материалов из года в год неуклонно расширяется, однако сдерживающими факторами их повсеместного внедрения служат высокая стоимость, не всегда оптимальные эксплуатационные характеристики, экологическая безопасность утилизации насыщенных поглотителей. В статье оценивается возможность использования сорбентов на основе растительных отходов для очистки сточных вод от нефтяного загрязнения. Четкое представление о физико-химических и механических свойствах исходных материалов служит необходимым условием определения рациональных путей их переработки. Термическое модифицирование сырья позволяет придать сорбентам эксплуатационные характеристики, требуемые применительно к конкретному типу загрязнителей. Цель работы заключалась в изучении влияния условий получения сорбентов на их способность очищать воду от нефтяного загрязнения.

Материалы и методы исследований:

сырьем для исследований служила подсолнечная лузга, подвергаемая карбонизации в бескислородных условиях. Использованы методы термического анализа, сканирующей электронной микроскопии, низкотемпературной адсорбции азота. Для оценки эксплуатационных свойств термомодифицированных сорбентов применялись весовые методы.

Результаты исследований и их обсуждение:

получена термограмма разложения лузги подсолнечной, дающая представление об особенностях процесса термического разложения растительных отходов в диапазоне 150–700 °С. Исследованы значения выхода, плавучести, нефте- и водопоглощения сорбентов, нарабатанных в интервале температур от 200 до 600 °С, определена величина их поверхности, особенности пористой структуры, позволяющие считать оптимальной карбонизацию при 300–400 °С.

Выводы:

пористая структура сорбентов оказывает непосредственное влияние на их эксплуатационные характеристики. Для эффективной очистки сточных вод от нефтяного загрязнения необходимы крупнопористые поглотители. Карбонизация растительного сырья приводит к увеличению сорбционной поверхности, ее гидрофобизации. Практическую значимость имеет оценка перспективы использования сорбентов на основе отходов для очистки сточных вод от различных типов загрязнителей.

Ключевые слова:

сорбенты, отходы, очистка сточных вод, карбонизация, сорбционные характеристики.

PHYSICO-CHEMICAL ANALYSIS OF THE FORMATION OF POROUS STRUCTURE AND PERFORMANCE PROPERTIES OF THERMALLY MODIFIED SORBENTS FOR WASTEWATER PURIFICATION

Larina O.G. Ovcharov S.N. Kalinichenko A.Yu.

North-Caucasian Federal University, Stavropol, Russia

- Introduction:** the article raises the current complex problem of environmental pollution with technogenic waste and its component – the search for effective methods of wastewater treatment from oil and its products. The authors propose to use the perspective of sorption technology. The range of sorption materials from year to year is steadily expanding, however the deterrent factors of their widespread introduction are the high cost, not always optimal performance, environmental safety of disposal of saturated absorbers. The article assesses the prospects of using sorbents based on plant waste for wastewater purification from oil pollution. A clear understanding of the physico-chemical and mechanical properties of the raw materials is a necessary condition for determining the rational ways of their processing. Thermal modification of raw materials allows giving the sorbents the performance characteristics required for a particular type of pollution. The aim of the work was to study the influence of sorbent production conditions on their ability to purify water from oil pollution.
- Materials and methods of research:** the raw material for the research was sunflower husk subjected to carbonization in oxygen-free conditions. The methods of thermal analysis, scanning electron microscopy, low-temperature nitrogen adsorption were used. For the assessment of operational properties of sorbents thermomodification applied weighting methods.
- Research results and discussion:** the thermogram of decomposition of sunflower husk, giving an idea of the features of the thermal decomposition of plant waste in the range of 150–700 °C. The values of yield, buoyancy, oil and water adsorption of sorbents, worked out in the temperature range from 200 to 600 °C, determined the value of their surface, the features of the porous structure, allowing to consider the optimal carbonation at 300–400 °C.
- Conclusions:** the porous structure of sorbents has a direct impact on their performance properties. Large-scale absorbers are necessary for effective treatment of waste water from oil pollution. Carbonation of plant raw materials leads to an increase in the sorption surface, its hydrophobization. The practical significance of the perspective of the use of sorbents on the basis of wastes for purification of wastewater from different types of pollutants.
- Key words:** sorbents, waste, wastewater purification, carbonization, sorption characteristics.

Введение

Стремительный экспоненциальный рост объемов твердых, жидких и газообразных отходов техногенного происхождения вызывает все большее истощение невозобновимых природных ресурсов – полезных ископаемых и пресной воды. Сложившаяся на сегодняшний день эколого-экономическая ситуация обуславливает весьма интенсивный спрос на создание

современных инновационных технологий, обеспечивающих рациональное обращение с отходами. Важной составляющей этой комплексной проблемы является поиск эффективных методов очистки сточных вод от основного спектра загрязнений – нефти и продуктов ее переработки, тяжелых металлов. Перспективным, но еще недостаточно востребованным направлением очистки сточных вод от нефтяного загрязнения, выступает использование сорбционных технологий [1, 2].

К примеру, в нашей стране масштабы реализации сорбционных технологий в системах очистки нефтезагрязненных вод на несколько порядков разнятся с зарубежной практикой. С учетом импорта потребление нефтесорбентов в России составляет всего 6–7,5 тыс. т в год. Если принять во внимание, что около 60% разлившейся нефти не собирается, 20% – устраняется с помощью механических средств (скиммерные устройства) и вручную, а средняя нефтеемкость сорбентов составляет 20–30 кг на 1 кг поглотителя, то средняя годовая емкость рынка сорбентов России для жидких углеводородов равняется приблизительно 110–130 тыс. т [3]. Необходима разработка новых технологических решений, направленных на расширение ассортимента дешевых сорбентов. В территориальных образованиях могут быть созданы производства сорбентов из распространенного местного сырья, особенно являющегося отходом.

Северо-Кавказский регион обладает собственными большими перспективными и пока не освоенными ресурсами. Интерес представляют золошлаковые отходы мусоросжигательных заводов [4], многотоннажные отходы агропромышленного комплекса. Использование подобного сырья позволяет одновременно решать проблему утилизации отходов и получения продуктов, применяемых в природоохранной деятельности [5, 6].

Биомасса сельскохозяйственных отходов (подсолнечной, рисовой, гречневой лузги и т.п.) представлена в основном полисахаридами с 5–6 углеродными атомами (целлюлоза – 30–40% и гемицеллюлозы – 10–27%) и полимерами с высокой степенью ароматизации (лигнин – 18–24%). Практически все эти материалы имеют относительно высокое содержание углерода, низкую зольность порядка 2–3,5% и характеризуются высоким выходом летучих соединений, то есть являются потенциальным сырьем для нефтесорбентов [7].

В целях получения сорбентов отходы подвергаются термомодифицированию. Оно заключается в их карбонизации в бескислородных условиях для удаления летучих соединений и развития первичной пористой структуры [8].

В ходе этого процесса происходит образование кокса либо полукокса с заданными физико-химическими свойствами (состав, структура, текстура, механические характеристики и т.п.). В свою очередь, выход кокса и его свойства определяются технологическими условиями отдельных стадий процесса. При этом химические механизмы трансформации различных растительных отходов имеют в достаточной мере общий характер.

Материалы и методы исследований

В качестве сырья использовали подсолнечную лузгу. Ее карбонизацию проводили на лабораторной установке, основным элементом которой являлся вертикальный кварцевый реактор, помещенный в муфельную печь с регулируемым электронагревом. В установке также были организованы системы подачи газа-носителя (азота), охлаждения и сбора сконденсированной воды и смолистых продуктов.

Методика получения сорбентов состояла в следующем. Лузгу загружали в кварцевый реактор и помещали в холодную печь. Термообработку проводили в три этапа. На первом этапе лузгу сушили при 105–110 °С в течение 30 мин., на втором – нагревали до температуры изотермической выдержки, которую варьировали от 200 до 600 °С, и выдерживали 15 мин. По окончании изотермической выдержки (третий этап) производили снижение температуры до 40 °С и выгрузку карбонизата.

Применялись методы термического анализа. Они охватывают ряд смежных инструментальных методов, в которых устанавливается зависимость параметров какого-либо физического свойства вещества от температуры. Каждый параметр регистрируется как динамическая функция температуры. Данные представляются с помощью соответствующей кривой. Информация, которую дает термический анализ, отражает состояние структуры исследуемого материала и ее изменения, определяющие механизм термических превращений. Конкретный вид метода термического анализа определяется регистрируемым параметром и используемым измерительным прибором.

Для исследования сырья был проведен термогравиметрический анализ сорбентов (ТГ-ДТА анализ) на термоанализаторе SDT Q 600 (производитель TA-Instruments, США). На весы дериватографа помещали навеску (10–20 мг) в корундовом тигле. Кривые ДСК-ТГ регистрировали в режиме линейного подъема температуры со скоростью 10 °С/мин. в интервале 20–800 °С в токе сухого воздуха (100 мл/мин). Накопление и обработку дериватографической информации проводили с помощью пакета программ Universal Analysis 2000, входящего в комплектацию прибора.

Сорбционные характеристики полученных материалов, такие как нефтеемкость, водопоглощение, плавучесть, оценивались по ТУ 214-10942238-03-95.

Пористая структура карбонизатов исследовалась на растровом электронном микроскопе РЭМ-106И методом сканирующей электронной микроскопии.

Изучение пористой структуры образцов проводили методом низкотемпературной адсорбции азота на приборе ASAP-2010 (производитель Micromeritics, США). Предобработка образцов включала вакуумирование при 80 °С до $4 \cdot 10^{-1}$ Па в течение суток. Адсорбцию N_2 проводили при 77 К. Изотермы регистрировали в виде зависимостей $V_{\text{адс.газа}} \text{ (см}^3\text{/г)} = f(p/p_0)$. На ос-

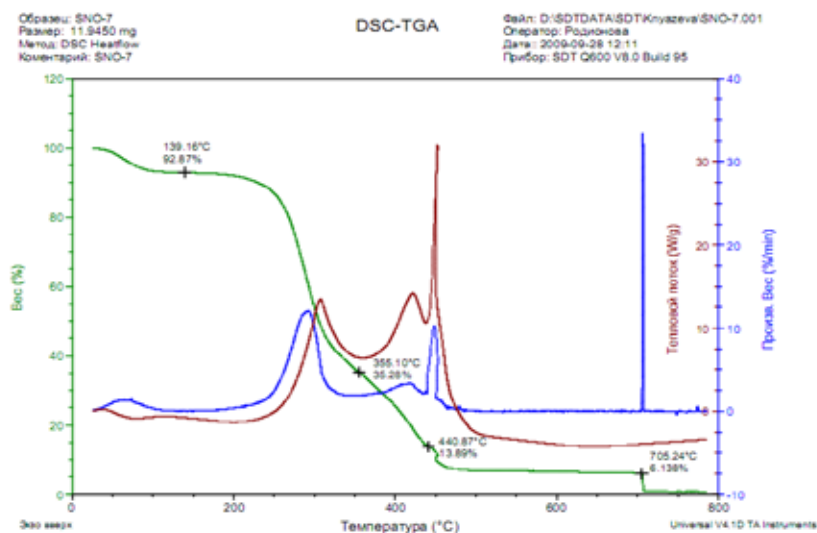


Рис. 1.

Термограмма разложения лузги подсолнечной.

Fig. 1. The thermogram of the decomposition of husk sunflower.

новании полученных изотерм адсорбции азота рассчитывали характеристики пористой структуры сорбентов с помощью стандартного программного обеспечения прибора.

Результаты исследований и их обсуждение

Получены зависимости изменения веса образца, теплового потока и производной веса от температуры. Термограмма разложения подсолнечной лузги представлена на рисунке 1.

Анализ термограммы свидетельствует о наличии в лузге некоторого количества воды, что подтверждается небольшим эндотермическим эффектом в диапазоне температур 90–200 °C. При этом потери массы достигают 7–8%, что весьма близко к значениям, полученным при определении влажности сырья. Заметная убыль веса регистрируется в диапазоне 250–450 °C. Она составляет 65–86%. Потери массы соответствуют двум значительным пикам, отражающим выделение энергии при 280–350 °C и 400–450 °C. В диапазоне от 450 до 700 °C отмечается относительное постоянство веса и теплового потока, что свидетельствует об отсутствии заметных химических изменений в структуре сырья. Однако при 700–710 °C регистрируется резкое снижение веса образца до 6%, что, вероятно, связано с разложением высококипящих компонентов.

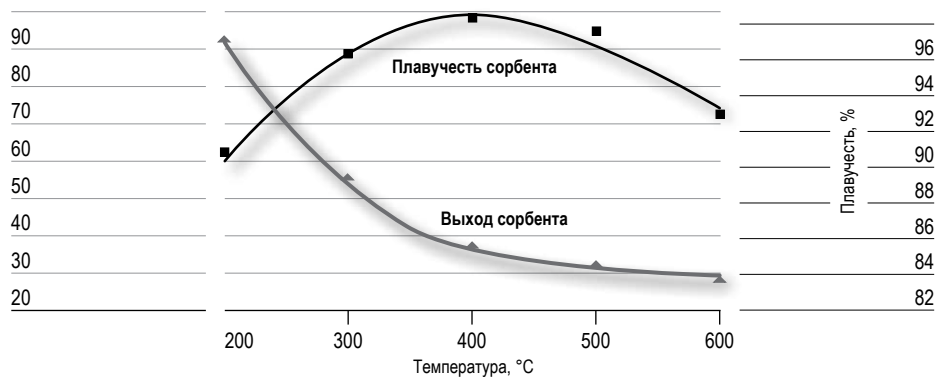


Рис. 2. Зависимость выхода и плавучести сорбента от температуры карбонизации.

Fig. 2. Dependence of the yield and buoyancy of the sorbent on the temperature of carbonization.

Таким образом, с нашей точки зрения, процесс термического разложения растительных отходов в диапазоне 150–700 °C состоит из двух стадий:

- низкотемпературной, протекающей при 200–350 °C, сопровождающейся дегидратацией сырья и его последующей карбонизацией и отличающейся выделением основной массы летучих продуктов;
- высокотемпературной, протекающей при температуре выше 400 °C и ведущей к образованию плотной углеродной структуры с малым выходом.

В качестве примера графической интерпретации опытных данных на рисунках 2, 3 показана динамика изменения выхода, нефтеемкости, водопоглощения и плавучести сорбентов от температуры карбонизации.

Анализ экспериментальных данных, полученных при исследовании влияния температуры карбонизации на эксплуатационные характеристики сорбентов, позволяет сделать заключение, что во всех случаях выход продукта с увеличением температуры снижается. Причем основная потеря массы происходит в диапазоне 250–500 °C. При температуре выше 600 °C выход готового продукта составляет менее 30% масс.

В интервале 300–400 °C наблюдается заметный рост адсорбционной емкости продукта по жидким углеводородам по сравнению с исходной лузгой. Увеличение поглотительной способности по нефти составляет 53–61 %, по моторному маслу – 61–64 %, по дизельному топливу – 53–62 %. При температуре карбонизации > 400 °C отмечается снижение адсорбционной емкос-

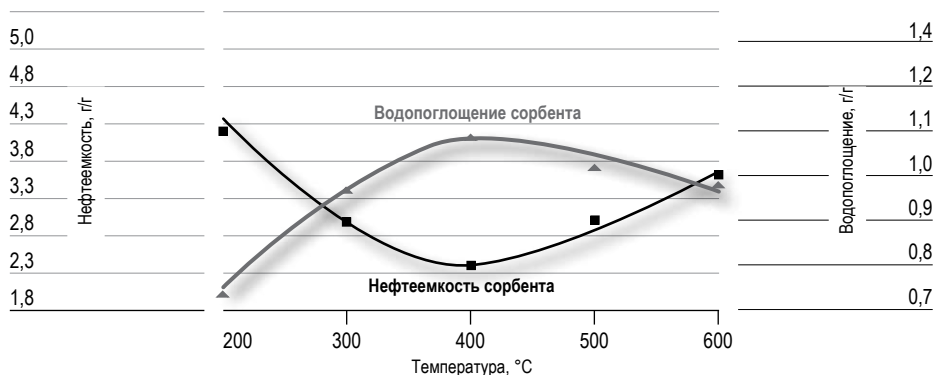


Рис. 3.

Зависимость нефте- и водопоглощения сорбента от температуры карбонизации.

Fig. 3. Dependence of oil and water adsorption of the sorbent on the temperature of carbonization.

ти адсорбентов на 12% по нефти и небольшой рост по моторному маслу – 7% и дизельному топливу – 3%.

При термообработке существенным образом меняется водопоглощение. Этот показатель качества сорбента не менее важен, чем нефтеемкость, потому что влияет на эффективность очистки.

В диапазоне 300–400 °C водопоглощение по сравнению с необработанной лузгой снижается на 39%, так как выделяющаяся смола создает водоотталкивающее олеофильное покрытие на поверхности углеродного сорбента. При более высокой температуре изотермической выдержки наблюдается некоторый рост данного показателя (на 25% по сравнению с водопоглощением в интервале 300–400 °C), что, вероятно, обусловлено выгоранием гидрофобных компонентов. Снижение водопоглощения, вызванное термообработкой лузги, отражается на способности сорбента оставаться на плаву при внесении в сточную воду или водоем. Так, плавучесть сорбентов, полученных в температурном интервале 300–400 °C, при сопоставлении с исходным материалом выше на 13%. При более высокой температуре обработки лузги происходит понижение данного показателя примерно на 5%.

Изучена пористая структура полученных карбонизатов. На рисунке 4 представлены микрофотографии срезов термообработанной лузги.

Проведенные исследования показали, что карбонизованные образцы имеют фибриллярное строение, что свидетельствует о сохранении морфологической структуры исходного целлюлозного волокна лузги.

Пористая структура сорбентов оказывает существенное влияние на их эксплуатационные характеристики, в первую очередь, на емкость поглоще-

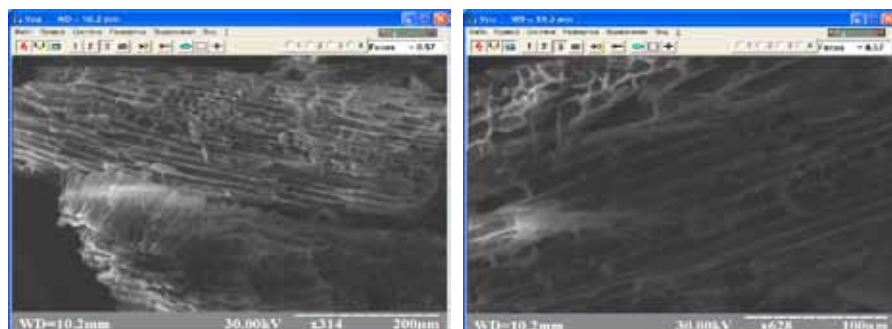


Рис. 4. Электронно-микроскопические снимки образцов после карбонизации при 350 °С.

Fig. 4. Electron microscopic images of samples after carbonization at 350 °C.

ния, время сорбции, возможность удержания и десорбции нефтепродукта, а также плавучесть и возможность захвата вместе с нефтью части воды. Микропористые поглотители малоэффективны для поглощения крупных молекул углеводородов. Широкопористые сорбенты быстрее впитывают нефть и быстрее ее отдают при отжиме, однако хуже удерживают легкие нефтепродукты (бензин, дизельное топливо).

В качестве объектов исследования использовались различные модификации сорбентов на основе рисовой (РЛ), подсолнечной (ПЛ) и гречневой лузги (ГЛ), полученные в ходе как обычной термической обработки, так и дополнительно подвергшиеся предварительной реагентной химической трансформации и грануляции со связующим. Условия получения и величины поверхности сорбентов представлены в таблице 1.

Из данных таблицы 1 следует, что исходные образцы РЛ, ГЛ и ПЛ обладают небольшой поверхностью, величины которой составляют 0,2–1,3 м²/г. При этом внешний вид изотерм различается (рис. 5).

Для образцов ГЛ и ПЛ изотерма адсорбции азота соответствует изотермам III типа по классификации Брунауэра, а именно адсорбции на непористых телах. Она отражает отсутствие микропор. Плавный подъем в области относительных давлений P/P_0 от 0,5 до 0,9 указывает на наличие в образце мезопор. Форма гистерезисной петли по классификации де Бура соответствует типу H3, т.е. поры сорбента являются цилиндрическими с почти параллельны-

Таблица 1.

УСЛОВИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ПОВЕРХНОСТИ СОРБЕНТОВ
 CONDITIONS FOR THE PRODUCTION AND SURFACE OF SORBENTS

Исходная лузга	Обработки	Поверхность, м²/г	Поверхность микропор, м²/г
Рисовая	—	0,9	0,4
	карбонизация при 300 °С	170	130
Гречневая	—	0,2	—
	карбонизация при 600 °С	0,9	—
Подсолнечная	—	1,3	—
	карбонизация при 350 °С	3,7	—
	добавка гидроксида кальция и карбамида с последующей карбонизацией при 400 °С	3,0	—
	добавка ПВА	2,3	—
	добавка ПВА с последующей карбонизацией при 280 °С	2,9	—
	добавка ПВА с последующей карбонизацией при 300 °С	2,7	—
	гранулированный комплексный карбонизат из нефтешлама, лузги и ПВА после термообработки при 300 °С	5,1	—

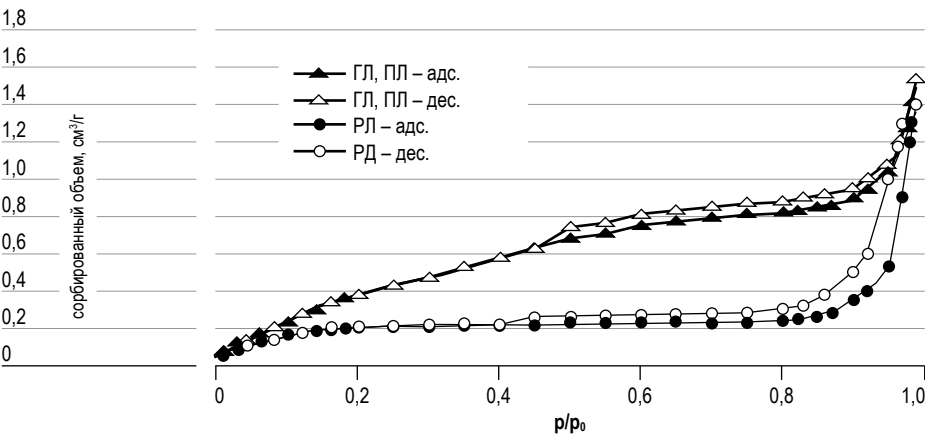


Рис. 5.

Изотермы низкотемпературной адсорбции азота на РЛ, ГЛ и ПЛ.
 Fig. 5. Isotherms by low-temperature nitrogen adsorption on RH, BH and SH.

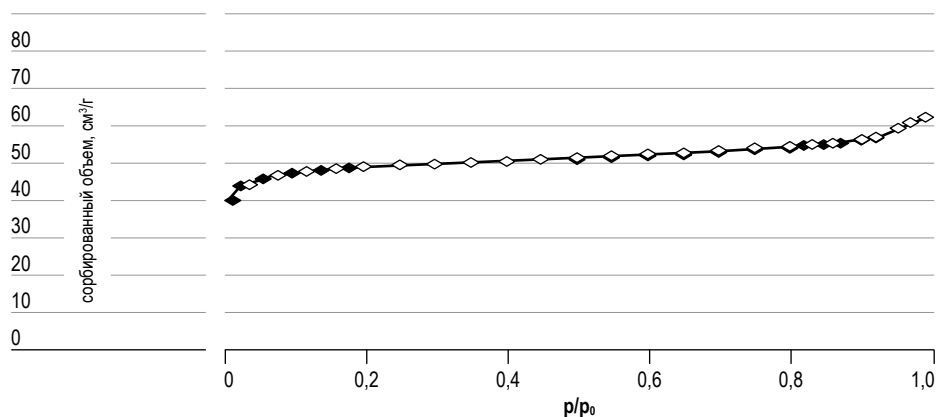


Рис. 6. Изотерма низкотемпературной адсорбции азота на карбонизированной рисовой лузге.

Fig. 6. Isotherm by low-temperature nitrogen adsorption on carbonized sunflower husk.

ми стенками. Изотерма имеет наклон, значит, величина адсорбции возрастает с увеличением давления. Возрастание можно объяснить капиллярной конденсацией азота в мезо- и макропорах внутри гранулы карбонизата, а также адсорбцией на внешней поверхности гранулы.

Для образца РЛ изотерма соответствует IV типу, т.е. адсорбции на микропористых материалах. Это подтверждается наличием значительной доли микропор, величина поверхности микропор составила $0,4 \text{ м}^2/\text{г}$. Процедура карбонизации гречневой и подсолнечной лузги привела к увеличению поверхности в 3–4 раза. При этом внешний вид изотерм не менялся и соответствовал изотермам адсорбции на непористых телах (рис. 5). Наблюдаемое увеличение поверхности в процессе карбонизации может быть связано с увеличением дисперсности частиц, например, в результате растрескивания.

Карбонизация рисовой лузги позволяет получить сорбент с очень развитой поверхностью (рис. 6, табл. 1).

В процессе карбонизации поверхность образца увеличилась от $0,9$ до $170 \text{ м}^2/\text{г}$. Наблюдаемый рост поверхности может быть связан, в первую очередь, с особенностями химического состава рисовой лузги, а именно с преобладанием в качестве основного компонента оксида кремния. Необходимо заметить, что после карбонизации рисовой лузги образец остается микропористым, сохраняется тип изотермы (рис. 6). Значительная величина поверхности

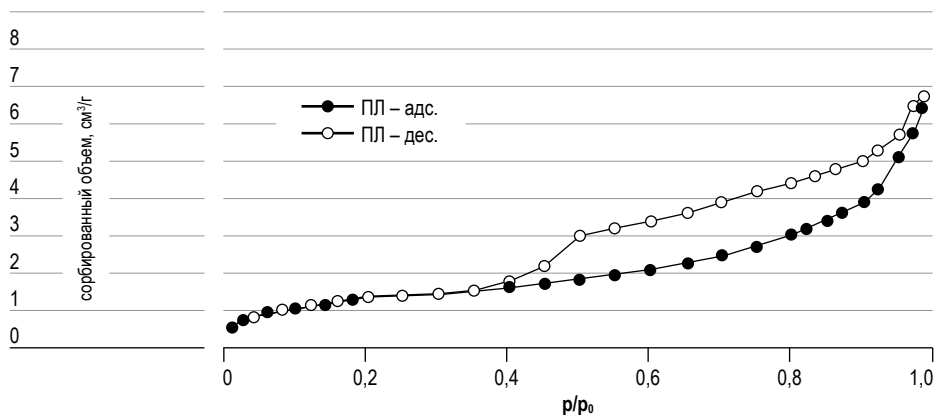


Рис. 7.

Изотерма низкотемпературной адсорбции азота на гранулированном комплексном карбонизате из нефтешлама, подсолнечной лузги и ПВА после термообработки при 300 °С.

Fig. 7. Isotherm by low-temperature nitrogen adsorption on granulated complex carbonate from oil sludge, sunflower husk and PVA after heat treatment at 300 °C.

микропор (130 м²/г) соответствует таким известным микропористым сорбентам, как цеолиты.

Таким образом, рисовая лузга пригодна для получения микропористых сорбентов с развитой поверхностью или композитных сорбентов с комбинированной поверхностью. Сорбенты на ее основе могут быть использованы для очистки воды от тяжелых металлов и углеводов.

На примере сорбентов на основе подсолнечной лузги изучено влияние различных обработок на величину поверхности получаемых материалов. Использование для грануляции нефтяного шлама позволило увеличить поверхность сорбента до 5,1 м²/г и привело к изменению внешнего вида изотермы (рис. 7).

Изотермы такого вида относят к IV типу. Наличие плавного подъема в области относительных давлений p/p_0 от 0,5 до 0,9 указывает на присутствие в образце мезопор, средний диаметр которых составляет 10 нм. Петля гистерезиса показывает, что мезопоры имеют форму «горлышка бутылки», тогда как небольшой гистерезис на изотермах исходной и карбонизированной подсолнечной лузги (рис. 5) указывает на существование щелевидных пор. Очевидно, наличие мезопор в этом случае связано с присутствием нефтяного шлама, т.к. использование ПВА и карбонизации при 300 °С в других случаях не приводило к подобным изменениям изотерм.

Гранулированные сорбенты на основе лузги подсолнечной, содержащие нефтешлам, могут быть использованы для очистки воды от органических загрязнителей с меньшим размером молекул, чем у нефти, например, органических красителей.

Выводы

Сравнительный анализ выявил прямую зависимость эксплуатационных характеристик сорбентов от параметров пористой структуры, формируемой в ходе термомодификации. Так, рост нефтепоглощения в интервале обработки 300–400 °С объясняется возрастанием удельной поверхности по сравнению с исходным сырьем. С увеличением температуры карбонизации растет объем макропор, отвечающих за поглощение высокомолекулярных соединений нефти, а также мезопор, поскольку увеличивается доля поглощенного дизельного топлива. При температуре пиролиза меньше 300 °С эксплуатационные показатели сорбентов заметно ниже, так как не развивается достаточно высокая пористость. При температуре выше 400 °С отмечается снижение выхода готового продукта, уменьшение его механической прочности. В этой связи температурный интервал 300–400 °С можно считать оптимальным для получения сорбентов на основе растительных отходов, а в зависимости от целей очистки стоков возможно улучшение эксплуатационных характеристик поглотителей за счет реагентной модификации.

Библиографический список

1. Каменщиков Ф. А., Богомольный Е. И. Нефтяные сорбенты. М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. 268 с.
2. Дремичева Е. С. Эффективность сорбционных материалов для сбора нефтепродуктов с поверхности водоемов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2017. № 1. С. 35–39.
3. Петов Н. Разливанное море разливов // Нефть России. 2009. №5. С. 77–78.
4. Калиниченко А. Ю., Кудымова А. А. Очистка сточных вод от тяжелых металлов адсорбентом на основе шлака Пятигорского теплоэнергетического комплекса // Материалы международной научно-технической конференции «Защита окружающей среды от экотоксикантов» (14–15 апреля 2014 г.). Уфа: РИЦ УГНТУ, 2014. С. 50–54.
5. Овчаров С. Н., Долгих (Ларина) О. Г., Овчаров Д. С. Адсорбционные технологии и средства ликвидации нефтяного загрязнения воды // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2013. №3 (36). С. 69–74.
6. Исследование характеристик модифицированных сорбентов серий «Униполимер-М» и «Унисорб» / В.М. Мелкозеров, С.И. Васильев, Д.Н. Журавлев, Л.А. Лапушова, А. С. Федото-

ва // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2017. №3. С. 13–17.

7. Новые эффективные сорбенты (поглотители) на основе шелухи риса для сбора проливов и очистки вод / А. А. Хохряков, А. А. Ежелев, С.В. Половцев, С.А. Керножицкая, В. Б. Мошковский // Вода и экология: проблемы и решения. 2007. №3. С. 46–52.
8. Долгих (Ларина) О.Г., Овчаров С.Н. Получение нефтесорбентов карбонизацией лузги подсолнечника // Экология и промышленность России. 2009. № 11. С 4–7.

References

1. Kamenshchikov F. A., Bogomol'nyj E. I. Neftyanye sorbenty (Oil sorbent products). M.; Izhevsk: NIC «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika», 2005. 268 p.
2. Dremicheva E. S. Effektivnost' sorbtsionnykh materialov dlya sbora nefteproduktov s poverkhnosti vodoyemov (The efficiency of sorption materials for the collection of oil products from the surface of reservoirs) // Zashchita okruzhayushey sredy v neftegazovom komplekse. 2017. № 1. Pp. 35–39.
3. Petov N. Razlivannoe more razlivov (Spilled sea of overflows) // Neft' Rossii. 2009. № 5. Pp. 77–78.
4. Kalinichenko A. Yu., Kudymova A. A. Ochistka stochnykh vod ot tyazhelykh metallov adsorbentom na osnove shlaka Pyatigorskogo teploenergeticheskogo kompleksa (Treatment of waste water from heavy metals by adsorbent based on slag of Pyatigorsk thermal power complex) // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Zashchita okruzhayushchej sredy ot ehkotosikan-tov» (14-15 aprelya 2014 g.). Ufa: RIC UGNTU, 2014. Pp. 50–54.
5. Ovcharov S. N., Dolgikh (Larina) O. G., Ovcharov D. S. Adsorbtsionnye tekhnologii i sredstva likvidatsii neftyanogo zagryazneniya vody (Adsorption technologies and elimination methods of the oil pollution of water) // Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta. 2013. № 3 (36). Pp. 69–74.
6. Issledovaniye kharakteristik modifitsirovannykh sorbentov seriy «Unipolimer-M» i «Unisorb» (The study of the characteristics of «Unipolymer-M» and «Unisorb» modified sorbents) / V. M. Melkoz-erov, S. I. Vasil'ev, D. N. Zhuravlev, L. A. Lapusheva, A. S. Fedo-tova // Zashchita okruzhayushey sredy v neftegazovom komplekse. 2017. № 3. Pp. 13–17.
7. Novye effektivnye sorbenty (poglotiteli) na osnove shelukhi risa dlya sbora prolivov i ochistki vod (New efficient sorbents (sinks) on the basis of rice husk to collect spills and water purification) / A.A. Khokhryakov, A. A. Ezhelev, S. V. Polovtsev, S. A. Kernozhits-kaya, V.B. Moshkovskiy //Voda i ekologiya: problemy i resheniya. 2007. № 3. Pp 46–52.
8. Dolgikh (Larina) O. G., Ovcharov S. N. Polucheniye neftesorbentov karbonizatsiyey luzgi podsolnechnika (Production of oil sorbents

by carbonization of sunflower husk) // *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2009. № 11. Pp 4–7.

Об авторах

Ларина Оксана Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии переработки нефти и промышленной экологии института нефти и газа ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Ставрополь, просп. Кулакова, 16/1, Researcher ID: O-3787-2018. Телефон: (8652) 33-06-60. E-mail: oksdolgikh@yandex.ru.

Овчаров Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии переработки нефти и промышленной экологии института нефти и газа ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Ставрополь, просп. Кулакова, 16/1, Scopus ID: 6506180690. Телефон: (8652) 33-06-60. E-mail: osn_tpnpe@mail.ru.

Калиниченко Андрей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии переработки нефти и промышленной экологии института нефти и газа ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Ставрополь, просп. Кулакова, 16/1. Телефон: (8652) 33-06-60. E-mail: andrey026rus@yandex.ru.

About the authors

Larina Oksana Gennadyevna, candidate of technical sciences, associate professor of chair of oil refining technology and industrial ecology institute of oil and gas of FGAOU VO «North Caucasus Federal University», Stavropol, 16/1 Kulakov avn. Researcher ID: O-3787-2018. Phone: (8652) 33-06-60. E-mail: oksdolgikh@yandex.ru.

Ovcharov Sergey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, professor of chair of oil refining technology and industrial ecology institute of oil and gas of FGAOU VO «North Caucasus Federal University», Stavropol, 16/1 Kulakov avn. Scopus ID: 6506180690. Phone: (8652) 33-06-60. E-mail: osn_tpnpe@mail.ru.

Kalinichenko Andrey Yuryevich, candidate of technical sciences, associate professor, head of chair of oil refining technology and industrial ecology institute of oil and gas of FGAOU VO «North Caucasus Federal University», Stavropol, 16/1 Kulakov avn. Phone: (8652) 33-06-60. E-mail: andrey026rus@yandex.ru.

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

УДК 551.509.616/551.509.617

Ватиашвили М.Р. «Институт генетики Тбилисского государственного университета им. И. Джавахишвили»
г. Тбилиси, Грузия, kbloto@bk.ru

**ОБЗОР МЕТОДОВ
ПРОТИВОГРАДОВОЙ ЗАЩИТЫ
В РЕГИОНЕ
ЦЕНТРАЛЬНОГО КАВКАЗА**

Введение: проведен краткий обзор методов воздействия на градовые процессы, применяемых в производственных работах по защите сельскохозяйственных культур от градобитий в регионе Центрального Кавказа.

Материалы и методы: комбинированный метод, методы конкуренции и ускорения процесса осадкообразования в объемах зон роста града и будущего градообразования градоопасных и градовых облаков, метод прерывания града на подступах защищаемой территории со стороны вторжения градовых облаков и метод прерывания града на защищаемых территориях региона Центрального Кавказа. Они отличаются друг от друга по научным концепциям и критериям засева, техническим средствам и технологиям засева, расходу реагента, качеству реализации концепции засева и методам оценки эффективности воздействия.

Результаты исследования: анализ многолетних материалов наблюдений по воздействию на градовые процессы, показал, что защита сельскохозяйственных культур от градобитий осуществляется успешно. Однако на ЗТ исследуемого региона все еще отмечаются отдельные случаи выпадения града со значительным ущербом сельскохозяйственных культур. Основными причинами выпадения града являются: организационно-технические причины; недостаточная изученность градовых процессов; низкая льдообразующая эффективность применяемых частиц кристаллизующих реагентов йодида серебра; отсутствие новых критериев распознавания и схем их засева градоопасных и градовых облаков.

Обсуждение и заключения: многие из вышеперечисленных проблем практически решены в работах автора, которые защищены патентом [6] и успешно применяются в противоградовой защите ВС Ставропольского края.

Ключевые слова: противоградовые ракеты, йодистое серебро, микрофизический и динамический засевы, градовое облако, прерывание града на ЗТ.

THE REVIEW OF METHODS OF ANTI-HAIL PROTECTION IN THE CENTRAL CAUCASUS REGION

Vatiashvili M.R. The Institute of Genetics of Tbilisi State University named after I. Dzhavakhishvili, Tbilisi, Georgia
kbloto@bk.ru

Introduction: the article gives a brief review of methods of affecting hailing used in production processes on agricultural crops protection from hail damage.

Materials and Methods: combined method, the methods of competition and acceleration of sludging in the range of hail growth area and future hail formation of hail-hazardous and hail clouds, the method of hail breaking on the approach lane of the protected area from the direction of hail clouds invasion and the method of hail breaking on the protected areas of the Central Caucasus region. They differ from each other in scientific conceptions and criteria of seeding, technical means and seeding techniques, reagent consumption, the quality of seeding conception realization and evaluation methods of the impact efficiency.

Results: the analysis of long-standing observations on affecting hail processes has revealed that the protection of agricultural crops from hail damage is successful. Nevertheless, there are some cases of considerable hail damage to agricultural crops on the protected areas of the region under research. The main causes of hailing are organizing and technical, insufficient research of hail processes, low ice formation efficiency of the utilized crystal reagent particles of argentum iodide, the lack of new criteria for recognizing and schemes of hail-hazardous and hail clouds.

Discussion and conclusions: many of the above problems are practically solved in the author's works, which are protected by the patent [6] and are successfully applied in the anti-hail protection of the military services of the Stavropol Territory.

Keywords: anti-hail rockets, argentum iodide, microphysical and dynamic seedings, hail cloud, hail breaking on the protected areas.

Введение

Одним из самых градоопасных регионов мира является

Центральный Кавказ, где с 1967 г. ведутся производственные работы по защите сельскохозяйственных (с/х) культур от градобитий. В южной части исследуемого региона расположены защищаемые территории (ЗТ) военизированных служб (ВС) Республики Грузия, охватывающие районы Южной и Восточной Грузии (соответственно Квемо Картли и Кахети) [3, 9]. В северной его части расположены ЗТ ВС Госкомгидромета Российской Федерации (РФ), охватывающие районы Краснодарского края, Кабардино-Балкарской и Карачаево-Черкесской республик и Республики Северная Осетия – «Алания» (соответственно КрВС и Северо-Кавказская ВС – СКВС) [1, 2, 7, 8].

Противогололедная защита (ПГЗ) с/х культур в Квемо Картли осуществлялась комбинированным методом, с применением артиллерийской технологии засева [3]; Кахети – методом конкуренции, с применением ракетной технологии засева [9]; Краснодарском крае, Кабардино-Балкарской и Карачаево-Черкесской республике и Республике Северная Осетия – «Алания» – методами конкуренции и ускорения процесса осадкообразования (УПО), с применением артиллерийской и ракетной технологии засева [1, 2, 14].

Артиллерийская технология засева включает в себя пусковые установки (ПУ) «КС-19» и противогололедные снаряды (ПГС) «Эльбрус-4», снаряженные частицами кристаллизующего реагента (ЧКР) йодистого серебра (AgI); ПУ «КС-19» и ПГС «Эльбрус-2», снаряженные частицами гигроскопического реагента натрия хлора (ЧГР NaCl) [3, 14].

Ракетная технология засева включает в себя: ПУ «ТКБ-04» и «ТКБ-040» и противогололедные ракеты (ПГР) типа «Алазань» и «Кристалл», снаряженные ЧКР AgI йодистого свинца (PbI_2) [2, 3, 9].

При воздействии на гололодные и голодные облака (соответственно объекты воздействия – ОВ 1-2-й и ОВ 3–4-й категорий): ЧКР AgI и PbI_2 диспергировались в объемах зон роста града (РГ) и будущего гололообразования (БГ) ОВ 1–4-й категорий на уровнях изотерм минус $6 \pm 3^\circ\text{C}$, а ЧГР NaCl – в объемах теплой части подоблачной и облачной атмосферы ОВ 1–4-й категорий на уровнях изотерм $15\text{--}0^\circ\text{C}$ [2, 3].

В момент распада Советского Союза (1989 г.) площади ЗТ в ВС Республики Грузия достигали 1 млн 150 тыс. га, а площади ЗТ в ВС РФ – 2 млн 421 тыс. га [1, 2, 7, 8, 11].

В 1989 г. ВС Республики Грузия прекратили свое дальнейшее существование. В 1990 г. все ВС РФ, работающие с применением артиллерийской технологии засева, были полностью переведены на ракетную технологию засева [1, 2, 7, 8]. Недостатками артиллерийской технологии засева по сравнению с ракетной технологии засева являются дискретность засева, большой расход ПГС и невозможность быстрого засева объемов в крупномасштабных голодных облаках, приводящих к их недозасеву а, следовательно, к отрицательным результатам физической и экономической эффективности в ПГЗ [1, 2, 7, 8].

В Ставропольском крае РФ в 1995 г. начала работать «Ставропольская Военизированная служба по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы», где с участием автора этой статьи были разработаны и внедрены в производственных работах ПГЗ два новых метода:

- «Метод прерывания града на подступах защищаемой территории со стороны вторжения голодных облаков» [7];
- «Метод прерывания града на защищаемых территориях региона Центрального Кавказа» [8].

Разработанные последние 2 метода не имеют аналога. Они стали одной из возможных причин увеличения в Ставропольском крае физической эффективности работ по искусственному регулированию осадков (ИРО) от 10 до 15% и ПГЗ от 60 до 99% [5, 6, 7, 8, 11].

Указанные выше комбинированный метод воздействия [3], методы конкуренции [9, 14] и ускорения процесса осадкообразования (УПО) [1, 2], разработанные в начале проведения ПГЗ (1967 г.), были условно названы методами воздействия первого поколения, а два последних метода воздействия, разработанные автором этой статьи – методами воздействия второго поколения [1, 2].

В представленной работе дается обзор и анализ разработанных методов воздействия первого и второго поколения, применяемых в ПГЗ региона Центрального Кавказа, для выявления наиболее эффективных среди них для успешного предотвращения и прерывания града на ЗТ и на ее подступах, со стороны вторжения градовых облаков.

Материалы и методы исследования

Использовались материалы:

- многолетних наблюдений за развитием ОБ 1–4-й категорий, развивающихся в естественных условиях и при проведении ПГЗ [7, 8];
- опытов по воздействию на градовые процессы и ИРО, проводимых различными методами воздействия [7, 8].

Для оценки физической и экономической эффективности ПГЗ, проводимой различными методами воздействий, привлекался физико-статистический метод исследования, в основу которого положены непараметрические статистические методы оценки.

Результаты исследования и их обсуждение

В основу проведения ПГЗ и ИРО были положены различные физические принципы, проводимыми различными методами ПГЗ ИРО [6–8].

Физические принципы ПГЗ и ИРО с привлечением ЧКР AgI

Они основаны на концепциях засева объемов зон РГ и БГ ОБ 1–4-й категорий, подвергшихся микрофизическому и динамическому за-севу ЧКР AgI на уровнях изотерм минус $6 \pm 3^\circ\text{C}$ [1, 2, 11].

Микрофизический засев, за счёт увеличения в объемах зон РГ и БГ ОБ 1–4-й категорий количества ПГС и ПГР (шт.) и/или концентрации ЧКР (N , м^{-3}) AgI и PbI₂ от $5 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^4 \text{ м}^{-3}$, способствует освоению нереализованной об-

лачной влаги в естественных условиях, дополнительному увеличению радиолокационной отражаемости (Z_m , dBZ); абсолютной водности (q_m , г/м³); размеров облачных частиц и частиц осадков (d , мкм), количества осадков на поверхности земли (Q , мм) [7, 8, 11].

Динамический засев за счёт увеличения в ЗФО ОБ 1–4-й категорий количества ПГС и ПГР и/или концентрации ЧКР AgI и PbI₂ от $5 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^5$ м⁻³ и более, способствует выделению скрытой теплоты кристаллизации при замерзании на них капель; дополнительному увеличению скорости восходящих потоков (W , м/с), среднеквадратических пульсаций скорости ветра (σ , м/с), коэффициента турбулентной диффузии (K , м²/с), высоты верхней границы (H_v , км) ОБ 1–4-й категорий, мощности их переохлажденной части (ΔH_{Π} , км), максимальной абсолютной водности (q_m , г/м³); выносу частиц крупы из зоны воздействия в наковальню, но не в зону выпадения осадков [1, 2] так, как скорости их гравитационного падения в зоне будущего градообразования меньше скорости восходящих потоков ($V_{\Gamma} = 4 \text{ м/с} \leq W_m > 4 \text{ м/с}$) [4, 7, 8, 10];

Микрофизический и динамический засе́вы сводятся к оценкам критериев и схем засе́ва, норм расхода количества ПГР (шт.) и/или ЧКР AgI и PbI₂ в объемах зон РГ и БГ ОБ 1–4-й категорий [5-8].

Физические принципы ПГЗ и ИРО с привлечением ЧГР NaCl

Они основаны на концепциях засе́ва областей теплой подоблачной и облачной атмосферы ЧГР NaCl и переохлажденной части объемов зон ОБ 1–4-й категорий ЧКР AgI [3, 10, 11].

С помощью ПУ КС-19 и ПГС «Эльбрус-2» твердые ЧГР NaCl с диаметрами от 1 до 10 мкм диспергируются в теплую часть подоблачного слоя в температурном интервале плюс 20 – плюс 10 °С, где они активно впитывают влагу из окружающей среды; в теплую часть облачного слоя в температурном интервале 10–0 °С, где они оседают на естественные облачные капли и активно впитывают влагу из окружающей среды; в нижнюю переохлажденную часть объемов зон ОБ 1–4-й категорий в температурном интервале минус 1 – минус 10 °С, где они оседают на облачные частицы (капли, снежинки и ледяные кристаллы) и активно впитывают влагу из окружающей среды.

Во всех трех случаях в результате обводнения, растворения твердых ЧГР NaCl образуются жидкие капли, которые при благоприятных условиях доходят до частиц осадков. Достигнув критических размеров капли насыщенных растворов хлоридов разбрызгиваются на несколько крупных и множество мелких капель. Далее эти капли за счет коалесценции начинают заново расти до частиц осадков, которые опять разбрызгиваются и т.д., то есть просматривается цепная реакция Ленгмюра [10]. Время и скорость роста жидких ЧГР будет зависеть от разности между насыщающей упругости водяного па-

ра и упругостью насыщения над поверхностью частиц хлоридов, находящихся в различных фазовых состояниях.

Зарождение крупных искусственных жидких ЧГР в теплой части подоблачного слоя и увеличение их количества в теплой и нижней переохлажденной частях ОБ 1–4-й категорий способствуют преждевременному подавлению слабых восходящих потоков (< 4 м/с) и ускорению процесса осадкообразования в них [3]; перераспределению водности между теплой и переохлажденной частями ОБ 1–4-й категорий в пользу теплой их части.

Некоторое количество искусственных жидких ЧГР с помощью вертикальных воздушных потоков из теплой части подоблачного слоя, теплой и нижней переохлажденной частей ОБ 1–4-й категорий попадает в среднюю и верхнюю переохлажденных частях облаков и облачных систем (ООС) в интервале высот 6–7 км. В теплый период года на этом уровне температура окружающего воздуха достигает минус 20 – минус 35°C. Процесс каплеобразования и рост капель будет продолжаться до тех пор, пока температура заморзания жидких ЧГР, зависящая от значений концентраций и эвтектической температуры не станет ниже температуры заморзания воды. Для насыщенного раствора NaCl они соответственно равны $C = 26\%$ и $t_3 = -2,2$ °C. Увеличение концентрации «потенциальных» искусственных зародышей градин в интервале температур минус 20 – минус 35°C и уменьшение дефицита естественных ледяных частиц в (ЗФО) способствует интенсивному протеканию процесса облако- и осадкообразования.

Методы ПГЗ, применяемые в регионе Центрального Кавказа

Комбинированный метод [3]

Метод предусматривает не увеличение начальной концентрации зародышей града, а ухудшение условий их роста. Он основан на одновременном применении ЧГР и ЧКР AgI и NaCl и ЧКР AgI, соответственно, диспергируемых в теплые части подоблачного и облачного слоев и в переохлажденной части объема зарождения и роста града градоопасного и градового облаков, которые приводят: к преждевременному подавлению слабых восходящих потоков (< 4 м/с) в зоне формирования осадков (ЗФО) и ускорению в ней процесса осадкообразования [3]; перераспределению влагозапаса между теплой и переохлажденной частями облака в пользу его теплой части [3].

Часть искусственных жидких капель ЧГР с помощью вертикальных воздушных потоков из теплой части градоопасного облака, может попасть в его переохлажденную часть и быть заморожена. Далее все происходит в соответствии действующего метода конкуренции, то есть отмечается уменьшение жидкокапельной влаги и размера градин [3, 14].

Метод конкуренции [9, 14]

Метод конкуренции основан на увеличении в объемах зон РГ ОБ 1–4-й категорий искусственных ЧКР AgI в 100–1000 раз, что в дальнейшем существенно может повлиять на уменьшение запаса жидкокапельной влаги и размера градин [9, 14]. Он базируется на физических представлениях о механизме образования града, сложившихся в ВГИ согласно, которых скорость восходящих потоков с высотой увеличивается, достигает максимального значения (W_m), а в дальнейшем уменьшается. Если W_m меньше скорости гравитационного падения V_G , то есть $W_m > V_K < 10$ м/с, то зона крупнокапельной фракции – зона аккумуляции не формируется (V_K – критическая скорость гравитационного падения разбрызгивающих капель). Если в области переохлажденной части ОБ $W_m > V_K$, то некоторые капли начинают замерзать. Они становятся зародышами града, которые в дальнейшем быстро растут за счет коагуляции с крупными каплями в зоне аккумуляции.

Метод ускорения процесса осадкообразования [1, 2]

Метод УПО предусматривает более раннее стимулирование процесса осадкообразования в объемах зон БГ ОБ 1–4-й категорий за счет создания в них искусственных ЧКР AgI с начальной концентрацией 10^{10} – 10^{11} м⁻³. На этих ЧКР в будущем образуются кристаллы, приводящие к агрегации и последующему обзёрнению облачными каплями. В течение 6–8 минут после такого засева образуется крупа миллиметровых размеров, которая при падении может стимулировать вымывание облачной воды и торможение слабых восходящих потоков. В результате на ИДВ радиолокатора отмечаются опускание или исчезновение радиоэха ОБ 1–4-й категорий [1, 2].

Анализ многолетних наблюдений за ОБ 1–4-й категорий, подвергшихся активному воздействию, показывает, что в объемах зон БГ невозможно стимулировать преждевременное выпадение осадков, способных подавлять восходящие потоки и вымывать облачную воду в течение 6–8 минут после начала воздействия. Гидрометеоры, развивающиеся в ОБ 1–4-й категорий под действием скорости восходящих потоков, не опускаются на поверхность земли, а наоборот, поднимаются вверх [7, 8].

Причинами являются: скрытая теплота кристаллизации, выделенная в объемах зон БГ ОБ 1–4-й категорий, при замерзании переохлажденных капель; увеличение температуры, скорости восходящих потоков и высоты верхней границы ОБ; вынос частиц крупы из зоны воздействия в наковальню так, как скорости их гравитационного падения в объемах зоны БГ меньше скорости восходящих потоков [7].

На вертикальном разрезе метеорадиолокатора опускание навеса радиоэха и его исчезновение в объемах зон БГ ОБ 1–4-й категорий имеет место тогда, когда значения радиолокационной отражаемости ($Z_m < 45$ dBZ), водности ($q_m < 1,24$ г/м³), размеров гидрометеоров ($d > d_{кр} = 1000$ мкм) и их концент-

раций ($N < N_m = 10^3 - 10^4 \text{ м}^{-3}$) соответствуют нормам расхода ПГР и/или ЧКР, при проведении работ по искусственному увеличению осадков (ИУО), характеризующихся микрофизическим засевом ЧКР AgI и PbI₂ [4, 7, 8].

За критический размер падающих гидрометеоров в нашем случае принимался диаметр $d_{кр} = 1000 \text{ мкм}$ которому, при заданной водности q_m , соответствует определенное значение критической концентрации этих частиц ($N_{кр}$) и скорости их гравитационного падения ($V_{г} \geq 4 \text{ м/с}$) [4, 7, 10].

В работах [1, 2] нормы расхода количества ПГР (N_i) «Кристалл» и «Алазань-6» в методе УПО в объемах зон БГ ОВ 1–4-й категорий рассчитываются с помощью уравнения:

$$N_i = K_i \left(\frac{S_i}{\sigma_j Y} + 2 \right), \quad (1)$$

- где K_i (шт.) – кратность засева в ОВ 1–4-й категорий;
 S_i (км²) – площадь проекции зоны засева на горизонтальную поверхность;
 σ_i (км²) – площадь, засеваемая одной ракетой для ракет «Алазань» $\sigma_i = 5 \text{ км}^2$, а «Кристалл» $\sigma_i = 8 \text{ км}^2$;
 $Y = 0,7$ – коэффициент эффективности использования трасс диспергирования реагента;
 2 – количество противораковых ракет ($N_{пгг}$) запускаемых с левой и правой стороны зоны засева с целью устранения влияния ветра на пусковой позиции на направление полета ракеты.

К недостаткам уравнения (1) можно отнести:

- нормы расхода ПГР (N_i) в объемах зон БГ ОВ 1–4-й категорий оцениваются без учета интенсивности стрельбы; вместо объемного засева зон будущего градообразования ОВ 1–4-й категорий применяется плоскостной засев; площадь, засеваемая одной ПГР (σ_j) берется равной площади прямоугольника шириной в 1 км и длиной 5 км независимо от значений коэффициента турбулентной диффузии ($5 - 1500 \text{ м}^2/\text{с}$), времени и радиуса распространения искусственных ЧКР с концентрациями от 10^{10} до 10^{11} м^{-3} коэффициент эффективности использования трасс диспергирования реагента (Y) берется 0,7, независимо от типа градового процесса, плотности распределения на ЗТ пунктов воздействия (ПВ) и запретных секторов;
- значения фактической продолжительности воздействия ($\Delta t_{в}$), связанные в неявном виде с кратностью засева ОВ 1-й

категории при однократном засеве могут достичь 9 мин., ОВ 2-й категории при двукратном засеве – 15 мин., ОВ 3-й категории при трехкратном засеве – 34 мин., ОВ 4-й категории при четырехкратном засеве – 43 мин. [6-8].

Перечисленные значения Δt_B существенно превышают продолжительность процесса градообразования (Δt_G) в пространственно-фиксированном объеме градового очага, изменяющегося от 4 до 24 мин., в среднем составляя 10–12 мин. [13]; продолжительность времени проявления эффекта воздействия (Δt_3) полученная для различных технологий засева и достигающая в ОВ 1-й категории 3–5 мин., ОВ 2-й категории 6–9 мин., ОВ 3-й категории 13–19 мин., ОВ 4-й категории 20–25 мин. [6–8]:

$$\Delta t_B > \Delta t_3 > \Delta t_G \quad (2)$$

Выявленные недостатки, присущие уравнению (1) и неравенству (2) могут привести к недостаточному по количеству и времени норм расхода ПГР в объемах зон БГ ОВ 1–4-й категорий и выпадению из них града со значительным ущербом с/х культур от градобитий [8].

Следует обратить внимание на следующие факты.

При отсутствии на прилегающей территории (ПТ) зон предварительно-го засева (ЗПЗ) метод УПО:

- не в состоянии прервать выпадение града из ОВ 3–4-й категории к подступам ЗТ [7];
- в состоянии частично прервать выпадение града к подступам ЗТ из зрелых ОВ 3–4-й категории, движущихся с ПТ в сторону ЗТ, если объемы зон БГ достигают радиуса действия ПГС и ПГР, выпущенных с ПУ, установленных вдоль границ ЗТ, со стороны их преимущественного вторжения – с запада и юго-запада [7];
- в состоянии при продвижении вглубь ЗТ ОВ 3–4-й категории привести к дальнейшему их ослаблению, но не полностью прерыванию града из них за счет многократного засева объемов зон БГ [6].

Например, ОВ 4-й категорий, при 4-кратном засеве с интервалом между ними 3,5 мин. [1, 2] и скорости движения 60 км/ч за $\Delta t_3 = 25$ мин. могут пройти расстояние вглубь ЗТ до 25 км, оставляя за собой градовую дорожку с ущербом сельскохозяйственных культур ($\Delta t_3 = 25$ мин. – среднее время проявления эффекта воздействия в ОВ 4-й категорий) [6-8].

При наличии на ПТ ЗПЗ метод УПО в состоянии прервать выпадение града на подступах ПТ, если ЗПЗ выбираются с учетом направлений и скоро-

сти перемещения ОВ 3–4-й категорий и времени достижения эффектов воздействий, равных соответственно 13–19 и 20–25 мин. [6, 8].

Например, для обработки ОВ 4-й категорий, перемещающихся с ПТ в сторону ЗТ Ставропольского края с максимальной скоростью 60 км/ч, при времени достижения эффекта воздействия, равным 25 мин, необходимо иметь распределение ПВ на ПТ на расстояниях до 25 км от границ ЗТ.

Организация сети на ПТ ЗПЗ в количестве более 10 ПВ со стороны вторжения градовых облаков, как показывает опыт проведения ПГЗ, практически невозможна, так как связана большими затратами.

Отмеченные выше недостатки метода УПО высшей степени присущи также методу конкуренции [14] и комбинированному методу [3].

Метод прерывания града на подступах защищаемой территории со стороны вторжения градовых облаков [6, 7]

В основу предлагаемого нового разработанного метода прерывания града воздействием на ООС, развивающихся на ЗТ со стороны вторжения ОВ 3–4-й категорий, положены следующие физические представления [7]. 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 [7]. В результате, к подступам ЗТ Ставропольского края, отмечается прерывание града из ОВ 3–4-й категорий ни за счет непосредственного (прямого) воздействия на ОВ 3–4-й категорий, а за счет воздействия на ООС, развивающихся на ЗТ со стороны вторжения градовых облаков [7].

Разработанный метод прерывания града на подступах ПТ из ОВ 3–4-й категорий, движущихся с ПТ в сторону ЗТ, не имеет аналога.

Метод прерывания града на подступах ЗТ включает в себя [7]:

- совершенствованную классификацию ООС, разработанную для районов региона Центрального Кавказа, с привлечением данных наземных метеорологических станций, самолетных и радиолокационных наблюдений и снимков ИСЗ [7, 8, 12];
- физические принципы активных воздействий на ООС ЧКР AgI при динамическом и микрофизическом засевах [7, 8];
- совершенствованные критерии пригодности засева ОВ 2-й категорий в работах по ПГЗ [7, 8];
- совершенствованные схемы засева ЗФО ООС различных классов ЧКР с помощью ПГР «Алазань-6» при проведении работ по ИРО [7].

Реализация метода прерывания града на подступах ЗТ, предусматривает:

- распознавание ОВ 3–4-й категорий, движущихся с ПТ в сторону границ ЗТ со скоростью (V , км/ч);
- оценку расстояния (R , км) между максимальной радиолокационной отражаемостью (Z_m , dBZ) ОВ 3–4-й категорий и границей ЗТ по линии предполагаемой траектории их перемещения;
- оценку времени достижения ОВ 3–4-й категорий (t , мин.) границ ЗТ по формуле: $t = R/V$ (мин.);
- распознавание пригодных для АВ и ИРО различных классов ООС, развивающихся на ЗТ со стороны вторжения ОВ 3–4-й категорий;
- оценку значений концентрации частиц (N_i , м^{-3}) в ООС различных классов по данным значений Z_m и/или абсолютной водности (q_m , $\text{г}/\text{м}^3$), при заданных критических размерах частиц ($d_{\text{икр}} = 500$ мкм), с целью выбора концепции микрофизического и/или динамического засевов [7, 8];
- оценку с помощью значений q_m , $d > d_{\text{икр}} = 500$ мкм и $N < N_{\text{икр}}$ условий искусственного увеличения осадков из ООС различных классов, развивающихся на ЗТ со стороны вторжения ОВ 3–4-й категории [7, 8];
- расчет с помощью уравнения турбулентной диффузии радиуса (L_D , км) и времени (t , с) распространения ЧКР в ЗФО ООС различных классов по данным: значений параметров коэффициента турбулентной диффузии (K , $\text{м}^2/\text{с}$), числа ЧКР на единицу пути по линии засева в момент начала диспергирования ($Q_i = 10^{11}$, м^{-1}) и заранее заданной конечной концентраций ЧКР в единице объема ЗФО ООС (C_R , м^{-3}) [7];
- оценку норм расхода количества ракет в ЗФО ООС различных классов, развивающихся на ЗТ со стороны вторжения ОВ 3–4-й категорий, в зависимости от: длины ЗФО (L_1 , км), в соответствии которой, выбирается длина ее засева; длины распространения ЧКР (L_2 , км), создаваемой отдельными ПГР, в зависимости от эффективного радиуса их действия [7];
- 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 рисунке 1 представлены фрагменты ОВ 3–4-й категорий и ООС различных классов, развивающихся соответственно на ПТ и ЗТ со сто-

Ставропольская ВС, Ставрополь, RUST
Карта кинетической энергии града (10 см)
Период с 05.09.2007, 17:01:40 по 22:59:23

АСУ-МРЛ 2006
2007-09-05 22-59-23

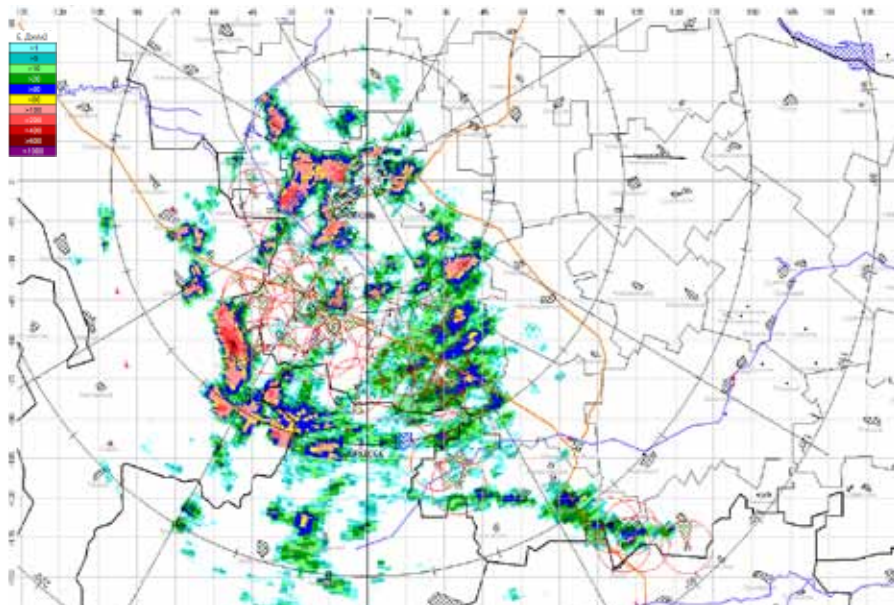


Рис. 1. Кинетическая энергия падающего града ОВ 1–4 категорий, (измерена 5 сентября 2007 г. на высоте $H = 3,5$ км над уровнем моря, порог чувствительности 35 dBZ) [7].

Fig. 1. The kinetic energy of the falling hailstones of OB 1–4 categories (measured on September 5, 2007 at a height of $H = 3.5$ km above sea level, the sensitivity threshold is 35 dBZ) [7].

роны вторжения на ЗТ ОВ 3–4-й категорий [7]. 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. [7, 8]; последние значения значительно ниже средних значений продолжительности воздействия и расхода изделий в ОВ 4-й категории, приведенных в [6–8].

**Метод прерывания града на ЗТ оптимальным
количеством и скорострельностью ПГР
в объемах зон БГ [6, 8]**

В основу разработанного метода предотвращения и прерывания града на ЗТ, из соответствующих развивающихся ОВ 1–2-й и 3–4-й категорий, были положены следующие физические представления [6, 8]: при 1–4-х кратных засевах соответствующих ОВ 1–4-й категорий оптимальным количеством и скорострельностью ПГР в объемах зон БГ, определяемыми экспериментальным путем и приводящими к положительным результатам в ПГЗ, продолжительности воздействий (Δt_B , мин.) должны быть не такими, как это следует из уравнения (1) и неравенства (2), а меньше продолжительности процесса градообразования в пространственно-фиксированном объеме градового облака (Δt_Γ) изменяющегося от 4 до 25 мин, в среднем – от 10 до 12 мин [13]; времени проявления эффектов воздействий (Δt_Σ), полученных для различных технологий засева и достигающих в ОВ 1-й категории – 5 мин, ОВ 2-й категории 6–9 мин, ОВ 3-й категории 13–19 мин, ОВ 4-й категории 2–25 мин. [6, 8]:

$$\Delta t_B \leq \Delta t_\Gamma \leq \Delta t_\Sigma. \quad (3)$$

Например, при четырехкратном засеве объемов зон БГ ОВ 4-й категорий в течение $\Delta t_B = 43$ мин. количеством ПГР $N = 100$ шт. «А-6», но еще недостаточным для создания в зоне будущего градообразования оптимальных концентраций ЧКР AgI ($10^{10} - 10^{11}$ м³ и более), может привести к его недозасеву и выпадению из него града с ущербом с/х культур [6, 8]. Значение $\Delta t_B = 43$ мин. рассчитано с помощью уравнения (1), а значение $N = 100$ шт. «А-6» взято из таблицы 1 работы [1] и равно среднему расходу ПГР в ОВ 4-й категорий [1, 2].

В рассмотренном конкретном случае интенсивность стрельбы в ОВ 4-й категории, характеризующая расход количества ПГР в единицу времени, рассчитывается следующим выражением:

$$N/\Delta t_B = 100 \text{ шт.}/43 \text{ мин.} = 2,3 \text{ шт./мин.}$$

При таком же количестве израсходованных ПГР «А-6», уменьшение Δt_B до 20 мин, соответствующее минимальному времени проявления эффекта воздействия (Δt_Σ) в ОВ 4-й категорий [6, 8], может привести к увеличению интенсивности стрельбы до 5 шт. «А-6»/мин. ($100 \text{ шт. «А-6»}/20 \text{ мин.} = 5 \text{ шт. «А-6»}/\text{мин.}$), а, следовательно, уменьшению радиолокационных критериев засева до их критических значений и прерыванию гра-

да на ЗТ. Это подтверждается неравенством (3), данными МРЛ и результатами объезда территорий, подвергшихся градобитию.

Предложенный метод прерывания града на ЗТ не имеет аналога. Он предусматривает распознавание ОВ 1–4-й категорий и оценку их скорости и направлению перемещения; критериев и схем засева площадей РГ и БГ, расположенных на фронтальном и наветренном флангах нависающего радиоэха; оптимальных норм расхода количества и скорострельности ПГР в объемах зон РГ и БГ:

$$n_i \approx 0,4\Delta V_{45}, \quad (4)$$

$$I_i = n_i / \Delta t_{\Phi} \approx 0,04\Delta V_{45}, \quad (5)$$

где n_i – количество ПГР «А–6» шт., израсходованных на один ОВ;
 ΔV_{45} – объем зоны повышенного радиоэха, ограниченный изопов-
верхностью $Z = 45$ dBZ;
 I_i – скорострельность ПГР (шт./мин.);
 Δt_{Φ} – фактическая продолжительность воздействия на один ОВ
(мин.).

На основании полученных оценок принимается решение о проведении воздействия, которое осуществляется не с интервалом 6 мин., а в каждом цикле обзора не однократно, а двукратно в ОВ 2-й категорий, трехкратно в ОВ 3-й категорий и четырехкратно в ОВ 4-й категорий [6, 8].

Выводы

1. Проведен обзор методов воздействия первого и второго поколения ПГЗ, применяемых в Военизированных службах региона Центрального Кавказа, где защита с/х культур от градобитий осуществляется успешно.
2. Исследования показывают, что, несмотря на достигнутые успехи на ЗТ региона Центрального Кавказа все еще отмечаются отдельные случаи выпадения града со значительным ущербом с/х культур. Они обусловлены недостаточной обработкой объемов зон РГ и БГ ОВ 1–4-категорий ПГР и/или ЧКР AgI; наличием запретных секторов и непростреливаемых участков на ЗТ; отсутствием новых критериев распознавания ОВ 1–4-й категорий и совершенствованных схем их засева.

3. Многие из вышеперечисленных недостатков в настоящее время практически устранены, а полученные результаты успешно применяются в ПГЗ ВС Ставропольского края.
4. Средняя физическая эффективность ПГЗ на ЗТ Ставропольского края составляет 96,7%, максимальная – 99,9%; экономическая эффективность ПГЗ – 360,1 млн руб.; рентабельность – 7,4 руб. на каждый потраченный руб.
5. Полученные результаты являются лучшими среди ВС региона Центрального Кавказа, которые получены не с помощью действующих методов конкуренции, комбинированного метода и действующего метода УПО, а с помощью двух новых разработанных методов воздействия: «Метод прерывания града на подступах защищаемой территории со стороны вторжения градовых облаков» и «Метод прерывания града на защищаемых территориях региона Центрального Кавказа». Эти методы не имеют аналога, защищены патентом [6] и внедрены в производственных работах ПГЗ, проводимой Ставропольской ВС по настоящее время.

**Библиографический
список**

1. Абшаев М.Т. Активное воздействие на градовые процессы. Руководящий документ РД.52.37.596-98. М., 1998. 32 с.
2. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М., Барекова М.В. Руководство по организации и проведению противоградовых работ. Нальчик: Печатный двор, 2014. 500 с.
3. Бартишвили Я.Т., Надибаидзе Г.А. Бегалишвили Н.А., Гудушаури Ш.Л. К физическим основам метода ЗакНИГМИ борьбы с градом // Труды ЗакНИГМИ. 1978. Вып. 67(73). С. 73- 82.
4. Ватиашвили М.Р., Калов Х.М. Размеры трансформации спектра размера гидрометеоров при естественном развитии и активном воздействии на конвективные процессы // Труды Всесоюзного семинара «Активные воздействия на градовые процессы и перспективы усовершенствования льдообразующих реагентов для практики активных воздействий». М.: Гидрометеиздат, 1991. С. 131-136.
5. 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.
6. 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.
7. Ватиашвили М.Р. Метод прерывания града на подступах защищаемой территории со стороны вторжения градовых облаков // Наука. Инновации. Технологии. 2016. №4. С. 7–24.
8. Ватиашвили М.Р. Метод прерывания града на защищаемых территориях региона Центрального Кавказа // Наука. Инновации. Технологии. 2018. №1. С. 7–22.
9. Карцивадзе А.И., Салуквадзе Т.Г., Лапинскас В.А. Некоторые вопросы методики воздействия на градовые процессы с использованием противоградовой системы «Алазани» // Труды института геофизики АН Грузии. 1975. Т. 26. С. 13–27.
10. Мейсон Б.ДЖ. Физика облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1961.
11. Сванидзе Г.Г., Бегалишвили Н.А., Ватян М.Р., Карцивадзе А.И., Гудушаури Ш.Л. Методические указания по организации и проведению работ по искусственному увеличению осадков из конвективных облаков с помощью противоградовой техники. М.: Гидрометеиздат, 1986. 25 с.
12. Облака и облачная атмосфера. Справочник / Под ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 647 с.
13. Абшаев М.Т., Макитов В.С. и др. Радиолокационные исследо-

вания процесса градообразования в кучево-дождевых облаках // Труды ВГИ. 1978. Вып. 39. С. 3-31.

14. Сулаквелидзе Г.К. Ливневые осадки и град. Л.: Гидрометеоздат, 1967. 421 с.

References

1. Abshayev M.T. Aktivnoye vozdeystviye na gradovye protsessy (Active influence on hail processes) // Rukovodyashchiy dokument RD.52.37.596-98.M (Guidance document РД.52.37.596-98.M). 1998. 32 p.
2. Abshaev M.T., Abshaev A.M., Malkarova A.M., Barekova M.V. Rukovodstvo po organizatsii i provedeniyu protivogradovykh rabot (The Manual on organizing and executing of anti-hail works). Nalchik: ООО «Pechatnyi dvor», 2014. 500 p.
3. Bartishvili Ya.T., Nadibaidze G.A., Begalishvili N.A., Gudushauri Sh.L. K fizicheskim osnovam metoda ZakNIGMI bor'by s gradom. (To the physical foundations of the ZakNIGMI method of hail control) // Trudy ZakNIGMI, Vyp.67 (73), 1978. P. 73–82.
4. Vatiashvili M.R., Kalov Kh.M. Razmery transformatsii spectra razmera gidrometeorov pri estestvennom razvitii i aktivnom vozdeistvii na konvektivnye protsessy (Transformation range of hydrometeor size spectrum when natural developing and active influencing on convection processes) // Trudy Vsesoyuznogo seminara «Aktivnye vozdeistviya na gradovye protsessy i perspektivy usovershenstvovaniya l'doobrazuyushchikh reagentov dlya praktiki aktivnykh vozdeistviy». M.: Gidrometeoizdat, 1991. P. 131–136.
5. Vatiashvili M.R. Utochnennyy kriterii zaseva OV 2-oi kategorii (The verified seeding criterion for the 2-nd category objects of influence) // Tsikly prirody I obshchestva. Materialy XVI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. Stavropol, 2008. P. 300-307.
6. Vatiashvili M.R., Dzhangurazov Kh.Kh., Kassirov V.P. Sposob aktivnykh vozdeystviy na gradovye protsessy (The way of active influences on hail processes) // Patent RF na izobreteniyе №2321871, zayavka № 2006 121792, a 01 G 15/10/ 2007 (Patent of the Russian Federation for invention №2321871, application № 2006 121792, a 01 G 15/10/ 2007).
7. Vatiashvili M.R. Metod preryvaniya grada na podstupakh zashchishchayemoy territorii so storony vtorzheniya gradovykh oblakov (Method of interrupting hail of the approach lanes of the protected area from the direction of hail clouds invasion) // Nauka. Innovatsii. Tekhnologii (Science. Innovation. Technologies). 2016. №4. P. 7-24.
8. Vatiashvili M.R. Metod preryvaniya grada na zashchishchaemykh territoriyakh regiona Tsentralnogo Kavkaza (The method of hail breaking on the protected areas of the Central Caucasus region) // Nauka. Innovatsii. Tekhnologii. 2018. №1. P. 7–22.

9. Kartsivadze A.I., Salukvadze T.G., Lapinskas V.A. Nekotorye vo-prosy metodiki vozdeistviya na gradovye protsessy s ispolzovaniem protivogradovoi sistemy «Alazani» (Some issues of method of af-fecting hail processes with anti-hail system «Alazani») // Trudy in-stitute geofiziki AN Gruzii. 1975. Is. 26. P. 13-27.
10. Maison B.G. Fizika oblakov (Cloud Physics). L.: Gidrometeoizdat, 1961.
11. Metodicheskie ukazaniya po organizatsii i provedeniyu rabot po iskusstvennomu uvelichiniyu osadkov iz konvektivnykh oblakov s pomosh'yu protigradovoi tekhniki. (Study guide on arranging and carrying out activities on artificial increasing of weather precipitation from convective clouds by means of anti-hail equipment) // G.G. Svanidze, N.A. Begalishvili, M.R. Vatian, A.I. Kartsivadze, Sh.L. Gu-dushauri. M.: Gidrometeoizdat, 1986. 25 p.
12. Oblaka i oblachnaya atmosfera. Spravochnik (Clouds and cloud atmosphere. Reference book) / Pod red. I.P. Mazina and A.Kh. Kh-giana. L.: Gidrometeoizdat, 1989. 647 p.
13. Radiolokatsionnye issledovaniya protsessa gradoobrazovaniya v kuchevo-dozhdevykh oblakakh (Radar studies of the process of city formation in cumulonimbus clouds) / Abshayev M.T., Makitov V.S. et al. // Trudy VGI (Proceedings of the VGI). 1978. Vol. 39. P. 3–31.
14. Sulakvelidze G.K. Livnevye osadki i grad (Cloud bursts and hailing). L.: Gidrometeoizdat, 1967, 421 p.

Поступила в редакцию 13.05.2018 г.

Принята к публикации 26.08.2018 г.

Сведения об авторе

Ватиашвили Михаил Рубенович. Кандидат географических наук, Доцент, Грузинский государственный научно-технический центр «Дельта» министерства обороны Грузии, Грузия, г.Тбилиси, ул. Габриеля Салоса, 191 Научный консультант по проектам.

About the author

Vatiashvili Mikhail Rubenovich. Candidate of geographical sciences The senior lecturer Georgian state scientific and technological center "Delta" Ministries of Defence of Georgia Scientific consultant for projects +995 598-341-451 Mivv123@mail.ru 191 Monk Gabriel Salos Ave. 0144.

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

УДК 551.578.7;004.942

Шаповалов В.А. «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик, Россия, vet555_83@mail.ru

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ФОРМИРОВАНИЯ ГРАДИН В ОБЛАКАХ
ПРИ ЕСТЕСТВЕННОМ РАЗВИТИИ
И АКТИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ
КРИСТАЛЛИЗУЮЩИМ РЕАГЕНТОМ**

Введение:

Все еще остаются малоизученными многие важные аспекты микрофизических процессов в градовых облаках из-за сложности теоретического анализа и экспериментального исследования. Недостаточно изучено взаимодействие термодинамических и микрофизических процессов в мощных конвективных облаках, электрические процессы, взаимодействие реагента с облачной средой. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки научно обоснованных методов активного воздействия на градовые облака.

Материалы и методы исследований:

В работе применялась трехмерная модель мощных конвективных облаков с детальным описанием термодинамических, микрофизических и электрических процессов. Решение уравнений модели выполнялось конечно-разностным методом по неявной схеме второго порядка точности по пространственным координатам и времени. При задании полей термодинамических параметров атмосферы в начальный момент времени использовались данные аэрологического зондирования или трехмерные данные из глобальной прогностической модели GFS. Результаты исследований и их обсуждение: Результаты численных экспериментов по исследованию взаимодействия физических процессов в мощных конвективных облаках показывают, что важным следствием деформации полей термодинамических характеристик облака под влиянием восходящих потоков, является увеличение времени нахождения градин (или их пути) в области, в которой термодинамические и микрофизические условия благоприятны для их роста. Проведено исследование изменения микроструктурных характеристик облака от концентрации искусственных кристаллов и от места их внесения при засеве градового облака кристаллизующим реагентом. Получено, что в области воздействия отмечается уменьшение радиолокационной отражаемости за счет появления множества кристаллов, из-за вызванной активным воздействием искусственной кристаллизации переохлажденных капель.

Выводы:

Численные эксперименты показали важную роль взаимодействия процессов различных типов в формировании микроструктуры облаков, в частности, в образовании и росте градовых частиц. Наиболее эффективным с точки зрения применения кристаллизующего реагента для уменьшения опасности облака является внесение его в ограниченную область, найденную в результате численных экспериментов. Определено влияние кристаллизующего реагента на микроструктурные параметры облака в результате засева.

Ключевые слова:

трехмерная модель, конвективное облако, численные эксперименты, рост градин, кристаллизующий реагент, радиолокационная отражаемость

Shapovalov V.A.

NUMERICAL SIMULATION OF THE FORMATION OF HAILSTONES IN THE CLOUDS AT THE NATURAL DEVELOPMENT AND AT THE ACTIVE INFLUENCE WITH THE HELP OF CRYSTALLIZING REAGENT

- Introduction:** Many important aspects of microphysical processes in hail clouds are still poorly understood due to the complexity of theoretical analysis and experimental research. The interaction of thermodynamic and microphysical processes in powerful convective clouds, electrical processes, interaction of the reagent with the cloud environment is not sufficiently studied. The relevance of the study is due to the need to develop scientifically valid methods of active impact to hail clouds.
- Materials and methods of research:** The paper used a three-dimensional model of powerful convective clouds with a detailed description of thermodynamic, microphysical and electrical processes. The solution of the model equations was performed by a finite-difference method according to an implicit scheme of second-order accuracy with respect to spatial coordinates and time. When specifying the fields of the thermodynamic parameters of the atmosphere at the initial time, aerological sounding data or three-dimensional data from the global prediction model GFS were used.
- Results of the research and their discussion:** The results of numerical experiments on the interaction of physical processes in high-power convective clouds show that an important consequence of the deformation of the fields of the thermodynamic characteristics of a cloud under the influence of ascending flows is an increase in the time of finding hailstones (or their path) in an area in which thermodynamic and microphysical conditions are favorable for their growth. A study was made of the change in the microstructural characteristics of the cloud from the concentration of artificial crystals and from the place of their application when the hail cloud was seeded with a crystallizing reagent. It is received that in the field of influence the radar reflectivity decreases due to the appearance of many crystals, because of the induced supercooled droplets caused by the artificial crystallization.
- Conclusions:** Numerical experiments have shown the important role of interaction of processes of various types in the formation of the microstructure of clouds, in particular, in the formation and growth of hail particles. The most effective from the point of view of using the crystallizing reagent to reduce the danger of the cloud is to introduce it into a limited area, found as a result of numerical experiments. The effect of the crystallizing reagent on the microstructural parameters of the cloud as a result of seeding is determined.
- Key words:** three-dimensional model, convective cloud, numerical experiments, growth of Hailstones, crystallizing reagent, radar reflectivity

Введение

Одной из наиболее сложных в физике облаков является градовая проблема. Этой проблеме посвящено множество теоретических и экспериментальных исследований у нас в стране и за рубежом, в ходе которых установлены закономерности образования и развития градовых облаков различных типов, изучено их строение, разработаны методы воздействия на них [1-6]. Тем не менее, до сих пор многие вопросы, связанные с образованием и ростом градин, остаются нерешенными. В частности, все еще остаются малоизученными многие важные аспекты микрофизических процессов в градовых облаках из-за сложности теоретического анализа и экспериментального исследования. Недостаточно изучено взаимодействие термодинамических и микрофизических процессов в мощных конвективных облаках, электрические процессы, взаимодействие реагента с облачной средой. В то же время проблемы усовершенствования существующих и разработки научно-обоснованных методов активного воздействия на градовые облака требуют глубокого изучения этих вопросов.

Представляет научный и практический интерес численное исследование эффективности воздействия кристаллизующим реагентом на градовые облака. Эта проблема рассматривалась во многих работах [7-15]. Недостатком многих исследований является использование моделей с параметризованной микрофизикой, в которых сложно корректно формализовать активное воздействие. В частности, невозможно корректно описать рост искусственных кристалликов и их взаимодействие с облачной средой из-за ограниченности числа классов размеров частиц (от 5 до 15), а значит и их физических свойств (скорость падения, коэффициент коагуляции и т.д.).

В данной работе представлены результаты численных экспериментов по моделированию засева градового облака кристаллизующим реагентом, которые проведены на основе трехмерной модели с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов.

Материалы и методы исследований

Для выполнения численных экспериментов использовалась трехмерная модель конвективных облаков с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов, описание которой подробно изложено в работах [7-10].

Функция $u(x, y, z, m, t)$ в системе уравнений модели облака описывает источник искусственных кристаллов, а ее вид зависит от того, какими средствами осуществляется воздействие. В данной работе моделировался монодисперсный источник:

$$u(x, y, z, m, t) = \gamma(t) \cdot \delta(m - m_{ucm}) \cdot \delta(x - x_{ucm}) \cdot \delta(y - y_{ucm}) \cdot \delta(z - z_{ucm}) \quad (1)$$

где $\gamma(t)$ – функция, описывающая интенсивность источника искусственных кристаллов;
 $m_{ист}$ – масса искусственного кристалла;
 $x_{ист}, y_{ист}, z_{ист}$ – координаты источника в облаке;
 δ – дельта-функция. Моделировались также многоточечные источники, представляющие линейный или площадной засев.

Контрольным значением в численных экспериментах служило число крупных градовых частиц, находящихся в облаке за время развития:

$$F[u] = \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} \int_0^{\infty} \int_0^T f_2(x, y, z, m, t) dx dy dz dm dt, \quad (2)$$

где m_k – масса градины, способной достичь поверхности земли и нанести ущерб [8].

Для выяснения влияния активного воздействия на градоопасность облака было просчитано множество вариантов, в которых варьировались параметры источника искусственных ледяных кристаллов. Исследовалось изменение микроструктурных характеристик облака от концентрации искусственных кристаллов, от места воздействия, времени их внесения.

В каждой серии численных экспериментов предварительно проводился расчет формирования микроструктуры облака при естественном развитии (функция $u(x, y, z, m, t) = 0$). Было получено значение числа крупных градовых частиц, соответствующее естественному развитию облака. Затем проводились расчеты по перебору пространственного положения источника и его мощности.

Моделирование эволюции ансамбля облачных частиц с помощью разработанной модели проводилось в трехмерной прямоугольной области, выделенной в тропосфере. В области рассчитываются поля термодинамических параметров, таких как: давление, температура, влажность, а также характеристики воздушных потоков и другие параметры облака.

При задании полей термодинамических параметров атмосферы в начальный момент времени использовались как одномерные (горизонтально однородные) данные аэрологического зондирования, так и трехмерные данные из GFS модели [10].

Моделировался случай активного воздействия, в котором внесение реагента осуществляется на уровне -10°C ($z = 5$ км) во фронтальной части облака. С использованием данных о содержании AgI в современных противогорадовых ракетах, была определена начальная концентрация искусственных частиц в шлейфе за ракетой.

Решение уравнений модели выполняется численными методами и требует аппроксимации задачи на пространственной сетке. Вследствие этого минимальная пространственная сеточная ячейка модели ограничена шагами по высоте и горизонтали. В силу дискретного представления задачи начальная концентрация в шлейфе за ракетой должна быть пересчитана на объем, соответствующий минимальной сеточной ячейке. Время расширения шлейфа до объема ячейки модели оценивалось при расчетах на более мелких сетках с шагами: 0,1; 1; и 10 м. Источник в начальный момент времени из-за разбиения расчетной области на ячейки имеет объем $V_{\text{ист}} = dx \cdot dy \cdot dz \text{ (м}^3\text{)}$.

Трансформация облачного объема, содержащего искусственные кристаллы, прослеживалась в последовательные моменты времени 1, 3, 5, 10 минут и более.

Результаты исследований и их обсуждение

Максимальные значения скорости восходящих потоков на стадии появления первого радиоэхо (-10 dBZ) достигают 20 м/с на уровне $4,5 \div 5 \text{ км}$. Картина воздушных потоков представлена на рисунке 1 изолиниями вертикальных скоростей $W(x,y,z)$. При анализе полей термодинамических характеристик облака отмечалась их деформация под влиянием вертикальных потоков воздуха. Поле температуры, как и поле скоростей потоков воздуха изменяется со временем в облаке.

В серии расчетов активное воздействие на градовое облако моделировалось включением точечного источника искусственных кристаллов с постоянной интенсивностью равной $106 \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ частиц, действующего в течение 1 минуты, начиная с момента времени $t = 24 \text{ мин}$. Искусственные частицы, выросшие в результате активации частиц реагента, считаются примерно одинаковыми, и относятся к первому классу сетки размеров, примененной в модели. Размер искусственных частиц составлял 2 мкм. По результатам расчетов определено, что воздействие более эффективно в области повышенной влажности на температурном уровне $-10 \text{ }^\circ\text{C}$.

На рисунке 2 приведены в двух ракурсах результаты другого случая моделирования активного воздействия на градовое облако льдообразующим реагентом (воздействие моделировалось на 25 минуте развития).

В области воздействия в представленных случаях отмечается уменьшение радиолокационной отражаемости за счет появления множества кристаллов, из-за вызванной воздействием искусственной кристаллизации переохлажденных капель. На рисунках 2 (а,б) приведено одно и то же облако с разных ракурсов при естественном развитии (вид сбоку и вид сверху под небольшим углом). На рисунках 2 (в,г) приведено это же облако, но уже при воздействии на него кристаллизующим реагентом. Видно, что в области воздействия радиолокационная отражаемость уменьшается, образуется «провал».

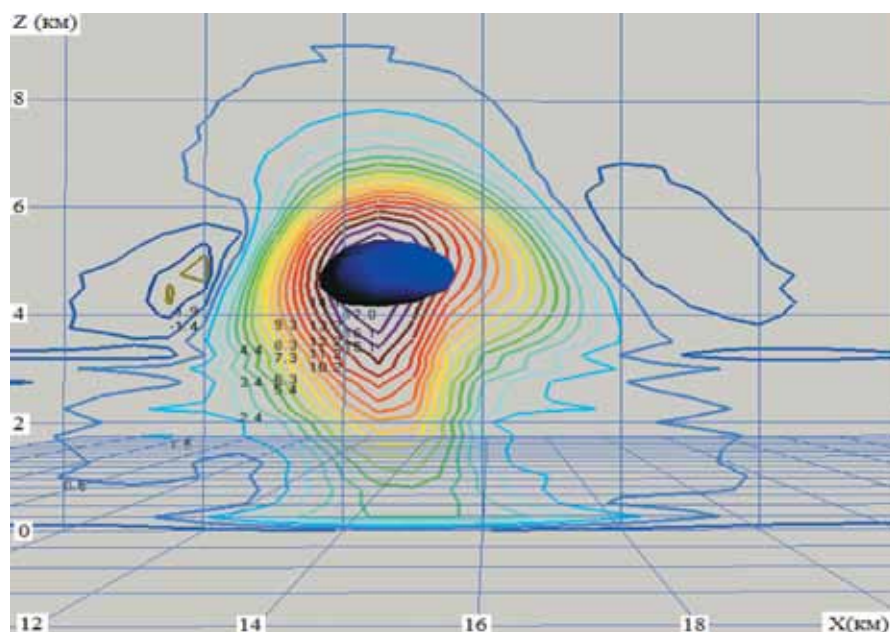


Рис. 1.

Вертикальный разрез мощного конвективного облака. Изо-поверхность водности (7 г/м^3) и изолинии вертикальных потоков воздуха (W) на 30-й минуте развития.

Fig. 1. A vertical cross-section of the powerful convective cloud. Isosurface liquid water content (7 g/m^3) and isoline of vertical air flows (W) at the 30th minute of evolution.

Остановимся на некоторых результатах исследований формирования микроструктуры градовых облаков, а также движения и роста градовых частиц в них, полученных на основе моделей. Как показали результаты расчетов, взаимодействие процессов различных типов в этих облаках играет важную роль в формировании микроструктуры облаков, в частности, в образовании и росте градовых частиц [7]. Вследствие деформации полей термодинамических параметров под влиянием динамических процессов в мощных конвективных облаках формируется зона, в которой происходит образование и

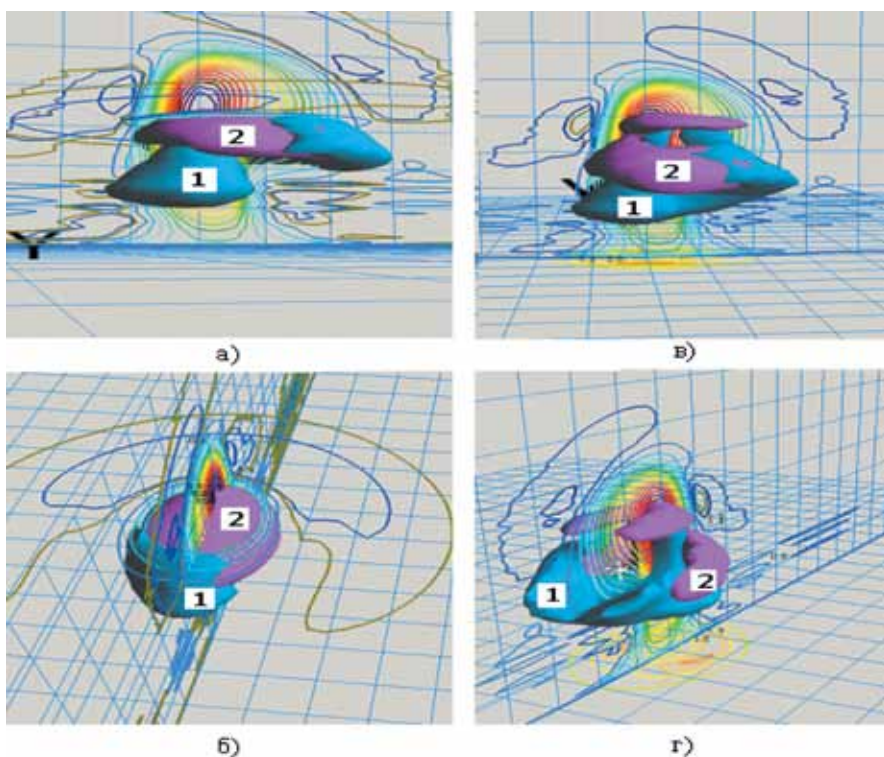


Рис. 2.

Облако, виды с двух ракурсов на 30-й минуте после воздействия. Показаны изоповерхности области капель (1), крупных ледяных кристаллов (2) и изолинии восходящих и нисходящих потоков. Варианты а), б) соответствуют естественному развитию облака, варианты в), г) – облаку после воздействия.

Fig. 2. The cloud, views from two angles at the 30th minute after exposure. The isosurfaces of the droplet region (1), large ice crystals (2), and isolines of ascending and descending flows are shown. Options a), b) correspond to the natural evolution of the cloud, options c), d) – the cloud after active impact.

рост градовых частиц. Эта зона располагается между изотермами $-10. \div -30^{\circ}\text{C}$ и в области интенсивных восходящих потоков. С применением разработанной трехмерной модели в данной работе получено, что образование первичных градовых частиц происходит в верхней части этой зоны. В дальнейшем под влиянием горизонтальной составляющей вектора скорости воздушных потоков и силы тяжести происходит смещение градин от места образования и вниз. При этом увеличиваются размеры градин за счет захвата поступающих снизу в эту зону переохлажденных капель, также происходит увеличение их

концентрации за счет образования новых градин в нижних частях этой зоны. Важно отметить, что следствием деформации полей термодинамических характеристик облака под влиянием восходящих потоков, является увеличение времени нахождения градин (или их пути) в области, в которой термодинамические и микрофизические условия благоприятны для их роста.

В работе исследованы физические процессы, приводящие к достижению эффекта при воздействии. В частности, искусственные кристаллы активизируют процесс замерзания переохлажденной капельной фракции, за счет которой растут градины. Появление большого количества мелких кристаллов приводит к нарушению равновесного состояния между жидкокапельной и кристаллической фазами, начинается сублимационный рост кристаллов за счет перегонки пара с капель. В свою очередь, процесс испарения капель приводит к интенсификации их кристаллизации, кроме этого в результате увеличения размеров кристаллов происходит интенсивный захват ими переохлажденных капель.

Таким образом, внесение частиц льдообразующего реагента по предложенному способу приводит к замораживанию воды в зоне роста градовых частиц, т.е. к ухудшению условий роста градовых частиц. При этом не требуется чрезмерных затрат реагента, так как «работает» неустойчивость системы переохлажденные капли – кристаллы. Наиболее эффективным с точки зрения использования реагента и уменьшения градоопасности облака при проведении противоградовых работ является их внесение в ограниченную область, наиболее чувствительную к воздействию.

Очевидно, что эффективное решение проблемы активных воздействий на градовые облака невозможно без глубоких исследований закономерностей формирования макро- и микроструктурных характеристик облаков на основе полных физико-математических моделей, учитывающих взаимодействие процессов различных видов [16–19].

Рассмотрим результаты расчетов моделирования переноса и распространения частиц реагента в конвективном облаке, полученные с использованием трехмерной модели. Их пример представлен на рисунке 3, на котором изображен расширившийся вследствие турбулентной диффузии шлейф от противоградовой ракеты через 10 мин после воздействия. Представлены область формирования и роста градин (изоповерхность водности 5 г/м^3) – обозначена цифрой 1, и шлейф ракеты (изоповерхность концентрации искусственных частиц 10^3 1/м^3) – обозначена цифрой 2.

В численных экспериментах варьировались: количество точечных источников и концентрация ледяных кристалликов в них, место и время внесения реагента. Искусственные частицы переносятся воздушными потоками, а расширение первоначально обработанной области происходит под влиянием турбулентной диффузии. Степень расширения засеянного объема определяется величиной коэффициента турбулентной диффузии.

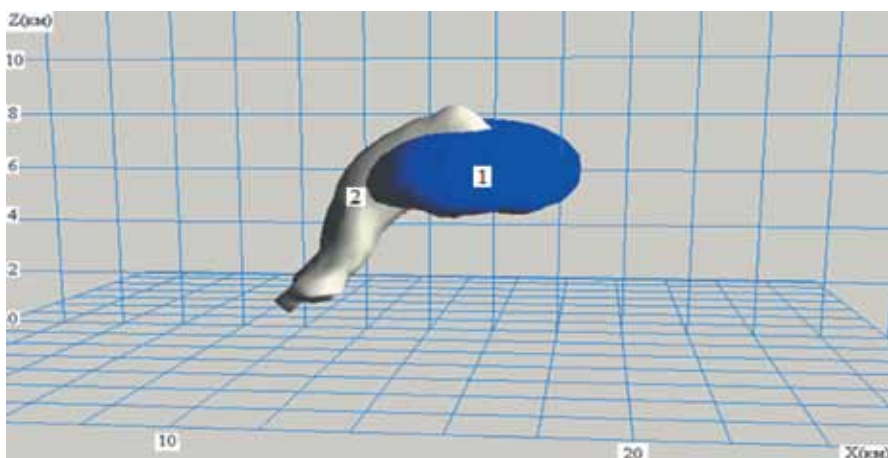


Рис. 3.

Распространение кристаллизующего реагента при ракетном засеве через $\Delta T = 10$ мин. Среднее значение K в центре облака составляет $500 \text{ м}^2/\text{с}$.

Fig. 3. The distribution of crystallizing reagent during rocket seeding after $\Delta T = 10$ min. Average value of K in the center of the cloud is $500 \text{ м}^2/\text{с}$.

Полученные данные показывают, что распространение искусственных частиц при значениях коэффициента турбулентной диффузии, которые наблюдаются на периферии облака, вне центральной части, идет медленнее. При этом в течение времени 2–5 минут реагент остается в ограниченном объеме по траектории полета противоградовой ракеты.

Выводы

На основе численных экспериментов на основе трехмерной модели градового облака получены следующие результаты:

Определено влияние кристаллизующего реагента на микроструктурные параметры облака в результате засева. Определена область, воздействие в которую приводит к существенному эффекту по предотвращению образования крупных градин. Область внесения реагента по результатам расчетов должна быть расположена в центре облака, на температурном уровне $-10. \div -12 \text{ }^\circ\text{C}$, в области умеренных восходящих потоков (5^{-10} м/с) и больших значений коэффициента турбулентной диффузии ($>300 \text{ м}^2\text{с}^{-1}$).

Физика влияния искусственных ледяных частиц на микроструктуру облака заключается в том, что воздействие в наиболее водной части облака мелкими искусственными кристалликами в концентрации 106 м^{-3} приводит к частичной или полной ликвидации там жидкокапельной фракции, в результате чего число крупных градин, образующихся в облаке, уменьшается.

Исследовано распространение искусственных ледяных кристаллов в облаке с учетом фактических потоков, термодинамических условий, взаимодействия с облачной средой. В течение времени до 5 минут реагент остается в ограниченном объеме по траектории засева.

Библиографический список

1. Сулаквелидзе, Г. К. Ливневые осадки и град. Л.: Гидрометеиздат. 1967. 412 с.
2. Хоргуани В.Г. Микрофизика зарождения и роста града. М.: Гидрометеиздат, 1984. 184 с.
3. Browning, K.A., Foote G.B. Airflow and hail growth in super cell storms and some implications for hail suppression. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* № 102. 1975. P. 499–534.
4. Pruppacher H.R., Klett J.D. *Microphysics of clouds and precipitation*// D.Reidel Pub. Co., 1978. 714 p.
5. Simpson, J. The National Hail Research Experiment Report on the Alberta Hail Project. NCAR Technical Note. 1976. doi:10.5065/D64Q7RX8.
6. Zakinyan R. G. On the theory of hailstone growth. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* V. 44 I. 2. 2008. P 207–212. <https://doi.org/10.1134/S0001433808020084>.
7. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шаповалов В. А. Физика облаков и активных воздействий на них. – Нальчик: «Печатный двор», 2017. 240 с.
8. Ashabokov, B.A., Shapovalov A.V. A numerical model for controlling the formation of the microstructure of a hail cloud. *Izvestiya - Atmospheric and Ocean Physics* V. 32, I. 3, 1996, P. 333-338.
9. Ashabokov, B.A., Shapovalov, A.V., Kuliev, D.D., Prodan, K.A., Shapovalov, V.A. Numerical simulation of thermodynamic, microstructural, and electric characteristics of convective clouds at the growth and mature stages. *Radiophysics and Quantum Electronics*. Volume 56, Issue 11. 2014. P. 811–817
10. Ашабоков Б.А., и др. Физика градовых облаков и активных воздействий на них: состояние и направления развития. Нальчик: Печатный двор, 2013. 216 с.
11. Веремей, Н. Е., Довгалюк Ю. А., Затевахин М. А., Игнатьев А. А., Морозов В. Н., Пастушков Р. С. Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака // Труды ГГО, Вып. 582. 2016. С. 45–91.
12. Владимиров, С. А., Пастушков Р. С. Комплексный метод активных воздействий на конвективные облака с целью регулирования осадков. Трёхмерное численное моделирование // Труды ГГО. Вып. 582. 2016. С. 116–127.
13. Довгалюк, Ю. А., Веремей Н. Е., и др. Концепция разработки численной нестационарной трехмерной модели эволюции осадкообразующего конвективного облака в естественных ус-

ловиях и при активных воздействиях// Труды ГГО, Вып. 282. 2016. С. 7–44.

14. Danielsen, E.F., Bleck R. and Morris B.A. Hail growth by stochastic collection in a Cumulus model//J. Atmos. Sci. Vol.29. № 1. 1972. P. 135–155.
15. Farley, R.D., Orville H.D. Numerical modeling of hailstorms and hailstone growth. Part I: Preliminary model verification and sensitivity tests. J. Climate Appl. Meteor., 25, 1986. P. 2014–2035.
16. Khain, A.P., Lynn B.H. Simulation of a supercell storm in clean and dirty atmosphere using weather research and forecast model with spectral bin microphysics, J. Geophys. Res., 114. 2009. P. 2963–2982.
17. Meyers, M. P., Walko R. L., Harrington J. Y., Cotton W. R. New RAMS cloud microphysics parameterization. Part II: The two-moment scheme // Atmos. Research. V. 45. № 1. 1997. P. 3–29.
18. Miller, K.; Gadian A.; Saunders C.; Latham J.; Christian H. Modeling and observations of thundercloud electrification and lightning, ATMOS RES, 58, 2001. P. 89–115.
19. Orville, H.D., Kopp F.J. Numerical simulation of the life history of a hailstorm. J. Atm. Sci. Vol.34. № 10. 1977. P. 1596–1618.

References

1. Sulakvelidze, G. K. Livnevye osadki i grad (Rainfall and hail). L.: Gidrometeoizdat. 1967. 412 p. (in Russ)
2. Horguani V.G. Mikrofizika zarozhdeniya i rosta grada (Microphysics of nucleation and hail growth). Moscow: Gidrometeoizdat, 1984. 184 p. (in Russ)
3. Browning, K.A., Foote G.B. Airflow and hail growth in super cell storms and some implications for hail suppression. Quart. J. Roy. Met. Soc. 1975. № 102. P. 499–534.
4. Pruppacher H.R., Klett J.D. Microphysics of clouds and precipitation// D.Reidel Pub. Co., 1978. 714 p.
5. Simpson, J., The National Hail Research Experiment Report on the Alberta Hail Project. NCAR Technical Note , 1976. doi:10.5065/D64Q7RX8.
6. Zakinyan R. G. On the theory of hailstone growth. Izv. Atmos. Ocean. Phys. V. 44 I. 2. 2008. P 207–212. <https://doi.org/10.1134/S0001433808020084>.
7. Ashabokov, B.A., Fedchenko L.M., Shapovalov A.V., Shapovalov V. A. Fizika oblakov i aktivnyh vozdeystvij na nih (Physics of clouds and active influences on them). – Nal'chik: «Pechatnyj dvor», 2017. 240 p. (in Russ)
8. Ashabokov, B.A., Shapovalov A.V. A numerical model for controlling the formation of the microstructure of a hail cloud. Izvestiya - Atmospheric and Ocean Physics V. 32, I. 3, 1996, P. 333-338.
9. Ashabokov, B.A., Shapovalov, A.V., Kuliev, D.D., Prodan, K.A., Shapovalov, V.A. Numerical simulation of thermodynamic, microstructural, and electric characteristics of convective clouds at the

- growth and mature stages. Radiophysics and Quantum Electronics. Volume 56, Issue 11. 2014. P. 811–817
10. Ashabokov B.A. i dr. Fizika gradovyh oblakov i aktivnyh vozdeystvij na nih: sostojanie i napravlenija razvitija (The physics of hail clouds and active influences on them: the state and directions of development). Nal'chik: Pechatnyj dvor, 2013. 216 p. (in Russ).
 11. Veremej, N. E., Dovgaljuk Ju. A., Zatevahn M. A., Ignat'ev A. A., Morozov V. N., Pastushkov R. S. Opisanie bazovoj chislennoj nestacionarnoj trehmernoj modeli konvektivnogo oblaka (Description of the basic numerical nonstationary three-dimensional model of a convective cloud) // Trudy GGO, V. 582. 2016. P. 45–91.
 12. Vladimirov, S. A., Pastushkov R. S. Kompleksnyj metod aktivnyh vozdeystvij na konvektivnye oblaka s cel'ju regulirovanija osadkov. Trjohmernoe chislennoe modelirovanie (Complex method of active influences on convective clouds for the purpose of precipitation regulation. Three-dimensional numerical modeling) // Trudy GGO. V. 582. 2016. P. 116–127. (in Russ).
 13. Dovgaljuk, Ju. A., Veremej N. E., i dr. Koncepcija razrabotki chislennoj nestacionarnoj trehmernoj modeli jevoljucii osadkoobrazujushhego konvektivnogo oblaka v estestvennyh uslovijah i pri aktivnyh vozdeystvijah (The concept of development of a numerical non-stationary three-dimensional model for the evolution of the sedimentary convective cloud under natural conditions and under active influences) // Trudy GGO, V. 282. 2016. P. 7–44. (in Russ).
 14. Danielsen, E.F., Bleck R. and Morris B.A. Hail growth by stochastic collection in a Cumulus model // J. Atmos. Sci. Vol.29. № 1. 1972. P. 135–155.
 15. Farley, R.D., Orville H.D. Numerical modeling of hailstorms and hailstone growth. Part I: Preliminary model verification and sensitivity tests. J. Climate Appl. Meteor., 25, 1986. P. 2014–2035.
 16. Khain, A.P., Lynn B.H. Simulation of a supercell storm in clean and dirty atmosphere using weather research and forecast model with spectral bin microphysics, J. Geophys. Res., 114. 2009. P. 2963–2982.
 17. Meyers, M. P., Walko R. L., Harrington J. Y., Cotton W. R. New RAMS cloud microphysics parameterization. Part II: The two-moment scheme // Atmos. Research. V. 45. № 1. 1997. P. 3–29.
 18. Miller, K., Gadian A., Saunders C., Latham J., Christian H. Modeling and observations of thundercloud electrification and lightning, Atmos. Res., 58, 2001. P. 89–115.
 19. Orville, H.D., Kopp F.J. Numerical simulation of the life history of a hailstorm. J. Atm. Sci. Vol.34. № 10. 1977. P. 1596–1618.

Рукопись поступила в редакцию: 14.05.2018, принята к публикации: 26.08.2018

Об авторе

Шаповалов Виталий Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, отдел физики облаков, ФГБУ "Высокогорный геофизический институт", Телефон: +79187855350, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9701-6820> Scopus ID: 57190966150, Researcher ID: J-9696-2015, E-mail: atajuk@mail.ru.

About the author

Shapovalov Vitaly Alexandrovich, candidate of physico-mathematical Sciences, senior researcher, Department of cloud physics, Federal state budget institution "High-Mountain geophysical Institute", Phone: +79187855350, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9701-6820> Scopus ID: 57190966150, Researcher ID: J-9696-2015, E-mail: atajuk@mail.ru.

Научное издание

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ

2018

Выпуск 3



Издательство Северо-Кавказского
федерального университета.
г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1.

Корректор – М.И. Толмачев.
Компьютерная верстка – О.Г. Полевич.

Подписано в печать 19.10.2018 г. Выход в свет 29.10.2018 г.
Формат 70 × 108 1/16. Гарнитура Times New Roman. Бумага
офсетная. Усл. печ. л. 21,00. Тираж 1000 экз. Цена 534 руб.

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