

Министерство образования и науки
Российской Федерации

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал
Северо-Кавказского федерального
университета

ISSN 2308–4758



Выпуск № 1, 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. Балегга, д-р физ.-мат. наук, академик. РАН (САО РАН, п. Нижний Архыз); С. В. Рязанцев, д-р экон. наук, член-корр. РАН (ИСПИ РАН, г. Москва); В. С. Тикуннов, д-р геогр. наук, профессор (МГУ им. Ломоносова, г. Москва); С. Пестрак, профессор (Институт Жана Лямюра 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. Молодикова, канд. геогр. наук (Центрально-Европейский университет, г. Будапешт); В. И. Наац, д-р физ.-мат. наук, профессор; Т. Г. Нефедова, д-р геогр. наук, вед. науч. сотрудник РАН (ИГ РАН, г. Москва); П. М. Полян, д-р геогр. наук, вед. науч. сотрудник РАН (ИГ РАН, г. Москва); В. В. Разумов, д-р геогр. наук, профессор; Л. Д. Тимченко, д-р ветеринар. наук, профессор; Л. Д. Цатурян, д-р мед. наук, профессор (Ставропольский гос. мед. университет, г. Ставрополь); Н. И. Червяков, д-р техн. наук, профессор; В. А. Шальнев, д-р геогр. наук, профессор; Н. А. Щитова, д-р геогр. наук, профессор; А. С. Молахосеини, канд. наук, доцент (Исламский университет Азад, Керман, Иран); Х. А. А. Кдаис, канд. техн. наук, профессор (Иорданский университет науки и технологии, Амман)
Свидетельство о регистрации	ПИ № ФС77–52723 от 8.02.2013
Подписной индекс	Объединенный каталог. ПРЕССА РОССИИ. Газеты и журналы: 94011
Журнал включен	в БД «Российский индекс научного цитирования». Журнал «Вестник Ставропольского государственного университета» перерегистрирован в журнал «Наука. Инновации. Технологии» в связи с переименованием учредителя.
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	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. Belozarov, 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. Belozarov, Chief Editor, Doctor of Geographical Sciences, professor; M.Ch. Zalikhanov, Dr. of Geographical Sciences, professor, academician of the Russian Academy of Sciences (Mountain Geophysical Institute, Nalchik); A.G. Hramtsov, Dr. Technical Sciences, Professor, academician of the Russian Academy of Sciences; Y.Y. Balega, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, academician of the Russian Academy of Sciences (SAO RAS, p. Lower Arhiz); S.V. Ryazantsev, Dr. of Economic Sciences, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (ISPR RAS, Moscow); V.S. Tikunov, Doctor of Geographical Sciences, professor (Lomonosov Moscow State University, Moscow); S. Pestrak, Professor (Institute Jean Lamour, Measurement and electronic architectures group, Nancy, France)
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. Belozarov, Dr. of Geographical Sciences, professor, editor in chief; T.P. Bondar', MD, professor; V.B. Borodulin, MD, Professor (Saratov State Medical University, Saratov); O.A. Butova, MD, professor; Gerasimenko T.I., Dr. of Geographical Sciences, Professor (Orenburg State University, Orenburg); Gridin V.A., Dr. of geological-mineralogical Sciences, Professor; L.I. Gubareva, Sc. D., Professor; T.I. Dzhandarova, Sc. D., Associate Professor; Y.I. Dikanskiy, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor; L.A. Dinevich, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Tel-Aviv University, Tel-Aviv); K.V. Erin, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor; A.I. Zhakin, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Southwest State University, Kursk); A.R. Zakinyan, candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor; A.O. Ivanov, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Yeltsin's Ural Federal University); A.A. Kolyada, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor (Belarusian State University, Minsk); S.A. Kunikin, Ph.D., Associate Professor; A.D. Lodygin, Dr. of Technical Sciences, associate professor; A.V. Lysenko, Dr. of Geographical Science, associate professor; I.N. Molodikova, Ph.D. (Central European University, Budapest); V.I. Naats, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor; T.G. Nefedova, Dr. of Geographical Sciences, Leading Researcher, Russian Academy of Sciences (IG RAS, Moscow); P.M. Polyani, Dr. of Geographical Sciences, Leading Researcher, Russian Academy of Sciences (IG RAS, Moscow); V.V. Razumov, Dr. of Geographical Sciences, Professor; L.D. Timchenko, Dr. of Veterinary Sciences, Professor; 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
©	FGAOU VO «North Caucasus Federal University», 2018

СОДЕРЖАНИЕ

«Наука. Инновации. Технологии», № 1, 2018

ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Ватиашвили М.Р.** Метод прерывания града на защищаемых территориях региона Центрального Кавказа. 7
- Редькина Т.В.** Преобразования бэклунда для системы уравнений в частных производных третьего порядка 23
- Савотченко С.Е., Горлов А.С.**
Моделирование волновых процессов в жидкости под действием колебаний мембраны в трубе 43
- Степкина М.Ю., Кудряшова О.Б., Муравлев Е.В.**
Взаимодействие распыленных заряженных мелкодисперсных порошков с электронейтральными жидкофазными и твердофазными аэрозольными средами 55
- Сурнева О.Б., Яновская О.С.**
Параболическое уравнение с показательной нелинейностью как условие совместности линейной системы 65
- Чиркунов Ю.А.** Подмодели трехмерной модели Вестервельта при отсутствии диссипации 81

НАУКИ О ЗЕМЛЕ**Батчаев М.И., Закинян Р.Г.**

Математическая модель паводков с распределенными параметрами. 95

Водопьянова Д.С., Скрипчинская Е.А.,**Нефедова М.В., Диденко П.А.**

Антропогенная преобразованность и природный потенциал ландшафтов Апанасенковского района 103

Кушнир К.В., Ивлиева О.В.

Эффективность функционирования туристско-рекреационного комплекса как фактор территориального развития (пример Азовского побережья России) 117

Плачинта И.Г.

Разработка приема анализа влияния экономического фактора на миграцию (на примере Акмолинской области) 131

Разумов В.В., Беккиев М.Ю.,**Разумова Н.В., Шагин С.И.**

Масштабы и опасность наводнений на Северном Кавказе 143

Тикунова И.Н., Судакова А.Е.

Туристский потенциал стран Шелкового пути 161

Харченко В.М., Колядова Г.В.,**Галай Б.Ф., Бейтуганова М.А.**

Геотектоника и геодинамика структур растяжения континентов и океанов, связь с рудонефтегазоносностью и сейсмичностью 181

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ**Беляев Н.Г., Анфиногенова О.И., Лисова И.М.**

Характеристика показателей периферической крови мужчин с различным объемом суммарной двигательной активности 195

Филиппова А.М., Денисова Е.В., Андрусенко С.Ф.

Разработка новых стимуляторов роста ацидофильной палочки на основе фракций топинамбура 203

Севрюкова Г.А., Настинова Г.Э.,**Товмасын Л.А., Севрюкова П.Л.**

Функциональное состояние мозгового кровообращения в зависимости от локализации переходной зоны в грудных отведениях экг на фоне активной ортостатической пробы 211

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ 221**ABOUT THE AUTHORS 223****CONTENTS 225**

ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

«Наука. Инновации. Технологии», № 1, 2018

УДК 551.509.616

Ватиашвили М.Р. [Vatiashvili M.R.]

МЕТОД ПРЕРЫВАНИЯ ГРАДА НА ЗАЩИЩАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЯХ РЕГИОНА ЦЕНТРАЛЬНОГО КАВКАЗА

The method of hail breaking on the protected areas of the Central Caucasus region

Исследуются градоопасные и градовые облака, развивающиеся в естественных условиях и подвергшиеся активному воздействию частицами кристаллизующего реагента йодистого серебра на защищаемых территориях военизированных служб исследуемого региона. Выявлено, что причиной выпадения катастрофического града на защищаемой территории является их несвоевременная и недостаточная обработка противоградовыми изделиями. Разработан объективный метод прерывания града на защищаемых территориях, основанный на оценках оптимальных норм расхода и скорострельности изделий в этих облаках. В 2003-2007 гг. метод прошел экспериментальную проверку на материалах защищаемой территории Ставропольской военизированной службы по активному воздействию на градовые процессы и другие геофизические процессы. Он был успешно внедрен в оперативную работу этой службы. Средняя физическая эффективность противоградовой защиты составила 95,7%. Разработанный метод может быть рекомендован различным странам мира при планировании и проведении научно-исследовательских и опытно-производственных работ по воздействию на градовые процессы.

The article gives the research of hail-hazardous and hail clouds naturally developing and actively affected by the crystal reagent particles of argentum iodide on the protected areas of militarized services of the analysis region. It was revealed that disastrous hailing on the protected area is caused by their ill-timed and insufficient treatment with anti-hail stuffs. The objective method of hail breaking on the protected areas based on estimating optimal application and firing rates in these clouds has been worked out. From 2003 to 2007 the method was being experimentally checked on the stuffs of the protected area of Stavropol militarized service on active hail influencing and other geophysical processes. It was successfully implemented into operational activities of this service. The average physical efficiency of anti-hail protection was estimated at 95.7%. This method can be recommended to different countries when planning and carrying out scientific, experimental and production activities on influencing hailing.

Ключевые слова: градовые облака, противоградовые ракеты и снаряды, прерывание града, частицы кристаллизующего реагента.

Key words: hail clouds, anti-hail missiles and rockets, hail breaking, crystal reagent particles.

ВВЕДЕНИЕ

Производственные работы по защите сельскохозяйственных (с/х) культур от градобитий в регионе Центрального Кавказа проводятся с 1967 года. В южной части исследуемого региона расположены защищаемые

территории (ЗТ) военизированных служб (ВС) республики Грузия, охватывающие районы Восточной Грузии (Кахети), а в северной его части – ЗТ ВС Росгидромета Российской Федерации (РФ), охватывающие районы Краснодарского и Ставропольского краев, Кабардино-Балкарской и Карачаево-Черкесской республик и Республики Северная Осетия – Алания [1, 11].

В основу активных воздействий (АВ) на градовые процессы положены методы конкуренции (МК) и ускорения процесса осадкообразования (УПО) в объемах зон роста града (РГ) и будущего градообразования (БГ) объектов воздействия (ОВ) 1–4-й категорий [1, 14]. ОВ 1–2-й категорий относятся к градоопасным, а ОВ 3–4-й – градовым облакам.

В Республике Грузия и РФ площади ЗТ соответственно достигают 900 тыс. и 2 млн 461 тыс. га [1, 11]; повторяемости ОВ 3–4-й категорий, зарождающихся на ЗТ – 40% и 69%, а вторгшиеся из прилегающих территорий (ПТ) на ЗТ – 60% и 31% от общего числа взятых случаев [5, 8–11]; физическая эффективность противоградовой защиты (ПГЗ) – 75–85% [5, 11] и 80–98% [1, 8–11]. Несмотря на достигнутые успехи, на ЗТ ВС исследуемого региона все еще отмечаются случаи пропуска катастрофического града с ущербом с/х культур. Они обусловлены несовершенством действующих МК и УПО, не учитывающих ряд важных факторов, отрицательно влияющих на их физическую и экономическую эффективность. Анализ многолетних материалов по воздействию на градовые процессы показал, что методы конкуренции и УПО в состоянии предотвратить и частично прервать выпадение града на ЗТ и на ее подступах если:

- на пунктах воздействия (ПВ) пусковые установки (ПУ), оснащенные противоградовыми изделиями (ПГИ), установлены на ЗТ и вдоль ее границ, а радиусы действия этих изделий достигают объемов зон РГ и БГ ОВ 3–4-й категорий;
- в объемах зон РГ и БГ ОВ 1–4-й категорий отмечается недозасев оптимальным количеством норм расхода ПГИ (n_i), снаряженных частицами кристаллизующего реагента (ЧКР) AgI с начальными концентрациями $n_i^* = 10^{10} - 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

ПГИ включает в себя противоградовые снаряды (ПГС) и противоградовые ракеты (ПГР).

Нормы расхода количества ПГР «Алазань-6» в объемах зон БГ ОВ 1–4-й категорий в методе УПО рассчитываются с помощью уравнения, приведенного в [1]. Согласно этому уравнению рассчитанные значения продолжительности воздействий ($\Delta t_{\text{в}}$), 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, 9]. Эти значения существенно превышают значения продолжительности:

- процесса градообразования (Δt_{Γ}) в пространственно-фиксированном объеме градовых очагов, развивающихся в естественных условиях и изменяющихся от 4 до 24 мин, в среднем составляя 10–12 мин [12];
- времени проявления эффекта воздействия (Δt_{Ξ}), полученные для различных технологий засева и достигавшие для 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. [2].

Такое распределение значений $\Delta t_{\text{в}}$ относительно значений Δt_{Γ} и Δt_{Ξ} , как правило, приводит к недозасеву ЧКР, диспергируемыми с помощью ПГИ в объемах зон РГ и БГ ОВ 1–4-й категорий и ущербу с/х культур от градобитий на ЗТ. Условием недозасева является следующее неравенство:

$$\Delta t_{\text{в}} > \Delta t_{\Gamma} > \Delta t_{\Xi}. \quad (1)$$

Целью представленной работы является разработка объективного метода предотвращения и прерывания града на ЗТ скорострельностью (ППГС) ПГР и/или ЧКР в объемах зон РГ и БГ ОВ 1–4-й (скорострельность – отношение оптимальных норм расхода ПГИ и/или ЧКР в объемах зон РГ и БГ ОВ 1–4-й категорий за промежуток времени $\Delta t_{\text{в}}$, не превышающего значения Δt_{Γ} и Δt_{Ξ} , полученных экспериментальным путем [2, 12]).

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалами исследования послужили радиолокационные наблюдения за параметрами ОВ 1–4-й категорий, развивающихся в мае–сентябре 1974–2007 гг. на ЗТ ВС региона Центрального Кавказа в естественных условиях и при проведении ПГЗ. К ним относятся [1–9]:

- радиолокационные параметры ОВ 3–4-й категорий, включающих в себя: мощности (ΔH_{45} , км), площади (ΔS_{45} , км²) и объемы (ΔV_{45} , км³) переохлажденной части крупнокапельной фракции, ограниченные изоповерхностями радиолокационной отражаемости $Z = 45$ dBZ;
- параметры воздействия ОВ 1–4-й категорий, включающих в себя продолжительности времени воздействий ($\Delta t_{\text{в}}$, мин), процесса градообразования в пространственно-фиксированном объеме градового облака (Δt_{Γ} , мин), проявления эффекта воздействия (Δt_{Ξ} , мин) и количество израсходованных ПГС «Эльбрус-4» и ПГР типа «Алазань» (n_i , шт.), снаряженных ЧКР AgI (n_i^* , м⁻³);

- комплексные параметры, включающих в себя расход ПГС и ПГР в единице объема ($n_i / \Delta V_{45}$, шт./км³), за единицу времени (скорострельность – $I = n_i / \Delta t_B$, шт./мин), в единице объема за единицу времени (интенсивность воздействия – $v_i = n_i / \Delta V_{45} * \Delta t_B$, шт./ (км³ * мин)).

В оценках физической эффективности противоградовой защиты (ПГЗ) привлекались непараметрические статистические методы, не требующие знания вида распределения анализируемых параметров [13]. В табл. 2: D_T и D_3 , Z_T и Z_3 – табличные и экспериментальные значения D-критерия Колмогорова–Смирнова и критерий серии Вальда–Вольфовица; знак «+» указывает на существенность расхождения между распределениями повторяемостей и между средними значениями радиолокационных параметров, параметров воздействия и комплексных параметров в опытах с положительным и отрицательным эффектами воздействий (соответственно ПЭВ и ОЭВ) если, при уровне значимости $\alpha = 0,05$ значения $D_T = 0,19 < D_3 = 0,23$ и $Z_T = -1,96 > Z_3 = -5,6$).

Опыт считался положительным, если после внесения в объемах зон РГ и БГ ОВ 1–4-й категорий оптимального количества ПГИ и /или ЧКР с концентрациями $10^{10} - 10^{11} \text{ м}^{-3}$ отмечалось прерывание града на ЗТ и выполнялось следующее неравенство [6].

$$\Delta t_B \leq \Delta t_T \leq \Delta t_3, \quad (2)$$

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В основу разработанного объективного метода ППГС ПГИ и/или ЧКР в объемах зон БГ ОВ 1–4-й категорий положены следующие физические представления. При 1–4-х кратных засевах ОВ 1–4-й категорий ПГР и/или ЧКР, определяемыми экспериментальным путем и приводящими к положительным результатам в ПГЗ, значения Δt_B [6, 8, 9] должны быть не более значений Δt_T и соответствующих значений Δt_3 [2] при различных технологиях засева и технических средств воздействия, удовлетворяющих неравенству (2).

Предложенный объективный метод предотвращения и прерывания града на ЗТ не имеет аналога. Решение поставленной задачи является актуальным.

2.1. Физические принципы ПГЗ и ИРО

Они основаны на концепциях [11]:

- преждевременного разрушения облаков нисходящими потоками, инициированными реактивными струями самолета

- тов и ПГР, продуктами взрыва ПГС «Эльбрус-4» и сбросом с вершин облачности грубодисперсных аэрозолей;
- искусственного регулирования процесса осадкообразования при микрофизическом и динамическом засевах ЧКР объемов зон формирования осадков (ЗФО) конвективных ячеек.

Микрофизический засев за счёт увеличения в ЗФО конвективных ячеек (КЯ) количества ПГР и/или концентрации ЧКР AgI от $5 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^4 \text{ м}^{-3}$, способствует освоению в них нереализованной облачной влаги в естественных условиях. Это приводит к дополнительному увеличению радиолокационной отражаемости Z_m и абсолютной водности q_m , размеров облачных частиц и частиц осадков d , а также количества осадков Q на поверхности земли.

Динамический засев за счёт увеличения в ЗФО КЯ количества ПГР и/или концентрации ЧКР AgI от $5 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ и более, способствует: выделению скрытой теплоты кристаллизации при замерзании на них капель; дополнительному увеличению скорости восходящих потоков W , среднеквадратических пульсаций скорости ветра σ , коэффициента турбулентной диффузии K ; росту высоты их верхней границы H_v , мощности переохлажденной части ΔH_{Π} , максимальной абсолютной водности q_m и количества осадков на поверхности земли Q .

Микрофизический и динамический засева сводятся к оценкам критериев и схем засева ОБ 1–4-й категорий оптимальных норм расхода количества ПГР и/или ЧКР AgI в объемах ОБ 1–4-й категорий.

2.2. Совершенствованный радиолокационный критерий засева ОБ 2-й категории

В основу действующих критериев засева ОБ 1–4-й категории положены значения радиолокационных параметров, характеризующих степень градоопасности в операциях по воздействию (табл. 1) [1]. Здесь: ΔH_{Z_m} , (км) – высота появления первого радиоэха выше над уровнем изотермы 0°C (H_0); Z_m (15 dBZ) – максимальная радиолокационная отражаемость по диаметру рассеивающихся частиц в области отрицательных температур; ΔH_{35} и ΔH_{45} (км) – мощности переохлажденной части радиоэха ОБ 1–4-й категорий, ограниченные изоконтурными радиолокационной отражаемости 35 и 45 dBZ [7].

Недостатком действующих критериев засева ОБ 1–4-й категории является то, что при выявлении развивающихся ОБ 2-й категорий, характеризующихся параметрами $35 < Z_m < 55 \text{ dBZ}$ и $\Delta H_{35} > 2,5 \text{ км}$ [1], не привлекается та-

Таблица 1. КРИТЕРИЙ ЗАСЕВА ОВ 1-4-й КАТЕГОРИИ

Параметры ОВ	Категория ОВ			
$Z_m, 15 \text{ dBZ}$	$15 < Z_m < 35$	$15 < Z_m < 35$	$Z_m < 55$	$Z_m < 65$
ΔH_{35}	$1 < \Delta H_{Z_m} < 4$	$\Delta H_{35} > 2,5$	$\Delta H_{45} > 3$	$\Delta H_{45} > 4$

кой информативный параметр, как превышение высоты максимальной радиолокационной отражаемости ΔH_{Z_m} над уровнем изотермы 0°C (H_0), однозначно характеризующий их фазовую структуру [7]:

$$\Delta H_{Z_m} = H_{Z_m} - H_0. \quad (3)$$

Если по данным МРЛ в ОВ 2-й категорий параметр Z_m фиксируется в их теплой части ($\Delta H_{Z_m} < 0$), то они являются неградоопасными, а в их переохлажденной его части ($\Delta H_{Z_m} \geq 0$), то они, при естественном развитии с высокой вероятностью могут перейти в ОВ 3–4-й категорий и подлежат немедленному воздействию [7–9]. Совершенствованный критерий засева ОВ 2-й категорий может существенно повлиять на уменьшение их количества, расхода ПГР и затрат на их приобретение.

Параметр ΔH_{Z_m} дополнительно уточнялся в зависимости от высоты расположения изотермы 0°C над уровнем моря (H_0). Воздействию подвергаются все объекты 2-й категории, если при $H_0 < 2,5$ км значение $\Delta H_{Z_m} > 0$ км, при $H_0 = 2,5 \div 3,5$ км значение $\Delta H_{Z_m} > 1$ км и при $H_0 > 3,5$ км значение $\Delta H_{Z_m} > 2$ км.

Совершенствованный критерий засева ОВ 2-й категории в 2006–2007 гг. прошел апробацию на ЗТ ВС Ставропольского края [7]. За отмеченный период воздействию подверглись 258 ОВ 2-й категорий с $\Delta H_{Z_m} \geq 0$ и не подвергались воздействию 869 ОВ 2-й категорий со значениями параметра $\Delta H_{Z_m} > 0$. Если учесть, что на ЗТ ВС Ставропольского края на обработку одного ОВ 2-й категории в среднем расходовалось 8 ПГР «Алазань-6», то на обработку 869 ОВ с $\Delta H_{Z_m} < 0$ потребовалось бы 6952 ПГР. Так как стоимость одной ракеты составляла 8 тыс. руб. (по ценам 2006 и 2007 гг.), то в результате отсеивания случаев с ОВ $\Delta H_{Z_m} > 0$, было сэкономлено 55,6 млн руб.

Таким образом, экономическая эффективность ПГЗ дополнительно была увеличена на 55,6 млн руб. по сравнению со средней экономической эффективностью ПГЗ, достигающей в Ставропольском крае 360,1 млн рублей [7]. Совершенствованный критерий засева ОВ 2-й категории успешно внедрен в производственных работах ПГЗ, проводимой на ЗТ ВС Ставропольского края.

Они основаны на концепциях [11]:

- преждевременного разрушения облаков нисходящими потоками, инициированными реактивными струями самолетов и ПГР, продуктами взрыва ПГС «Эльбрус-4» и сбросом с вершин облачности грубодисперсных аэрозолей;
- искусственного регулирования процесса осадкообразования при микрофизическом и динамическом засевах ЧКР объемов зон формирования осадков (ЗФО) конвективных ячеек.

Микрофизический засев за счёт увеличения в ЗФО конвективных ячеек (КЯ) количества ПГР и/или концентрации ЧКР AgI от $5 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^4 \text{ м}^{-3}$, способствует освоению в них нереализованной облачной влаги в естественных условиях. Это приводит к дополнительному увеличению радиолокационной отражаемости Z_m и абсолютной водности q_m , размеров облачных частиц и частиц осадков d , а также количества осадков Q на поверхности земли.

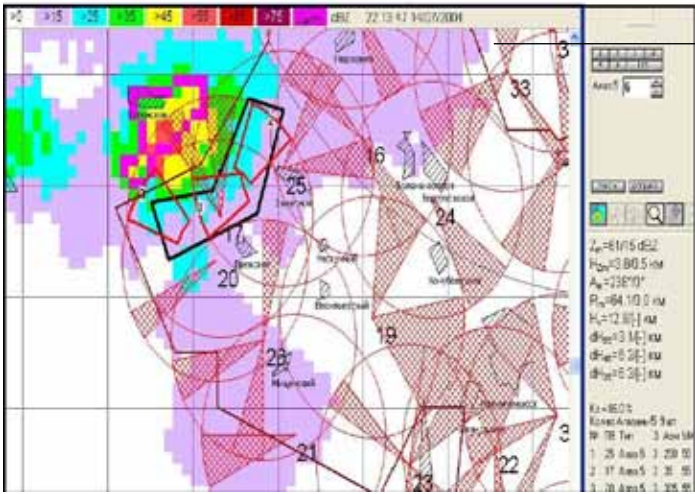
Динамический засев за счёт увеличения в ЗФО КЯ количества ПГР и/или концентрации ЧКР AgI от $5 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ и более, способствует: выделению скрытой теплоты кристаллизации при замерзании на них капель; дополнительному увеличению скорости восходящих потоков W , среднеквадратических пульсаций скорости ветра σ , коэффициента турбулентной диффузии K ; росту высоты их верхней границы H_v , мощности переохлажденной части ΔH_p , максимальной абсолютной водности q_m и количества осадков на поверхности земли Q .

Микрофизический и динамический засева сводятся к оценкам критериев и схем засева ОБ 1–4-й категорий оптимальных норм расхода количества ПГР и/или ЧКР AgI в объемах ОБ 1–4-й категорий.

2.3. Совершенствованные схемы засева ОБ 1–4-й категорий

Засев ОБ 1–4-й категорий при любом типе градового процесса (ГП) осуществляется на уровне изотермы минус $6 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$, соответствующей порогу льдообразующего действия используемого реагента [1]. В случаях высокого навеса радиоэха и высокого первого радиоэха засев осуществляется на уровне их нижней границы (рис. 1в и рис. 1г). В ОБ 1-й категорий области нависающего радиоэха внутри изоконтур $Z_m = 15 \text{ dBZ}$ засеваются однократно (рис. 1а); ОБ 2-й категорий фронтальный и наветренный фланги нависающего радиоэха по всей площади навеса радиоэха – двукратно с интервалом 6 мин (рис. 1б); ОБ 3-й и 4-й категорий области будущего градообразования, располо-

в) Пример засева
ОВ 3-й катего-
рии;



г) Пример засева
ОВ 4-й катего-
рии.

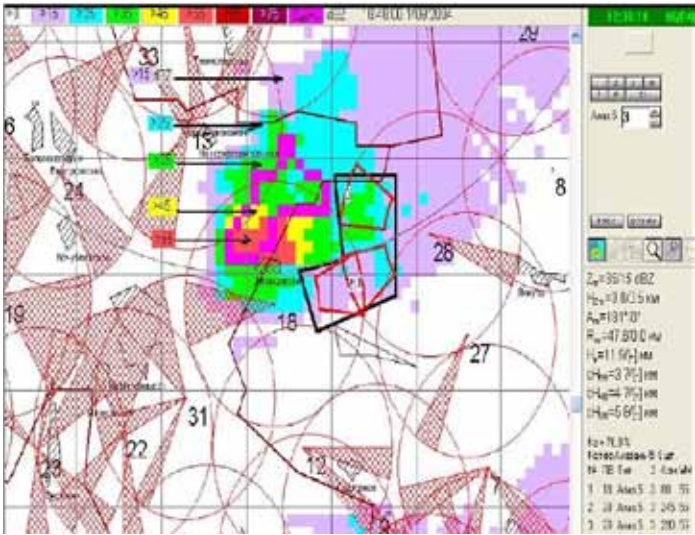


Рис. 1. Схемы засева ОВ 1–4-й категорий.

2.4. Оценка скорострельности ПГР и оптимальных норм расхода в ОВ

Оценка проводилась в результате сопоставления вероятностей появления опытов с ПЭВ и ОЭВ при различных значениях радиолокационных параметров, параметров воздействия и комплексных параметров (табл. 2). Вероятности ПЭВ и ОЭВ рассчитывались по столбцам, а распределения их повторяемости – по строкам. Анализ показал [6, 8, 9], что с увеличением:

- значений радиолокационных параметров (ΔH_{45} , ΔV_{45}) и параметров воздействия (n_i , Δt_{Φ}) отмечается уменьшение числа появления опытов с ПЭВ [6, 8], обусловленное недостаточной по количеству ракет (n_i) и несвоевременной по времени (n_i , Δt_{Φ}) обработке объемов зон БГ в ОВ 3–4-й категорий, приводящих к выпадению из них града с ущербом с/х продукции;

— значений комплексных параметров $I_i = n_i/\Delta t_\Phi$, $f_i = n_i/\Delta V_{45}$, $v_i = n_i/(\Delta t_\Phi V_{45})$ отмечается увлечение вероятности появления опытов с ПЭВ [3, 4, 6, 8], что свидетельствует о повышении физической и экономической эффективности ПГЗ.

Результаты оценки наиболее информативных параметров f_i и v_i , взятых из [3, 4, 6, 8], представлены в табл. 2. С целью оценки скорострельности (I_i) и оптимальных норм расхода ПГР (n_i) в объемах зон БГ ОВ 3–4-й категорий, полученных экспериментальным путем и приводящих к прерыванию града на ЗТ [3, 4, 6, 8], были привлечены соотношения, связывающие с вероятностью более 85% значения n_i со значениями V_{45} ($f_i = n_i/\Delta V_{45} \approx 0,04$) и значения v_i со значениями ΔV_{45} и Δt_Φ ($v_i = n_i/\Delta t_\Phi V_{45} \approx 0,04$). Эти соотношения после некоторых преобразований приняли следующий вид:

$$n_i \approx 0,4\Delta V_{45} \tag{4}$$

$$n_i / \Delta t_\Phi \approx 0,04\Delta V_{45} \tag{4}$$

Таблица 2. ВЕРОЯТНОСТЬ В % (n) ПОЯВЛЕНИЯ ОПЫТОВ С ПЭВ И ОЭВ В ОВ 3–4-й КАТЕГОРИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ КОМПЛЕКСНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ИХ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК (апрель-сентябрь 2003–2007 гг.)

Параметр	Вероятность в % (n) появления опытов с ПЭВ и ОЭВ				Оценка
1. $n_i/\Delta V_{45}$, изд./км ³	< 0,4	0,4–0,6	> 0,6	Всего	D_7/D_9
ПЭВ	85,3 (180)	82,1(46)	80,6 (50)	84,0 (276)	0,19/0,23
ОЭВ	14,7 (31)	17,9 (10)	19,4 (12)	16,0 (53)	«+»
Всего	100 (211)	100 (56)	100 (62)	100 (329)	–
2. v_i , изд./ (мин. · км ³)	< 0,02	0,02–0,04	> 0,04	Всего	D_7/D_9
ПЭВ	63,3 (62)	84,2 (48)	95,4 (166)	84,0 (276)	0,19/ 0,46
ОЭВ	36,7 (36)	15,8 (9)	4,6 (8)	16,0 (53)	«+»
Всего	100 (98)	100 (57)	100 (174)	100 (329)	–
Вероятность в % (n) появления опытов с ПЭВ и ОЭВ					Оценка
1. Мин.	Макс.	Ср.	σ	Z_7/Z_9	
0,01	10,0	0,19	0,40	–1,96/–5,60	
0,03	3,6	0,14	0,19	«+»	
–	–	–	–	–	
2. Мин.	Макс.	Ср.	σ	Z_7/Z_9	
0,003	1,25	0,03	0,05	–1,96/–12,3	
0,001	0,3	0,01	0,01	«+»	
–	–	–	–	–	

2.5. Оценка эффективных технологий засева и технических средств АВ

С целью выявления наиболее эффективных технологий воздействия и технических средств активных воздействий, применяемых в ПГЗ ВС региона Центрального Кавказа, был проведен сопоставительный анализ вероятности появления опытов с ПЭВ и ОЭВ при различных значениях интенсивности воздействия V_i [4–6, 8, 9]. Результаты представлены в табл. 2. Из этой таблицы следует, что при переходе от мгновенных точечных источников ПГС к эффективным мгновенным линейным источникам ПГР и от концепций конкуренции и УПО к концепции ППГС ПГР в объемах зон РГ и БГ ОВ 3–4-й категорий [6, 8, 9], отмечается уменьшение значений V_i от 0,08 изд. «Эльбрус-4»/мин. · км³ (Северо-Кавказская ВС) до 0,04 изд. «Алазань-6»/мин. · км³ (Ставропольская ВС), а следовательно, увеличение физической экономической эффективности ПГЗ.

Физическая эффективность ПГЗ на ЗТ: Северо-Кавказской ВС достигает 70%, Краснодарской ВС – 93%, Грузинской ВС – 86% и Ставропольской ВС – 81%. Высокие значения физической эффективности ПГЗ на ЗТ Краснодарской и Грузинской ВС по сравнению с физической эффективностью Ставропольской ВС объясняются отсутствием в расчетах последней числа ОВ 2-й категорий, добавление которого к числу ОВ 3–4-й категории приведет к увеличению физической эффективности ПГЗ Ставропольской ВС до 95,7%.

Рассмотрим возможность подавления ОВ 4-й категории с объемом $\Delta V_{45} = 500$ км³ при различных технологиях засева и скорострельности $I = N_i / \Delta t_{\text{ф}}$ в объемах зон РГ и БГ. Результаты расчетов, проведенных с помощью уравнения (5) показали, что для ЗТ Северо-Кавказской ВС I достигает 40 изд. «Эльбрус-4»/мин., Краснодарской ВС – 30 изд. «Эльбрус-4»/мин., Грузинской ВС – 20 изд. «Алазань-5»/мин. и Ставропольской – 20 изд. «Алазань-6»/мин.

В 80–90-е годы ПВ Северо-Кавказской и Краснодарской ВС, работающие по технологий воздействий, основанных на концепциях конкуренции и УПО с применением ПГС «Эльбрус-4», практически, не в состоянии были обеспечить скорострельности 40 и 30 изд. «Эльбрус-4»/мин. за промежутки времени $\Delta t_{\text{Г}} = 10$.

Необходимыми условиями прерывания града на ЗТ являются:

- увеличение на ЗТ количества ПВ, а на каждом ПВ числа ПУ ТКБ-040 до 4 шт. и более, способствующих уменьшению запретных секторов и не простреливаемых площадок и увеличению расхода ПГР в объемах зон БГ ОВ 3–4-й категорий;
- обеспечение ПГР нового поколения повышенными дозами

ЧКР AgI, превышающие в 5–8 раз, таковые в ПГР «Алазань-6»;

- уменьшение в ОВ 3–4-й категорий значений $\Delta t_{\text{В}}$ соответственно от 34 и 43 мин. до значений $\Delta t_{\text{Г}}$, в среднем равных 10–12 мин. и наблюдаемых в пространственно-фиксированных объемах градовых очагов и до значений $\Delta t_{\text{Э}}$, равных, при различных технологиях засева ОВ 3–4-й категорий, соответственно 13–19 и 20–25 мин, за счет увеличения скорострельности и оптимальных норм расхода ПГР в объемах зон БГ.

ТАБЛИЦА 3. ВЕРОЯТНОСТЬ ПОЯВЛЕНИЯ ОПЫТОВ С ПЭВ И ОЭВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЗНАЧЕНИЙ v , ТЕХНОЛОГИИ ЗАСЕВА И ТИПА ПГИ

Военизированная служба	Годы ПГЗ, источник	Технология воздействия				Категория ОВ, ПУ, ПГИ
1. Северо-Кавказская	1974–1977 [3]	Конкуренции				3–4-я; «КС-19; «Эльбрус-4».
2. Краснодарская	1983–1986 [4]	УПО				2–4-я; КС-19; «Эльбрус-4».
3. Грузинская	1985–1987 [4]	УПО				2–4-я; ТКБ-040; «Алазань-5».
4. Ставропольская	2004–2007 [6]	ППГС				3–4-я; ТКБ-040; «Алазань-6».
Оценка опытов	$v = n / (V_{\text{ис}} \Delta t_{\text{б}})$, изд./((мин·км³)					Эффективность ПГЗ
	$\leq 0,04$	0,041–0,06	0,061–0,08	$> 0,08$		
1 ПЭВ	3,7 (1)	60 (8)	80 (8)	98 (59)		70 (76)
ОЭВ	96,3 (26)	40 (6)	20 (2)	2 (1)		30 (35)
Всего	100 (27)	100 (14)	100 (10)	100 (60)		100 (111)
2 ПЭВ	85,3 (390)	93 (165)	97 (150)	100 (442)		93 (1147)
ОЭВ	14,7 (67)	7 (12)	3 (5)	–		7 (84)
Всего	100 (457)	100 (177)	100 (155)	100 (442)		100 (1231)
3 ПЭВ	82,2 (134)	97 (61)	–	–		86 (195)
ОЭВ	17,8 (29)	3 (2)	–	–		14 (31)
Всего	100 (163)	100 (63)	–	–		100 (226)
4 ПЭВ	71 (110)	97 (37)	89 (24)	96 (105)		81 (276)
ОЭВ	29 (45)	30 (1)	11 (13)	4 (4)		19 (63)
Всего	100 (155)	100 (38)	100 (37)	100 (109)		100 (339)

2.6. Реализация метода предотвращения и прерывания града на ЗТ

Метод предусматривает распознавание ОВ 1–4-й категорий и оценку их: скорости и направления 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 по формулам (4) и (5). На основании полученных оценок принимается решение о проведении воздействия, которое осуществляется не с интервалом 6 мин, как это показано на рис. 1, 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 [9].

ВЫВОДЫ

1. Анализируются физические принципы ПГЗ и ИРО, основанные на концепциях:
 - преждевременного разрушения облаков нисходящими потоками, инициированными различными техническими средствами активных воздействий;
 - искусственного регулирования процесса осадкообразования при микрофизическом и динамическом засевах ЧКР объемов ЗФО конвективных ячеек, которые сводятся к оценкам критериев и схем засева, а также к скорострельности и оптимальных норм расхода количества ПГР и/или ЧКР AgI в объемах ОВ 1–4-й категорий.
2. При увеличении значений:
 - радиолокационных параметров и параметров воздействия ОВ 3–4-й категорий отмечается уменьшение вероятности появления опытов с ПЭВ, приводящее к несвоевременной и недостаточной обработке ОВ ПГР, а следовательно, к выпадению катастрофического града на ЗТ;
 - комплексных параметров ОВ 3–4-й категорий отмечается увеличение вероятности появления опытов с ПЭВ, приводящих к повышению физической и экономической эффективности ПГЗ.
3. При переходе от ПГС к ПГР и от концепции конкуренции и УПО к концепции ППГС ПГР и/или ЧКР AgI в объемах зон ОВ 3–4-й категорий отмечается:
 - уменьшение v_i от 0,08 изд. «Эльбрус-4»/мин.·км³ до 0,04 изд. «Алазань-6»/мин.·км³ и I от 40 изд. «Эльбрус-4»/мин. до 20 изд. «Алазань-6»/мин.;
 - увеличение физической эффективности ПГЗ от 70% (ЗТ Северо-Кавказской ВС) до 95,7% (ЗТ Ставропольской ВС).

4. Получены уравнения, связывающие с вероятностью более 85% значения скорострельности и оптимальных норм расхода ПГР с параметром ΔV_{45} , измеренным в реальном масштабе времени с помощью «МРЛ-АСУ».
5. Разработанный объективный метод ППГС ПГИ и/или ЧКР в объемах зон РГ и БГ ОВ 1–4-й категорий в 2003–2007 гг. прошел экспериментальную проверку на независимом материале Ставропольской ВС и успешно внедрен в производственную практику ПГЗ этой службы. Физическая эффективность составила 95,7%, а экономическая эффективность – 323 млн руб. по ценам выше указанного периода года. Результаты испытания убедительно показали возможность прерывания катастрофического града на ЗТ.

Библиографический список

1. Абшаев М.Т. Активное воздействие на градовые процессы // Руководящий документ РД 52.37.596-98. М., 1998. 32 с.
2. Березкин В.В., Ватиашвили М.Р., Макитов В.С., Федченко Л.М. Оценка времени достижения эффекта воздействия на градовые процессы // Труды ВГИ. 1991. Вып. 80. С. 149–156.
3. Ватян М.Р., Березкин В.В. К вопросу нормирования реагента при воздействии на градовые процессы // Труды ГГО. 1983. Вып. 469. С. 49-57.
4. Ватиашвили М.Р., Березкин В.В., Бахсолиани М.Г. Исследование норм расхода реагента в градовых облаках различной интенсивности // Всесоюзная конференция по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Киев, 17–21 ноября, 1987. С. 177–181.
5. Ватиашвили М.Р., Бахсолиани М.Г., Газашвили А.Г., Георгишвили А.Г., Капанадзе Н.И., Микадзе Б.Ш., Саамишвили Н.Р. Исследование градовых процессов в районах Восточной Грузии // Труды Всесоюзного семинара «Активные воздействия на градовые процессы и перспективы усовершенствования льдообразующих реагентов для практики активных воздействий». М.: Гидрометеоиздат, 1991. С. 131-136.
6. Ватиашвили М.Р. О Совершенствовании методики засева градовых облаков // Доклады научно-практической конференции, посвященной 40-летию начала производственных работ по защите сельхозкультур от градобитий. Нальчик, 10–12 октября 2007. С. 127–134.
7. Ватиашвили М.Р. Уточнение критериев засева объектов воздействия 2-й категории // Доклады научно-практической конференции, посвященной 40-летию начала производственных работ по защите сельхозкультур от градобитий. Нальчик, 10–12 октября 2007. С. 314–320.
8. Ватиашвили М.Р. Итоговый отчет по теме 1.8.11. «Апробировать в оперативной практике новые технологические достижения по воздействию на градовые процессы» // Федеральная служба по гидрометеорологии и мо-

- ниторингу окружающей среды (Росгидромет). «ГУ» Ставропольская военная служба по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы. Ставрополь. 2007. 108 с.
9. Ватиашвили М.Р., Джангуразов Х.Х., Кассиров В.П. Способ активных воздействий на градовые процессы // Патент РФ на изобретение №2321871, 2007.
 10. Ватиашвили М.Р. Прерывание града предварительным засевом облаков и облачных систем со стороны вторжения ОБ 3–4-й категорий // Циклы природы и общества. Материалы XIV Международной научной конференции. Ставрополь. 2008. С. 281–290.
 11. Ватиашвили М.Р. Метод прерывания града на подступах защищаемой территории со стороны вторжения градовых облаков // Наука. Инновации. Технологии. 2016. № 4. С. 7–24.
 12. Радиолокационные исследования процесса градообразования в кучево-дождевых облаках / Абшаев М.Т., Макитов В.С. и др. // Труды ВГИ. 1978. Вып. 39. С. 3–31.
 13. Рунион Р. Справочник по непараметрической статистике: Современный подход / перевод с английского языка Демиденко Е.З. М.: Финансы и кредит, 1982. 198 с.
 14. Сулаквелидзе Г.К. Ливневые осадки и град. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 421 с.

References

1. Abshayev M.T. Aktivnoye vozdeystviye na gradovyye protsessy (Active influence on hail processes) // Rukovodyashchiy dokument RD. 52.37.596-98.M (Steering document РД.52.37.596-98.M). 1998. 32 p.
2. Berezkin V.V., Vatiashvili M.R., Makitov V.S., Fedchenko L.M. Otsenka vremeni dostizheniya efekta vozdeystviya na gradovyye protsessy (Estimating the time to achieve the effect of the impact on gradation processes) // Trudy VGI (Proceedings of the All-Union State University). 1991. Vol. 80. P. 149-156.
3. Vaf'yan M.R., Berezkin V.V. K voprosu normirovaniya reagenta pri vozdeystvii na gradovyye protsessy (To the problem of rationing of reagents when acting on hail processes) // Trudy GGO (Proceedings of the GGO). 1983. Vol. 469. P. 49-57.
4. Vatiashvili M.R., Berezkin V.V., Bakhsoliani M.G. Issledovaniye norm raskhoda reagenta v gradovykh oblakakh razlichnoy intensivnosti (Investigation of the rates of reagent consumption in hail clouds of different intensity) // Vsesoyuznaya konferentsiya po aktivnym vozdeystviyam na gidrometeorologicheskiye protsessy (All-Union Conference on Active Effects on Hydrometeorological Processes). Kiev, November 17–21, 1987. P. 177–181.
5. Vatiashvili M.R., Bakhsoliani M.G., Gazashvili A.G., Georgishvili A.G., Kapanadze N.I., Mikadze B.SH., Saamishvili N.R. Issledovaniye gradovykh protsessov v rayonakh Vostochnoy Gruzii (Study of hail processes in the regions of Eastern Georgia) // Trudy Vsesoyuznogo seminar «Aktivnyye vozdeystviya na gradovyye protsessy i perspektivy usovershenstvovaniya l'doobrazuyushchikh reagentov dlya praktiki aktivnykh vozdeystviy» (Proceedings of the All-Union Seminar «Active Impacts on Hail Processes and Prospects for the Improvement of Ice-Forming Reagents for the Practice of Active Influences»). M.: Gidrometeoizdat, 1991. P. 131–136.

6. Vatiashvili M.R. O Sovershenstvovanii metodiki zaseva gradovykh oblakov (About the Perfection of the technique of seeding hail clouds) // Doklady nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 40-letiyu nachala proizvodstvennykh rabot po zashchite sel'khozkul'tur ot gradobitiy (Reports of the scientific-practical conference devoted to the 40th anniversary of the beginning of the production work on the protection of crops from hailstones). Nal'chik, October 10–12, 2007. P. 127–134.
7. Vatiashvili M.R. Utochneniye kriteriyev zaseva ob'yektov vozdeystviya 2-y kategorii (Specification of the criteria for sowing impact objects of the 2nd category) // Doklady nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 40-letiyu nachala proizvodstvennykh rabot po zashchite sel'khozkul'tur ot gradobitiy (Reports of the scientific and practical conference devoted to the 40th anniversary of the beginning of the production work on the protection of crops from hailstones). Nal'chik, October 10–12, 2007. P. 314–320.
8. Vatiashvili M.R. Itogovyy otchet po teme 1.8.11. «Aprobirovat' v operativnoy praktike novyye tekhnologicheskiye dostizheniya po vozdeystviyu na gradovyye protsessy» (Final report on the topic 1.8.11. «To test in technological practice new technological achievements in the impact on hail processes») // Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy (Rosgidromet). «GU» Stavropol'skaya voyenizirovannaya sluzhba po aktivnomu vozdeystviyu na meteorologicheskiye i drugiye geofizicheskiye protsessy (Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet). «GU» Stavropol militarized service for active impact on meteorological and other geophysical processes). Stavropol'. 2007. 108 p.
9. Vatiashvili M.R., Dzhangurazov K.H.KH., Kassirov V.P. Sposob aktivnykh vozdeystviy na gradovyye protsessy (The way of active influences on hail processes) // Patent RF na izobreteniyе №2321871 (Patent of the Russian Federation for invention №2321871), 2007.
10. Vatiashvili M.R. Preryvaniye grada predvaritel'nyy zasevom oblakov i oblachnykh sistem so storony vtorzheniya OV 3–4-y kategoriy (Interruption of the hail by the preliminary seeding of clouds and cloud systems from the invasion of OM of the 3rd and 4th categories) // Tsikly prirody i obshchestva. Materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Cycles of nature and society. Materials of the XIV International Scientific Conference). Stavropol'. 2008. P. 281–290.
11. Vatiashvili M.R. Metod preryvaniya grada na podstupakh zashchishchayemoy territorii so storony vtorzheniya gradovykh oblakov (Method of interrupting hail on the approaches of the protected area from the invasion of hail clouds) // Nauka. Innovatsii. Tekhnologii (Science. Innovation. Technologies). 2016. № 4. P. 7–24.
12. Radiolokatsionnyye 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.
13. Runion R. Spravochnik po neparametricheskoy statistike: Sovremennyy podkhod (Handbook on Nonparametric Statistics: A Modern Approach) / perevod s angliyskogo yazyka Demidenko Ye.Z. (Translation from English Demidenko Ye.Z.). M.: Finansy i kredit, 1982. 198 p.
14. Sulakvelidze G.K. Livnevyye osadki i grad (Rainfall and hail). L.: Gidrometeoizdat, 1967. 421 p.

УДК 517.95

Редькина Т.В. [Redkina T.V.]

ПРЕОБРАЗОВАНИЯ БЭКЛУНДА ДЛЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА

Baclone transformation for a system of partial differential equations of the third order

Развиты идеи Клэрэна и осуществлено построение дифференциальных связей двух нелинейных систем в частных производных. Проведен анализ заданной системы уравнений третьего порядка. Определена общая структура преобразований Бэклунда в виде четырех дифференциальных равенств. Дифференциальные связи определяются так, что они дают возможность получить обе системы. Исходя из того, что исходная система линейна по старшей производной пространственной переменной и содержит только производную первого порядка по временной переменной, удалось в преобразованиях Бэклунда выделить в явном виде вторые производные по пространственной переменной и уточнить взаимосвязь между младшим производными. Оказалось, что такие связи определяются неоднозначно. Приведены два честных случая, позволяющих осуществить переход от одной системы к другой.

Clerain's ideas have been developed and the construction of differential relations of two nonlinear systems in partial derivatives has been realized. An analysis of a given system of equations of the third order is carried out. The general structure of the Bäcklund transformations is defined in the form of four differential equations. Differential couplings are defined so that they give the opportunity to get both systems. Proceeding from the fact that the initial system is linear in terms of the highest derivative of a spatial variable and contains only the first-order derivative of the time variable, it was possible in the Bäcklund transformations to explicitly select the second derivatives with respect to the spatial variable and to clarify the relationship between the lower derivatives. It turned out that such connections are determined ambiguously. There are two honest cases that allow you to make a transition from one system to another.

Ключевые слова: уравнения в частных производных, преобразования Бэклунда, точные решения нелинейных уравнений в частных производных, дифференциальные связи.

Key words: partial differential equations, Beck-Lund transformations, exact solutions of nonlinear partial differential equations, differenrential relations.

Введение

В литературе, связанной с преобразованиями одного уравнения в другое особое место занимают дифференциальные связи.

Говорят [2], что соотношение

$$P(u, v, u_x, v_x, u_t, v_t, \dots; x, t) = 0$$

(или набор таких соотношений) *отображает* $E(v) = 0$ в $D(u) = 0$, если любое (локальное) решение уравнения $E(v) = 0$ однозначно определяет некоторое (локальное) решение уравнения $D(u) = 0$.

Примерами таких отношений могут служить преобразования Коши – Римана, Миуры, Коула и Хопфа [3, 4] и др. объединенные под более общим понятием – преобразования Бэклунда [1].

Набор соотношений, включающих $\{x, t, u(x, t)\}$, $\{X, T, v(X, T)\}$ и производные u и v является преобразованием Бэклунда между $D(u, x, t)$ и $E(v, x, t)$, если:

- 1) преобразование Бэклунда является интегрируемым для v , если и только если $D(u) = 0$;
- 2) преобразование Бэклунда является интегрируемым для u , если и только если $E(v) = 0$;
- 3) по заданному u , такому, что $D(u) = 0$, преобразование Бэклунда позволяет определить v с точностью до конечного числа констант, причем $E(v) = 0$;
- 4) по заданному v , такому, что $E(v) = 0$, преобразование Бэклунда позволяет определить u с точностью до конечного числа констант, причем $D(u) = 0$.

Материалы и методы исследований

Клэрэном разработан метод построения преобразований Бэклунда более общего вида для уравнений второго порядка типа Монжа – Ампера

$$f_1(x, t, u, u_x, u_t) u_{xx} + f_2(x, t, u, u_x, u_t) u_{xt} + f_3(x, t, u, u_x, u_t) u_{tt} + f_4(x, t, u, u_x, u_t) = 0.$$

Будем развивать идеи Клэрэна и попытаемся построить дифференциальные связи, преобразующие заданную систему двух уравнений на функции $u(x, t)$, $w(x, t)$ вида

$$u_t + u_{xxx} - 12\mu w w_x - 6u u_x = 0, \quad w_t - 2w_{xxx} + 6u w_x = 0, \quad (1)$$

в некую, пока неизвестную систему двух уравнений на функции $f(x, t)$, $r(x, t)$ того же порядка.

Так как исходная система описывает связь двух функций от двух переменных x, t , то для задания перехода от одной системе к другой необходимо задать две пары, характеризующие дифференциальные преобразования по независимым переменным x и t . Исходя из того, что рассматриваемая система (1) по переменной x третьего порядка, а по переменной t – первого, а для построения (1) используется перекрестное дифференцирование, следует задать дифференциальные соотношения по переменной t – первого порядка, а по переменной x – второго порядка:

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 r}{\partial x^2} &= F_1(u, w, f, r, u_x, w_x, f_x, r_x), \quad \frac{\partial r}{\partial t} = H_1(u, w, f, r, u_x, w_x, f_x, r_x), \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} &= F_2(u, w, f, r, u_x, w_x, f_x, r_x), \quad \frac{\partial f}{\partial t} = H_2(u, w, f, r, u_x, w_x, f_x, r_x).\end{aligned}\quad (2)$$

Для задания явного вида преобразования необходимо найти функции F_1, F_2 и H_1, H_2 . Условие интегрируемости (равенство смешанных вторых производных) требует, чтобы функции (2) удовлетворяли соотношению

$$\frac{\partial^3 r}{\partial x^2 \partial t} = \frac{\partial^3 r}{\partial t \partial x^2}, \quad \frac{\partial^3 f}{\partial x^2 \partial t} = \frac{\partial^3 f}{\partial t \partial x^2}, \quad (3)$$

при этом все функции $u, w, f, r, u_x, w_x, f_x, r_x$ зависят от x, t .
Учитывая (2), получим

$$\frac{\partial^3 r}{\partial x^2 \partial t} = \frac{\partial F_1}{\partial u} u_t + \frac{\partial F_1}{\partial w} w_t + \frac{\partial F_1}{\partial f} f_t + \dots + \frac{\partial F_1}{\partial r_x} r_{xt}, \quad (4a)$$

$$\frac{\partial^3 r}{\partial t \partial x^2} = \frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{\partial H_1}{\partial u} u_x + \frac{\partial H_1}{\partial w} w_x + \dots + \frac{\partial H_1}{\partial r_x} r_{xx} \right) u_x + \dots + \frac{\partial}{\partial r_x} \left(\frac{\partial H_1}{\partial u} u_x + \frac{\partial H_1}{\partial w} w_x + \dots + \frac{\partial H_1}{\partial r_x} r_{xx} \right) r_{xx},$$

аналогично

$$\frac{\partial^3 f}{\partial x^2 \partial t} = \frac{\partial F_2}{\partial u} u_t + \frac{\partial F_2}{\partial w} w_t + \frac{\partial F_2}{\partial f} f_t + \dots + \frac{\partial F_2}{\partial r_x} r_{xt}, \quad (4b)$$

$$\frac{\partial^3 f}{\partial t \partial x^2} = \frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{\partial H_2}{\partial u} u_x + \frac{\partial H_2}{\partial w} w_x + \dots + \frac{\partial H_2}{\partial r_x} r_{xx} \right) u_x + \dots + \frac{\partial}{\partial r_x} \left(\frac{\partial H_2}{\partial u} u_x + \frac{\partial H_2}{\partial w} w_x + \dots + \frac{\partial H_2}{\partial r_x} r_{xx} \right) r_{xx}.$$

Приравнявая правые части полученных равенств и используя (2) для исключения $r_t, f_t, r_{xx}, f_{xx}, r_{xt}, f_{xt}$, окончательно получим условие совместности, которое должно привести к системе (1).

Система (1) имеет степенную нелинейность первого (u, u_{xxx}, w, w_{xxx}) и второго порядка ($ww_x, uu_x, w_x u$), а каждое слагаемое (4) представляет собой произведение двух или трех сомножителей. Для того чтобы условие совместности (3) давало рассматриваемую систему (1) и в нем не возникало членов, степень которых выше второй необходимо положить, что функции $F_j, H_j, j = 1, 2$ имеют линейную структуру относительно переменных u, u_x, w, w_x :

$$\begin{aligned}F_j &= F_{j1}(f, r, f_x, r_x)u + F_{j2}(f, r, f_x, r_x)u_x + \\ &+ F_{j3}(f, r, f_x, r_x)w + F_{j4}(f, r, f_x, r_x)w_x + F_{j5}(f, r, f_x, r_x), \\ H_j &= H_{j1}(f, r, f_x, r_x)u + H_{j2}(f, r, f_x, r_x)u_x + \\ &+ H_{j3}(f, r, f_x, r_x)w + H_{j4}(f, r, f_x, r_x)w_x + H_{j5}(f, r, f_x, r_x).\end{aligned}\quad (5)$$

Для составления условия совместности (4) при дифференцировании F_j по переменной t возникают слагаемые, имеющие множители u_{tx} , w_{xt} , которые отсутствуют в исходной системе (1) и не могут быть заменены или компенсированы, поэтому необходимо положить коэффициенты

$$F_{j2}(f, r, f_x, r_x) = 0, \quad F_{j4}(f, r, f_x, r_x) = 0. \quad (6)$$

В результате условие совместности (3) примет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_{j1}}{\partial t} u + F_{j1} u_t + \frac{\partial F_{j3}}{\partial t} w + F_{j3} w_t + \frac{\partial F_{j5}}{\partial t} = \frac{\partial^2 H_{j1}}{\partial x^2} u + 2 \frac{\partial H_{j1}}{\partial x} u_x + H_{j1} u_{xx} + \frac{\partial^2 H_{j2}}{\partial x^2} u_x + 2 \frac{\partial H_{j2}}{\partial x} u_{xx} + \\ + H_{j2} u_{xxx} + \frac{\partial^2 H_{j3}}{\partial x^2} w + 2 \frac{\partial H_{j3}}{\partial x} w_x + H_{j3} w_{xx} + \frac{\partial^2 H_{j4}}{\partial x^2} w_x + 2 \frac{\partial H_{j4}}{\partial x} w_{xx} + H_{j4} w_{xxx} + \frac{\partial^2 H_{j5}}{\partial x^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{где} \quad \frac{\partial F_{jk}}{\partial t} = \frac{\partial F_{jk}}{\partial f} H_2 + \frac{\partial F_{jk}}{\partial r} H_1 + \frac{\partial F_{jk}}{\partial f_x} H_{2x} + \frac{\partial F_{jk}}{\partial r_x} H_{1x}, \\ \frac{\partial H_{jk}}{\partial x} = \frac{\partial H_{jk}}{\partial f} f_x + \frac{\partial H_{jk}}{\partial r} r_x + \frac{\partial H_{jk}}{\partial f_x} F_2 + \frac{\partial H_{jk}}{\partial r_x} F_1, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial x^2} = \frac{\partial H_{jk}}{\partial f} F_2 + \frac{\partial H_{jk}}{\partial r} F_1 + \frac{\partial H_{jk}}{\partial f_x} F_{2x} + \frac{\partial H_{jk}}{\partial r_x} F_{1x} + \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial f^2} f_x^2 + \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial r^2} r_x^2 + \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial f_x^2} F_2^2 + \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial r_x^2} F_1^2 + \\ + 2 \left(\frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial f \partial r} f_x r_x + \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial f \partial f_x} f_x F_2 + \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial f \partial r_x} f_x F_1 + \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial r \partial r_x} r_x F_1 + \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial r \partial f_x} r_x F_2 + \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial f_x \partial r_x} F_2 F_1 \right). \end{aligned}$$

Функции $u(x, t)$, $w(x, t)$ считаем известными и вид системы (7) определяется равенствами (1). Члены с множителями u_t , w_t , u_{xxx} , w_{xxx} не могут возникнуть в ходе подстановок F_j , H_j , $j = 1, 2$ и их первых производных F_{jx} , H_{jx} (могут возникнуть только вторые производные по x), поэтому, сравнивая коэффициенты для пары u_t , u_{xxx} и w_t , w_{xxx} в формулах (1) необходимо положить

$$F_{j1} = -H_{j2}, \quad 2F_{j3} = H_{j4}. \quad (9)$$

С учетом (9) равенство (7) примет вид

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial F_{j1}}{\partial t} - \frac{\partial^2 H_{j1}}{\partial x^2} \right) u + F_{j1} (u_t + u_{xxx}) + \left(\frac{\partial F_{j3}}{\partial t} - \frac{\partial^2 H_{j3}}{\partial x^2} \right) w + F_{j3} (w_t - 2w_{xxx}) + \frac{\partial F_{j5}}{\partial t} - \frac{\partial^2 H_{j5}}{\partial x^2} = \\ = \left(2 \frac{\partial H_{j1}}{\partial x} - \frac{\partial^2 F_{j1}}{\partial x^2} \right) u_x + \left(H_{j1} - 2 \frac{\partial F_{j1}}{\partial x} \right) u_{xx} + 2 \left(\frac{\partial H_{j3}}{\partial x} + \frac{\partial^2 F_{j3}}{\partial x^2} \right) w_x + \left(H_{j3} + 4 \frac{\partial F_{j3}}{\partial x} \right) w_{xx}. \end{aligned} \quad (10)$$

В системе (1) отсутствуют члены содержащие u_{xx} (w_{xx})¹, поэтому продифференцируем (10) по u_{xx} (w_{xx}), тогда учитывая

$$\frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial t \partial u_{xx}} = -\frac{\partial F_{jk}}{\partial f_x} F_{21} - \frac{\partial F_{jk}}{\partial r_x} F_{11}, \quad \frac{\partial^3 H_{jk}}{\partial x^2 \partial u_{xx}} = 0, \quad \frac{\partial^3 F_{jk}}{\partial x^2 \partial u_{xx}} = 0, \quad \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial x \partial u_{xx}} = 0,$$

$$\left(\frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial t \partial w_{xx}} = 2 \frac{\partial F_{jk}}{\partial f_x} F_{23} + 2 \frac{\partial F_{jk}}{\partial r_x} F_{13}, \quad \frac{\partial^3 H_{jk}}{\partial x^2 \partial w_{xx}} = 0, \quad \frac{\partial^3 F_{jk}}{\partial x^2 \partial w_{xx}} = 0, \quad \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial x \partial w_{xx}} = 0 \right)$$

получим связь, которая должна выполняться тождественно

$$\frac{\partial^2 F_{j1}}{\partial t \partial u_{xx}} u + \frac{\partial^2 F_{j3}}{\partial t \partial u_{xx}} w + \frac{\partial^2 F_{j5}}{\partial t \partial u_{xx}} = H_{j1} - 2 \frac{\partial F_{j1}}{\partial x}, \quad \left(\frac{\partial^2 F_{j1}}{\partial t \partial w_{xx}} u + \frac{\partial^2 F_{j3}}{\partial t \partial w_{xx}} w + \frac{\partial^2 F_{j5}}{\partial t \partial w_{xx}} = H_{j3} + 4 \frac{\partial F_{j3}}{\partial x} \right)$$

или подставляя найденные производные

$$\left(\frac{\partial F_{j1}}{\partial f_x} F_{21} + \frac{\partial F_{j1}}{\partial r_x} F_{11} \right) u + \left(\frac{\partial F_{j3}}{\partial f_x} F_{21} + \frac{\partial F_{j3}}{\partial r_x} F_{11} \right) w + \frac{\partial F_{j5}}{\partial f_x} F_{21} + \frac{\partial F_{j5}}{\partial r_x} F_{11} + H_{j1} =$$

$$= 2 \left(\frac{\partial F_{j1}}{\partial f_x} f_x + \frac{\partial F_{j1}}{\partial r_x} r_x + \frac{\partial F_{j1}}{\partial f_x} F_2 + \frac{\partial F_{j1}}{\partial r_x} F_1 \right), \quad (11)$$

аналогично для w_{xx} :

$$\left(\frac{\partial F_{j1}}{\partial f_x} F_{23} + \frac{\partial F_{j1}}{\partial r_x} F_{13} \right) u + \left(\frac{\partial F_{j3}}{\partial f_x} F_{23} + \frac{\partial F_{j3}}{\partial r_x} F_{13} \right) w + \frac{\partial F_{j5}}{\partial f_x} F_{23} + \frac{\partial F_{j5}}{\partial r_x} F_{13} =$$

$$= \frac{1}{2} H_{j3} + 2 \left(\frac{\partial F_{j3}}{\partial f_x} f_x + \frac{\partial F_{j3}}{\partial r_x} r_x + \frac{\partial F_{j3}}{\partial f_x} F_2 + \frac{\partial F_{j3}}{\partial r_x} F_1 \right). \quad (12)$$

Так как в равенства входят функции u , w , то коэффициенты при этих функциях также должны обнулиться, поэтому (11), (12) распадаются на системы $j = 1, 2$:

$$\frac{\partial F_{j1}}{\partial f_x} F_{21} + \frac{\partial F_{j1}}{\partial r_x} F_{11} = 0,$$

$$\frac{\partial F_{j3}}{\partial f_x} F_{21} + \frac{\partial F_{j3}}{\partial r_x} F_{11} = 2 \frac{\partial F_{j1}}{\partial f_x} F_{23} + 2 \frac{\partial F_{j1}}{\partial r_x} F_{13},$$

$$\frac{\partial F_{j5}}{\partial f_x} F_{21} + \frac{\partial F_{j5}}{\partial r_x} F_{11} + H_{j1} = 2 \left(\frac{\partial F_{j1}}{\partial f_x} f_x + \frac{\partial F_{j1}}{\partial r_x} r_x + \frac{\partial F_{j1}}{\partial f_x} F_{25} + \frac{\partial F_{j1}}{\partial r_x} F_{15} \right),$$

1 Выражение, записанное в скобках, означает, что такие же действия необходимо выполнить относительно функции w_{xx} , результат проведенных операций будет записан в скобках.

$$\frac{\partial F_{j1}}{\partial f_x} F_{23} + \frac{\partial F_{j1}}{\partial r_x} F_{13} = 2 \frac{\partial F_{j3}}{\partial f_x} F_{21} + 2 \frac{\partial F_{j3}}{\partial r_x} F_{11},$$

$$\frac{\partial F_{j3}}{\partial f_x} F_{23} + \frac{\partial F_{j3}}{\partial r_x} F_{13} = 0,$$

$$\frac{\partial F_{j5}}{\partial f_x} F_{23} + \frac{\partial F_{j5}}{\partial r_x} F_{13} = \frac{1}{2} H_{j3} + 2 \left(\frac{\partial F_{j3}}{\partial f} f_x + \frac{\partial F_{j3}}{\partial r} r_x + \frac{\partial F_{j3}}{\partial f_x} F_{25} + \frac{\partial F_{j3}}{\partial r_x} F_{15} \right).$$

Чтобы первое, второе, четвертое и пятое равенства выполнялись тождественно положим, что F_{j1}, F_{j3} – не зависят от f_x, r_x .² Третье и шестое равенства примут вид

$$\frac{\partial F_{j5}}{\partial f_x} F_{21} + \frac{\partial F_{j5}}{\partial r_x} F_{11} + H_{j1} = 2 \left(\frac{\partial F_{j1}}{\partial f} f_x + \frac{\partial F_{j1}}{\partial r} r_x \right),$$

$$\frac{\partial F_{j5}}{\partial f_x} F_{23} + \frac{\partial F_{j5}}{\partial r_x} F_{13} = \frac{1}{2} H_{j3} + 2 \left(\frac{\partial F_{j3}}{\partial f} f_x + \frac{\partial F_{j3}}{\partial r} r_x \right),$$

откуда находим

$$H_{j1} = 2 \left(\frac{\partial F_{j1}}{\partial f} f_x + \frac{\partial F_{j1}}{\partial r} r_x \right) - \frac{\partial F_{j5}}{\partial f_x} F_{21} - \frac{\partial F_{j5}}{\partial r_x} F_{11}, \quad (13)$$

$$H_{j3} = 2 \frac{\partial F_{j5}}{\partial f_x} F_{23} + 2 \frac{\partial F_{j5}}{\partial r_x} F_{13} - 4 \left(\frac{\partial F_{j3}}{\partial f} f_x + \frac{\partial F_{j3}}{\partial r} r_x \right). \quad (14)$$

В результате проведенного анализа функции (5) преобразовались к виду

$$F_j = F_{j1}(f, r)u + F_{j3}(f, r)w + F_{j5}(f, r, f_x, r_x),$$

$$\begin{aligned} H_j = & \left(2 \left[\frac{\partial F_{j1}}{\partial f} f_x + \frac{\partial F_{j1}}{\partial r} r_x \right] - \frac{\partial F_{j5}}{\partial f_x} F_{21} - \frac{\partial F_{j5}}{\partial r_x} F_{11} \right) u - F_{j1}(f, r)u_x + 2F_{j3}(f, r)w_x + \\ & + \left(2 \frac{\partial F_{j5}}{\partial f_x} F_{23} + 2 \frac{\partial F_{j5}}{\partial r_x} F_{13} - 4 \left[\frac{\partial F_{j3}}{\partial f} f_x + \frac{\partial F_{j3}}{\partial r} r_x \right] \right) w + H_{j5}(f, r, f_x, r_x). \end{aligned} \quad (15)$$

Продолжим исследования равенства (10). Посмотрим, с каким коэффициентом в условии совместности (10) входит член с множителем uw_x – пункт (I) (пункт (II) – wu_x , пункт (III) – uw_x)³, для этого продифференцируем (10) дважды, сначала по переменной u (во (II) по w , в (III) по u), затем по u_x ((II), (III) по w_x).

(I). Частные производные определяются по формулам:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial t \partial u_x} &= \frac{\partial F_{jk}}{\partial f} H_{22} + \frac{\partial F_{jk}}{\partial r} H_{12} + \frac{\partial F_{jk}}{\partial f_x} (H_{21} + H_{22x}) + \frac{\partial F_{jk}}{\partial r_x} (H_{11} + H_{12x}), \\
 \frac{\partial^3 F_{jk}}{\partial t \partial u_x \partial u} &= \frac{\partial F_{jk}}{\partial f_x} \left(\frac{\partial H_{22}}{\partial f_x} F_{21} + \frac{\partial H_{22}}{\partial r_x} F_{11} \right) + \frac{\partial F_{jk}}{\partial r_x} \left(\frac{\partial H_{12}}{\partial f_x} F_{21} + \frac{\partial H_{12}}{\partial r_x} F_{11} \right), \\
 \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial x \partial u} &= \frac{\partial H_{jk}}{\partial f_x} F_{21} + \frac{\partial H_{jk}}{\partial r_x} F_{11}, \quad \frac{\partial^3 H_{jk}}{\partial x \partial u \partial u_x} = 0, \quad \frac{\partial^3 H_{jk}}{\partial x^2 \partial u_x} = \frac{\partial H_{jk}}{\partial f_x} F_{21} + \frac{\partial H_{jk}}{\partial r_x} F_{11} \\
 \frac{\partial^4 H_{jk}}{\partial x^2 \partial u_x \partial u} &= 0, \quad \frac{\partial^3 F_{jk}}{\partial x \partial u \partial u_x} = 0, \quad \frac{\partial^4 F_{jk}}{\partial x^2 \partial u \partial u_x} = 0, \\
 \frac{\partial^3 F_{jk}}{\partial x^2 \partial u} &= \frac{\partial F_{jk}}{\partial f} F_{21} + \frac{\partial F_{jk}}{\partial r} F_{11} + \frac{\partial F_{jk}}{\partial f_x} F_{21x} + \frac{\partial F_{jk}}{\partial r_x} F_{11x} + 2 \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial f_x^2} F_2 F_{21} + 2 \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial r_x^2} F_1 F_{11} + \\
 &+ 2 \left(\frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial f \partial f_x} f_x F_{21} + \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial f \partial r_x} f_x F_{11} + \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial r \partial r_x} r_x F_{11} + \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial r \partial f_x} r_x F_{21} + \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial f_x \partial r_x} F_{21} F_1 + \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial f_x \partial r_x} F_2 F_{11} \right).
 \end{aligned} \tag{16}$$

После дифференцирования (10) в соотношении остаются следующие слагаемые

$$\frac{\partial^3 F_{j1}}{\partial t \partial u_x \partial u} u + \frac{\partial^2 F_{j1}}{\partial t \partial u_x} - \frac{\partial^3 H_{j1}}{\partial x^2 \partial u_x} + \frac{\partial^3 F_{j3}}{\partial t \partial u_x \partial u} w + \frac{\partial^3 F_{j5}}{\partial t \partial u_x \partial u} - 2 \frac{\partial^2 H_{j1}}{\partial x \partial u} + \frac{\partial^3 F_{j1}}{\partial x^2 \partial u}, \tag{17}$$

где с учетом (15) производные (16) преобразуются к более простому виду

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^3 F_{jk}}{\partial x^2 \partial u} &= -\frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial t \partial u_x} = \frac{\partial F_{jk}}{\partial f} F_{21} + \frac{\partial F_{jk}}{\partial r} F_{11}, \quad k = 1, 3, \\
 \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial x \partial u} &= \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial x \partial u_x} = \frac{\partial H_{jk}}{\partial f_x} F_{21} + \frac{\partial H_{jk}}{\partial r_x} F_{11}, \quad \frac{\partial^3 F_{jk}}{\partial t \partial u_x \partial u} = 0.
 \end{aligned}$$

- 2 Здесь выбран самый простой вариант, возможны и другие связи между F_{j1} , F_{j3} . Выдвинутое предположение не является окончательным и может быть изменено в ходе построения преобразований, в случае если при последующих шагах возникнут несовместные системы или члены, от которых невозможно избавиться.
- 3 В ходе выполняемых действий получатся уравнения связанные между собой, поэтому опишем построение этих уравнений отдельно.

В результате проведенного дифференцирования условия совместности получен коэффициент (17), который будет при множителе uu_x . Так как такой член присутствует в системе (1), то выражение (17) не должно быть тождественно равно нулю, а должно быть пропорционально F_1 – коэффициенту с которыми входят члены $u_t + u_{xxx}$. Коэффициент пропорциональности соответствует коэффициенту члена uu_x в системе (1) и равен -6 . В итоге (17) после выполнения подстановки (13) дает уравнение

$$\left(2 \frac{\partial F_{j1}}{\partial f} - \frac{\partial^2 F_{j5}}{\partial f_x^2} F_{21} - 2 \frac{\partial^2 F_{j5}}{\partial r_x \partial f_x} F_{11}\right) F_{21} + \left(2 \frac{\partial F_{j1}}{\partial r} - \frac{\partial^2 F_{j5}}{\partial r_x^2} F_{11}\right) F_{11} = 2F_{j1}. \quad (18)$$

(II). Аналогичные действия выполним относительно члена ww_x , что приводит к

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial t \partial w_x} &= \frac{\partial F_{jk}}{\partial f} H_{24} + \frac{\partial F_{jk}}{\partial r} H_{14} + \frac{\partial F_{jk}}{\partial f_x} (H_{23} + H_{24x}) + \frac{\partial F_{jk}}{\partial r_x} (H_{13} + H_{14x}), \\ \frac{\partial^3 F_{jk}}{\partial t \partial w_x \partial w} &= \frac{\partial F_{jk}}{\partial f_x} \left(\frac{\partial H_{24}}{\partial f_x} F_{23} + \frac{\partial H_{24}}{\partial r_x} F_{13} \right) + \frac{\partial F_{jk}}{\partial r_x} \left(\frac{\partial H_{14}}{\partial f_x} F_{23} + \frac{\partial H_{14}}{\partial r_x} F_{13} \right), \\ \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial x \partial w} &= \frac{\partial H_{jk}}{\partial f_x} F_{23} + \frac{\partial H_{jk}}{\partial r_x} F_{13}, \quad \frac{\partial^3 H_{jk}}{\partial x \partial w \partial w_x} = 0, \quad \frac{\partial^3 H_{jk}}{\partial x^2 \partial w_x} = \frac{\partial H_{jk}}{\partial f_x} F_{23} + \frac{\partial H_{jk}}{\partial r_x} F_{13} \\ \frac{\partial^4 H_{jk}}{\partial x^2 \partial w_x \partial w} &= 0, \quad \frac{\partial^3 F_{jk}}{\partial x \partial w \partial w_x} = 0, \quad \frac{\partial^4 F_{jk}}{\partial x^2 \partial w \partial w_x} = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 F_{jk}}{\partial x^2 \partial w} &= \frac{\partial F_{jk}}{\partial f} F_{23} + \frac{\partial F_{jk}}{\partial r} F_{13} + \frac{\partial F_{jk}}{\partial f_x} F_{23x} + \frac{\partial F_{jk}}{\partial r_x} F_{13x} + 2 \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial f_x^2} F_2 F_{23} + 2 \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial r_x^2} F_1 F_{13} + \\ &+ 2 \left(\frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial f \partial f_x} f_x F_{23} + \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial f \partial r_x} f_x F_{13} + \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial r \partial r_x} r_x F_{13} + \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial r \partial f_x} r_x F_{23} + \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial f_x \partial r_x} F_{23} F_1 + \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial f_x \partial r_x} F_2 F_{13} \right). \end{aligned}$$

В соотношении (10) остаются следующие слагаемые

$$\frac{\partial^3 F_{j1}}{\partial t \partial w_x \partial w} u + \frac{\partial^2 F_{j3}}{\partial t \partial w_x} - \frac{\partial^3 H_{j3}}{\partial x^2 \partial w_x} + \frac{\partial^3 F_{j3}}{\partial t \partial w_x \partial w} w + \frac{\partial^3 F_{j5}}{\partial t \partial w_x \partial w} - 2 \frac{\partial^2 H_{j3}}{\partial x \partial w} - 2 \frac{\partial^3 F_{j3}}{\partial x^2 \partial w}, \quad (20)$$

где с учетом (15) производные (19) преобразуются к более простому виду

$$\frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial t \partial w_x} = 2 \frac{\partial^3 F_{jk}}{\partial x^2 \partial w} = 2 \frac{\partial F_{jk}}{\partial f} F_{23} + 2 \frac{\partial F_{jk}}{\partial r} F_{13}, \quad k = 1, 3,$$

$$\frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial x \partial w} = \frac{\partial^3 H_{jk}}{\partial x^2 \partial w_x} = \frac{\partial H_{jk}}{\partial f_x} F_{23} + \frac{\partial H_{jk}}{\partial r_x} F_{13}, \quad \frac{\partial^3 F_{jk}}{\partial t \partial w_x \partial w} = 0.$$

Выражение (20) не должно быть тождественно равно нулю, а должно быть пропорционально F_{j1} с коэффициентом пропорциональности соответствующим коэффициенту члена $w w_x$ в системе (1) и равен -12μ . В итоге (20) после выполнения подстановки (14) дает уравнение

$$\left(\frac{\partial^2 F_{j5}}{\partial f_x^2} F_{23} + 2 \frac{\partial^2 F_{j5}}{\partial r_x \partial f_x} F_{13} - 2 \frac{\partial F_{j3}}{\partial f} \right) F_{23} + \left(\frac{\partial^2 F_{j5}}{\partial r_x^2} F_{13} - 2 \frac{\partial F_{j3}}{\partial r} \right) F_{13} = 2\mu F_{j1}. \quad (21)$$

(III). Производные примут вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 F_{jk}}{\partial t \partial w_x \partial u} &= \frac{\partial F_{jk}}{\partial f_x} \left(\frac{\partial H_{24}}{\partial f_x} F_{21} + \frac{\partial H_{24}}{\partial r_x} F_{11} \right) + \frac{\partial F_{jk}}{\partial r_x} \left(\frac{\partial H_{14}}{\partial f_x} F_{21} + \frac{\partial H_{14}}{\partial r_x} F_{11} \right), \\ \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial t \partial w_x} &= \frac{\partial F_{jk}}{\partial f} H_{24} + \frac{\partial F_{jk}}{\partial r} H_{14} + \frac{\partial F_{jk}}{\partial f_x} (H_{23} + H_{24x}) + \frac{\partial F_{jk}}{\partial r_x} (H_{13} + H_{14x}), \\ \frac{\partial^3 H_{jk}}{\partial x^2 \partial w_x} &= \frac{\partial H_{jk}}{\partial f_x} F_{23} + \frac{\partial H_{jk}}{\partial r_x} F_{13}, \quad \frac{\partial^4 H_{jk}}{\partial x^2 \partial w_x \partial u} = 0, \quad \frac{\partial^4 F_{jk}}{\partial x^2 \partial u \partial w_x} = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial x \partial u} &= \frac{\partial H_{jk}}{\partial f_x} F_{21} + \frac{\partial H_{jk}}{\partial r_x} F_{11}, \quad \frac{\partial^3 H_{jk}}{\partial x \partial u \partial w_x} = 0, \quad \frac{\partial^3 F_{jk}}{\partial x \partial u \partial w_x} = 0, \\ \frac{\partial^3 F_{jk}}{\partial x^2 \partial u} &= \frac{\partial F_{jk}}{\partial f} F_{21} + \frac{\partial F_{jk}}{\partial r} F_{11} + \frac{\partial F_{jk}}{\partial f_x} F_{21x} + \frac{\partial F_{jk}}{\partial r_x} F_{11x} + 2 \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial f_x^2} F_2 F_{21} + 2 \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial r_x^2} F_1 F_{11} + \\ &+ 2 \left(\frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial f \partial f_x} f_x F_{21} + \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial f \partial r_x} f_x F_{11} + \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial r \partial r_x} r_x F_{11} + \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial r \partial f_x} r_x F_{21} + \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial f_x \partial r_x} F_{21} F_1 + \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial f_x \partial r_x} F_2 F_{11} \right). \end{aligned}$$

После дифференцирования (10) остались следующие члены отличные от нуля

$$\frac{\partial^3 F_{j1}}{\partial t \partial w_x \partial u} u + \frac{\partial^2 F_{j1}}{\partial t \partial w_x} - \frac{\partial^3 H_{j1}}{\partial x^2 \partial w_x} + \frac{\partial^3 F_{j3}}{\partial t \partial w_x \partial u} w + \frac{\partial^3 F_{j5}}{\partial t \partial w_x \partial u} - 2 \frac{\partial^2 H_{j3}}{\partial x \partial u} - 2 \frac{\partial^2 F_{j3}}{\partial x^2 \partial u}. \quad (23)$$

Уточняя вид производных с использованием ранее найденного вида (4.9), перепишем оставшиеся коэффициенты (23) и приравняем к $6F_{j3}$

$$2 \frac{\partial F_{j1}}{\partial f} F_{23} + 2 \frac{\partial F_{j1}}{\partial r} F_{13} - \frac{\partial H_{j1}}{\partial f_x} F_{23} - \frac{\partial H_{j1}}{\partial r_x} F_{13} - 2 \frac{\partial H_{j3}}{\partial f_x} F_{21} - 2 \frac{\partial H_{j3}}{\partial r_x} F_{11} - 2 \frac{\partial F_{j3}}{\partial f} F_{21} - 2 \frac{\partial F_{j3}}{\partial r} F_{11} = 6F_{j3},$$

или после подстановки ранее найденных функций (13), (14) получим уравнение:

$$2\frac{\partial F_{j3}}{\partial f}F_{21} + 2\frac{\partial F_{j3}}{\partial r}F_{11} - \left(\frac{\partial^2 F_{j5}}{\partial f^2}F_{21} + \frac{\partial^2 F_{j5}}{\partial r_x \partial f}F_{11}\right)F_{23} - \left(\frac{\partial^2 F_{j5}}{\partial f_x \partial r}F_{21} + \frac{\partial^2 F_{j5}}{\partial r_x^2}F_{11}\right)F_{13} = 2F_{j3}. \quad (24)$$

Теперь необходимо решить систему шести квазилинейных уравнений в частных производных второго порядка (18), (21), (24), $j = 1, 2$

$$\begin{aligned} 2\left(\frac{\partial F_{j1}}{\partial f}F_{21} + \frac{\partial F_{j1}}{\partial r}F_{11}\right) - \left(F_{21}\frac{\partial}{\partial f} + F_{11}\frac{\partial}{\partial r}\right)^2 F_{j5} &= 2F_{j1}, \\ \left(F_{23}\frac{\partial}{\partial f} + F_{13}\frac{\partial}{\partial r}\right)^2 F_{j5} - 2\left(\frac{\partial F_{j3}}{\partial f}F_{23} + \frac{\partial F_{j3}}{\partial r}F_{13}\right) &= 2\mu F_{j1}, \quad (25) \\ 2\left(\frac{\partial F_{j3}}{\partial f}F_{21} + \frac{\partial F_{j3}}{\partial r}F_{11}\right) - \left(F_{23}\frac{\partial}{\partial f} + F_{13}\frac{\partial}{\partial r}\right)\left(F_{21}\frac{\partial}{\partial f} + F_{11}\frac{\partial}{\partial r}\right)F_{j5} &= 2F_{j3}. \end{aligned}$$

В полученной системе (25) выделились слагаемые , , , которые зависят только от f, r , и операторы дифференцирования второго порядка по переменным f_x, r_x , для которых зависимость от f, r является параметрической. Очевидно, что система распадается на две подсистемы, отдельно определяющие зависимость от f_x, r_x :

$$\begin{aligned} \left(F_{21}\frac{\partial}{\partial f} + F_{11}\frac{\partial}{\partial r}\right)^2 F_{j5} &= 0, \quad \left(F_{23}\frac{\partial}{\partial f} + F_{13}\frac{\partial}{\partial r}\right)^2 F_{j5} = 0, \\ \left(F_{23}\frac{\partial}{\partial f} + F_{13}\frac{\partial}{\partial r}\right)\left(F_{21}\frac{\partial}{\partial f} + F_{11}\frac{\partial}{\partial r}\right)F_{j5} &= 0, \quad (26) \end{aligned}$$

и зависимость от f, r :

$$\frac{\partial F_{j1}}{\partial f}F_{21} + \frac{\partial F_{j1}}{\partial r}F_{11} = F_{j1}, \quad \frac{\partial F_{j3}}{\partial f}F_{23} + \frac{\partial F_{j3}}{\partial r}F_{13} = -\mu F_{j1}, \quad \frac{\partial F_{j3}}{\partial f}F_{21} + \frac{\partial F_{j3}}{\partial r}F_{11} = F_{j3}. \quad (27)$$

Как видно обе системы (26), (27) являются переопределенными, поэтому не будем искать здесь их решения (хотя они, возможно, существуют, этот вариант не был исследован).

Или вторая возможность, когда действие дифференциальных операторов второго порядка на функцию F_{x5} дает выражение, зависящее только от f, r . Это возможно, если F_{x5} имеет квадратичную зависимость от f_x, r_x , представим ее в виде:

$$F_{j5} = s_{j1}(f, r)f_x^2 + s_{j2}(f, r)f_x r_x + s_{j3}(f, r)r_x^2 + s_{j4}(f, r)f_x + s_{j5}(f, r)r_x + s_{j6}(f, r). \quad (28)$$

В этом случае система (25) примет вид:

$$\begin{aligned}
F_{21} \frac{\partial F_{j1}}{\partial f} + F_{11} \frac{\partial F_{j1}}{\partial r} - s_{j1} F_{21}^2 - F_{21} F_{11} s_{j2} - s_{j3} F_{11}^2 &= F_{j1}, \\
s_{j1} F_{23}^2 + F_{23} F_{13} s_{j2} + s_{j3} F_{13}^2 - F_{23} \frac{\partial F_{j3}}{\partial f} - F_{13} \frac{\partial F_{j3}}{\partial r} &= \mu F_{j1}, \\
2 \left(F_{21} \frac{\partial F_{j3}}{\partial f} + F_{11} \frac{\partial F_{j3}}{\partial r} \right) - F_{23} [2s_{j1} F_{21} + F_{11} s_{j2}] - F_{13} [F_{21} s_{j2} + 2s_{j3} F_{11}] &= 2F_{j3}.
\end{aligned} \tag{29}$$

Первое уравнение дает систему, связывающую две функции F_{11} , F_{12}

$$\begin{aligned}
\left(F_{21} \frac{\partial}{\partial f} + F_{11} \frac{\partial}{\partial r} \right) F_{21} - s_{21} F_{21}^2 - F_{21} F_{11} s_{22} - s_{23} F_{11}^2 &= F_{21}, \\
\left(F_{21} \frac{\partial}{\partial f} + F_{11} \frac{\partial}{\partial r} \right) F_{11} - s_{11} F_{21}^2 - F_{21} F_{11} s_{12} - s_{13} F_{11}^2 &= F_{11}.
\end{aligned}$$

Выберем самые простейшие решения (такой подход является оправданным, так как преобразования Бэклунда по возможности должны иметь простой вид)

$$F_{21} = 0, \quad F_{11} = a - \text{const}, \tag{30}$$

тогда дополнительно надо положить

$$s_{23} = 0, \quad s_{13} = -\frac{1}{a}. \tag{31}$$

Оставшиеся равенства с учетом (30), (31) примут вид

$$\begin{aligned}
s_{11} F_{23}^2 + s_{12} F_{23} F_{13} - \frac{1}{a} F_{13}^2 - \left(F_{23} \frac{\partial}{\partial f} + F_{13} \frac{\partial}{\partial r} \right) F_{13} &= \mu a, \quad 2a \frac{\partial F_{13}}{\partial r} = a s_{12} F_{23}, \\
s_{21} F_{23}^2 + s_{22} F_{23} F_{13} - \left(F_{23} \frac{\partial}{\partial f} + F_{13} \frac{\partial}{\partial r} \right) F_{23} &= 0, \quad \frac{\partial F_{23}}{\partial r} = \frac{2 + a s_{22}}{2a} F_{23}.
\end{aligned} \tag{32}$$

Выберем по возможности более простые решения, для этого предположим что F_{13} , F_{23} зависят от f и не зависят от r , тогда

$$s_{12} = 0, \quad s_{22} = -\frac{2}{a} - \text{const}. \tag{32}$$

Остается только два дифференциальных уравнения первого порядка

$$s_{11} F_{23}^2 - \frac{1}{a} F_{13}^2 - F_{23} \frac{\partial F_{13}}{\partial f} = \mu a, \quad s_{21} F_{23}^2 - \frac{2}{a} F_{23} F_{13} - F_{23} \frac{\partial F_{23}}{\partial f} = 0, \tag{33}$$

решения которых можно варьировать. Пусть

$$F_{13} = 0, \quad s_{11} = \mu a e^{-2f}, \quad s_{21} = 1 \quad e^f = F_{23}. \quad (34)$$

В результате формулы (15) преобразуются к виду

$$\begin{aligned} F_1 &= au + a\mu e^{-2f} f_x^2 - \frac{1}{a} r_x^2 + S_1, \\ F_2 &= e^f w + f_x^2 - \frac{2}{a} f_x r_x + S_2, \\ H_1 &= (2r_x - as_{15})u - au_x + 2(2a\mu e^{-f} f_x + e^f s_{14})w + H_{15}(f, r, f_x, r_x), \\ H_2 &= [2f_x - as_{25}]u + 2e^f \left(s_{24} - \frac{2}{a} r_x \right) w + 2e^f w_x + H_{25}(f, r, f_x, r_x), \end{aligned} \quad (35)$$

где для компактности записи обозначено

$$\begin{aligned} S_1 &= s_{14}(f, r)f_x + s_{15}(f, r)r_x + s_{16}(f, r), \\ S_2 &= s_{24}(f, r)f_x + s_{25}(f, r)r_x + s_{26}(f, r). \end{aligned}$$

Вернемся к условию совместности (10)

$$\begin{aligned} a(u_t + u_{xxx}) + \frac{\partial F_{15}}{\partial t} - \frac{\partial^2 H_{15}}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 (H_{11}u + H_{13}w)}{\partial x^2}, \\ e^f(w_t - 2w_{xxx}) + \frac{\partial F_{25}}{\partial t} - \frac{\partial^2 H_{25}}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 (H_{21}u + H_{23}w)}{\partial x^2} + e^f(4f_x w_{xx} + 2[f_x^2 + F_2]w_x - H_2 w), \end{aligned} \quad (36)$$

и выявим зависимость от u^2 (I) (w^2 – этап (II), wu – этап (III)) для этого продифференцируем по u^2 (I) (на этапе (II) по w^2 , на этапе (III) по wu).

(I). В силу только линейной зависимости

$$F_j, H_j, \frac{\partial H_{jk}}{\partial x}$$

относительно функции u (8), условие (36) после дифференцирования по u^2 упростится и примет следующий вид

$$\frac{\partial^2 F_{j5}}{\partial t \partial (u^2)} - \frac{\partial^3 H_{j5}}{\partial x^2 \partial (u^2)} = \frac{\partial}{\partial (u^2)} \left(\frac{\partial^2 H_{j1}}{\partial x^2} u \right) + \frac{\partial^3 H_{j3}}{\partial x^2 \partial (u^2)} w, \quad j=1,2, \quad (37)$$

где частные производные определяются в силу равенств

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial t \partial (u^2)} &= 2a \frac{\partial F_{jk}}{\partial r_x}, \quad \frac{\partial^3 H_{jk}}{\partial x^2 \partial (u^2)} = a^2 \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial r_x^2}, \\ \frac{\partial}{\partial (u^2)} \left(\frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial x^2} u \right) &= [as_{25} - 2f_x] \frac{\partial H_{jk}}{\partial f_x} + [as_{15} - 2r_x] \frac{\partial H_{jk}}{\partial r_x} + 2a \left(\frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial f \partial r_x} f_x + \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial r \partial r_x} r_x + \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial f_x \partial r_x} F_2 \right) + \\ &+ a \frac{\partial H_{jk}}{\partial r} + \left(a^2 u + 2a^2 \mu e^{-2f} f_x^2 - 2r_x^2 + 2aS_1 \right) \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial r_x^2}, \end{aligned}$$

тогда (37) примут вид

$$\frac{\partial^2 H_{15}}{\partial r_x^2} = \frac{\partial s_{15}}{\partial r}, \quad \frac{\partial^2 H_{25}}{\partial r_x^2} = \frac{\partial s_{25}}{\partial r}. \quad (38)$$

(II). Выполним второй пункт алгоритма, согласно (8) и учитывая линейный характер $F_j, H_j, \frac{\partial H_{jk}}{\partial x}$ относительно функции w , (36) после дифференцирования преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F_{15}}{\partial t \partial (w^2)} - \frac{\partial^3 H_{15}}{\partial x^2 \partial (w^2)} &= \frac{\partial}{\partial (w^2)} \left(\frac{\partial^2 H_{13}}{\partial x^2} w \right) + \frac{\partial^3 H_{11}}{\partial x^2 \partial (w^2)} u, \\ \frac{\partial^2 F_{25}}{\partial t \partial (w^2)} - \frac{\partial^3 H_{25}}{\partial x^2 \partial (w^2)} &= \frac{\partial}{\partial (w^2)} \left(\frac{\partial^2 H_{23}}{\partial x^2} w \right) + \frac{\partial^3 H_{21}}{\partial x^2 \partial (w^2)} u - e^f H_{23}, \end{aligned} \quad (39)$$

где производные определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial t \partial (w^2)} &= 4a\mu \frac{\partial F_{jk}}{\partial r_x}, \quad \frac{\partial^3 H_{jk}}{\partial x^2 \partial (w^2)} = e^{2f} \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial f_x^2} \\ \frac{\partial}{\partial (w^2)} \left(\frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial x^2} w \right) &= e^f \frac{\partial H_{jk}}{\partial f} + e^f \left(3f_x - \frac{2}{a} r_x + s_{24} \right) \frac{\partial H_{jk}}{\partial f_x} + \left(2a\mu e^{-f} f_x + e^f s_{14} \right) \frac{\partial H_{jk}}{\partial r_x} + \\ &+ \left[e^{2f} w + 2e^f \left(f_x^2 - \frac{2}{a} f_x r_x + S_2 \right) \right] \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial f_x^2} + 2e^f \left(\frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial f \partial f_x} f_x + \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial r \partial f_x} r_x + \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial f_x \partial r_x} F_1 \right), \end{aligned}$$

Выполнив преобразования, соотношения (38) примут вид

$$\begin{aligned} 4a\mu s_{15} - e^{2f} \frac{\partial^2 H_{15}}{\partial f_x^2} &= 2e^{2f} \left(s_{14} + \frac{\partial s_{14}}{\partial f} \right) + 4a\mu s_{24}, \\ 4a\mu s_{25} - e^{2f} \frac{\partial^2 H_{25}}{\partial f_x^2} &= -\frac{4}{a} e^{2f} s_{14}, \end{aligned} \quad (40)$$

(III). Условие совместности (36) для $j = 1, 2$ дает систему:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F_{15}}{\partial t \partial (uw)} - \frac{\partial^3 H_{15}}{\partial x^2 \partial (uw)} &= \frac{\partial}{\partial (uw)} \left(\frac{\partial^2 H_{11}}{\partial x^2} u + \frac{\partial^2 H_{13}}{\partial x^2} w \right), \\ \frac{\partial^2 F_{25}}{\partial t \partial (uw)} - \frac{\partial^3 H_{25}}{\partial x^2 \partial (uw)} &= \frac{\partial}{\partial (uw)} \left(\frac{\partial^2 H_{21}}{\partial x^2} u + \frac{\partial^2 H_{23}}{\partial x^2} w \right) - e^f H_{21}, \end{aligned} \quad (41)$$

где смешанные производные имеют следующие значения

$$\frac{\partial^2 F_{jk}}{\partial t \partial (wu)} = -2e^f \frac{\partial F_{jk}}{\partial f_x}, \quad \frac{\partial^3 H_{jk}}{\partial x^2 \partial (uw)} = 2ae^f \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial f_x \partial r_x}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial(uw)}\left(\frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial x^2}u\right) &= e^f \frac{\partial H_{jk}}{\partial f} + e^f \left(3f_x - \frac{2}{a}r_x + s_{24}\right) \frac{\partial H_{jk}}{\partial f_x} + (2a\mu e^{-f}f_x + e^f s_{14}) \frac{\partial H_{jk}}{\partial r_x} + \\
&+ \left[e^{2f}w + 2e^f \left(f_x^2 - \frac{2}{a}f_x r_x + S_2\right)\right] \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial f_x^2} + 2e^f \left(\frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial f \partial f_x} f_x + \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial r \partial f_x} r_x + \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial f_x \partial r_x} F_1\right), \\
\frac{\partial}{\partial(uw)}\left(\frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial x^2}w\right) &= a \frac{\partial H_{jk}}{\partial r} + (as_{25} - 2f_x) \frac{\partial H_{jk}}{\partial f_x} + (as_{15} - 2r_x) \frac{\partial H_{jk}}{\partial r_x} + \\
&+ \left[a^2 u + 2a \left(a\mu e^{-2f}f_x^2 - \frac{1}{a}r_x^2 + S_1\right)\right] \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial r_x^2} + 2a \left(\frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial f \partial r_x} f_x + \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial r \partial r_x} r_x + \frac{\partial^2 H_{jk}}{\partial f_x \partial r_x} F_2\right).
\end{aligned}$$

Используя ранее найденный вид коэффициентов и их зависимость от r_x , r , f_x , f , из (40) получим два новых дифференциальных уравнения:

$$\begin{aligned}
2a \frac{\partial^2 H_{15}}{\partial f_x \partial r_x} - a \frac{\partial s_{15}}{\partial f} + 4s_{14} + 2a \frac{\partial s_{14}}{\partial r} + 4a^2 \mu e^{-2f} s_{25} &= 0, \\
2a \frac{\partial^2 H_{25}}{\partial f_x \partial r_x} + 4s_{24} - a \frac{\partial s_{25}}{\partial f} + as_{25} + 2a \frac{\partial s_{24}}{\partial r} - 4s_{15} &= 0.
\end{aligned} \tag{42}$$

Равенства (38), (40), (42) не содержат в явном виде переменные f_x , r_x , это позволяет предположить, что функции $H_{j5} = 0$, $s_{jk} = 0$, $j = 1, 2$, $k = 4, 5, 6$. Выполним проверку, вернувшись к равенствам (36), где

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F_{15}}{\partial t} &= -2a\mu e^{-2f}f_x^2 H_2 + 2a\mu e^{-2f}f_x H_{2x} - \frac{2}{a}r_x H_{1x}, \quad \frac{\partial F_{25}}{\partial t} = [2f_x - \frac{2}{a}r_x]H_{2x} - \frac{2}{a}f_x H_{1x}, \\
\frac{\partial H_{11}}{\partial x} &= 2F_1, \quad \frac{\partial H_{13}}{\partial x} = 4a\mu e^{-f}[F_2 - f_x^2], \quad \frac{\partial H_{21}}{\partial x} = 2F_2, \quad \frac{\partial H_{23}}{\partial x} = -\frac{4}{a}e^f[r_x f_x + F_1], \\
\frac{\partial^2 H_{11}}{\partial x^2} &= 2F_{1x}, \quad \frac{\partial^2 H_{13}}{\partial x^2} = 4a\mu e^{-f}[F_{2x} + f_x^3 - 3f_x F_2], \quad \frac{\partial^2 H_{21}}{\partial x^2} = 2F_{2x}, \\
\frac{\partial^2 H_{23}}{\partial x^2} &= -\frac{4}{a}e^f[r_x F_2 + F_{1x} + r_x f_x^2 + 2f_x F_1], \quad \frac{\partial F_{23}}{\partial t} = e^f H_2, \quad \frac{\partial^2 F_{23}}{\partial x^2} = e^f F_2 + e^f f_x^2,
\end{aligned}$$

в результате подстановки имеем

$$\begin{aligned}
a(u_t + u_{xxx}) &= 6au_x u + 12a\mu w_x w, \\
w_t - 2w_{xxx} &= -6w_x u.
\end{aligned}$$

Как видно равенства совпадают, поэтому найдено преобразование Бэклунда вида (35), где $s_{jk} = 0$, $H_{j5} = 0$, $j = 1, 2$, $k = 4, 5, 6$.

Результаты исследований и их обсуждение

ТЕОРЕМА 1.

Нелинейные системы уравнений в частных производных (1) и

$$\begin{aligned} r_t &= \frac{2}{a^2} r_x^3 - r_{xx} + 6\mu e^{-2f} f_x (af_{xx} - af_x^2 + f_x r_x), \\ f_t &= \frac{6}{a} f_x \left(r_{xx} - \frac{1}{a} r_x^2 - af_{xx} \right) + 2f_x^3 [1 - \mu e^{-2f}] + 2f_{xxx}, \end{aligned} \quad (43)$$

связаны между собой преобразованиями Бэклунда вида:

$$\begin{aligned} r_t &= 2r_x u - au_x + 4a\mu e^{-f} f_x w, & f_t &= 2f_x u - \frac{4}{a} e^f r_x w + 2e^f w_x, \\ r_{xx} &= au + a\mu e^{-2f} f_x^2 - \frac{1}{a} r_x^2, & f_{xx} &= e^f w + f_x^2 - \frac{2}{a} f_x r_x, \end{aligned} \quad (44)$$

где $u(x, t)$, $w(x, t)$, $f(x, t)$, $r(x, t)$ – дифференцируемые функции двух независимых переменных, $a \neq 0$, μ – произвольные параметры отличные от нуля.

Доказательство. Дифференциальные связи (44) дают возможность получить обе системы. Получение системы (1) уже осуществлено выше при построении преобразований Бэклунда, в ходе анализа условия совместности (36) и подстановки функций (35).

Выполним преобразования, позволяющие в системе (44) избавиться от функций $u(x, t)$, $w(x, t)$, это легко сделать из верхней строки системы (44)

$$u = \frac{1}{a} r_{xx} - \mu e^{-2f} f_x^2 + \frac{1}{a^2} r_x^2, \quad w = e^{-f} \left(f_{xx} - f_x^2 + \frac{2}{a} f_x r_x \right),$$

тогда оставшиеся два уравнения после подстановки дают связь только между функциями $f(x, t)$, $r(x, t)$

$$\begin{aligned} r_t &= 2r_x \left(\frac{1}{a} r_{xx} - \mu e^{-2f} f_x^2 + \frac{1}{a^2} r_x^2 \right) - r_{xxx} - a \left(\frac{1}{a^2} r_x^2 - \mu e^{-2f} f_x^2 \right)_x + 4a\mu e^{-2f} f_x \left(f_{xx} - f_x^2 + \frac{2}{a} f_x r_x \right), \\ f_t &= 2f_x \left(\frac{1}{a} r_{xx} + [1 - \mu e^{-2f}] f_x^2 - f_{xx} \right) - \frac{2}{a} r_x \left(\frac{3}{a} f_x r_x + 2f_{xx} \right) + 2f_{xxx} + 2 \left(\frac{2}{a} f_x r_x - f_x^2 \right)_x. \end{aligned}$$

Выполним элементарные преобразования и получим систему (43).

Можно получить и другой вид преобразований. Для этого в проделанной процедуре исследований вернемся к моменту, который определяет вид F_{j3} , $j = 1, 2$, т. е. к системе (33).

Считая, что $F_{23} \neq 0$ из второго находим F_{13} и уравнение на функцию F_{23} :

$$F_{13} = \frac{a}{2} \left(s_{21} - \frac{\partial}{\partial f} \right) F_{23},$$

$$s_{11}F_{23}^2 - \frac{a}{4} \left[\left(s_{21} - \frac{\partial}{\partial f} \right) F_{23} \right]^2 - \frac{a}{2} F_{23} \frac{\partial}{\partial f} \left(s_{21} - \frac{\partial}{\partial f} \right) F_{23} = \mu a,$$

для упрощения решения второго уравнения положим

$$s_{21} = 0, \quad s_{11} = -\frac{a}{4}, \quad (45)$$

при этом решение второго уравнения с точностью до постоянных интегрирования (они положены равными нулю) дает функции

$$F_{23} = 2\sqrt{\mu}chf, \quad F_{13} = -a\sqrt{\mu}shf. \quad (46)$$

В результате формулы (15) преобразуются к виду

$$\begin{aligned} F_1 &= au - a\sqrt{\mu}shfw - \frac{a}{4}f_x^2 - \frac{1}{a}r_x^2 + S_1, \\ F_2 &= 2\sqrt{\mu}chfw - \frac{2}{a}f_xr_x + S_2, \\ H_1 &= (2r_x - as_{15})u - au_x + 2\sqrt{\mu}[(2s_{14} + af_x)chf + [2r_x - as_{15}]shf)w - 2a\sqrt{\mu}shfw_x + H_{15}, \\ H_2 &= [2f_x - as_{25}]u + 2\sqrt{\mu}\left(2\left[s_{24} - \frac{2}{a}r_x\right]chf - (as_{25} + 2f_x)shf\right)w + 4\sqrt{\mu}chfw_x + H_{25}. \end{aligned} \quad (47)$$

где H_{j5} – зависят только от f, r, f_x, r_x , и для компактности записи обозначено

$$\begin{aligned} S_1 &= s_{14}(f, r)f_x + s_{15}(f, r)r_x + s_{16}(f, r), \\ S_2 &= s_{24}(f, r)f_x + s_{25}(f, r)r_x + s_{26}(f, r). \end{aligned} \quad (48)$$

Вернемся к условию совместности (10) и подставим новый вид функций $F_j, H_j, j = 1, 2$ (47), тогда

$$\begin{aligned} a(u_t + u_{xxx}) - a\sqrt{\mu}chfH_2w - a\sqrt{\mu}shf(w_t - 2w_{xxx}) + \frac{\partial F_{15}}{\partial t} - \frac{\partial^2 H_{15}}{\partial x^2} &= \\ = \frac{\partial^2 (H_{11}u + H_{13}w)}{\partial x^2} - 2a\sqrt{\mu}(f_x^2shf + F_2chf)w_x - 4a\sqrt{\mu}f_xchfw_{xx}, \\ 2\sqrt{\mu}shfH_2w + 2\sqrt{\mu}chf(w_t - 2w_{xxx}) + \frac{\partial F_{25}}{\partial t} - \frac{\partial^2 H_{25}}{\partial x^2} &= \\ = \frac{\partial^2 (H_{21}u + H_{23}w)}{\partial x^2} + 4\sqrt{\mu}(f_x^2chf + F_2shf)w_x + 8\sqrt{\mu}f_xshfw_{xx}. \end{aligned} \quad (49)$$

Вывявим зависимость от u^2 (I) (w^2 – этап (II), wu – этап (III)) для этого продифференцируем (49) по u^2 (I) (на этапе (II) по w^2 , на этапе (III) по wu):

(I). В силу только линейной зависимости

$$F_j, H_j, \frac{\partial H_{jk}}{\partial x}$$

относительно функции u , условие (49) после дифференцирования по u^2 упростится и для $j = 1, 2$ примет следующий вид

$$\frac{\partial^2 F_{j5}}{\partial t \partial (u^2)} - \frac{\partial^3 H_{j5}}{\partial x^2 \partial (u^2)} = \frac{\partial}{\partial (u^2)} \left(\frac{\partial^2 H_{j1}}{\partial x^2} u \right) + w \frac{\partial^3 H_{j3}}{\partial x^2 \partial (u^2)}. \quad (50)$$

Выполняя подстановку известных коэффициентов (50) примет вид

$$\frac{\partial^2 H_{15}}{\partial r_x^2} = \frac{\partial s_{15}}{\partial r}, \quad \frac{\partial^2 H_{25}}{\partial r_x^2} = 0. \quad (51)$$

(II). Выполним второй пункт алгоритма, тогда (49) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F_{15}}{\partial t \partial (w^2)} - \frac{\partial^3 H_{15}}{\partial x^2 \partial (w^2)} - a\sqrt{\mu} \text{ch} f H_{23} &= \frac{\partial}{\partial (w^2)} \left(\frac{\partial^2 H_{13}}{\partial x^2} w \right) + u \frac{\partial^3 H_{11}}{\partial x^2 \partial (w^2)}, \\ 2\sqrt{\mu} \text{sh} f H_{23} + \frac{\partial^2 F_{25}}{\partial t \partial (w^2)} - \frac{\partial^3 H_{25}}{\partial x^2 \partial (w^2)} &= \frac{\partial}{\partial (w^2)} \left(\frac{\partial^2 H_{23}}{\partial x^2} w \right) + u \frac{\partial^3 H_{21}}{\partial x^2 \partial (w^2)}, \end{aligned} \quad (52)$$

Выполнив преобразования, соотношения примут вид

$$\begin{aligned} 4a \text{sh} f \text{ch} f \frac{\partial^2 H_{15}}{\partial f_x \partial r_x} - 4 \text{ch}^2 f \frac{\partial^2 H_{15}}{\partial f_x^2} - a^2 \text{sh}^2 f \frac{\partial^2 H_{15}}{\partial r_x^2} - 4a \text{ch} f (2s_{24} \text{ch} f - as_{25} \text{sh} f) = \\ = 16s_{14} \text{sh} f \text{ch} f - 8as_{15} \text{ch}^2 f + [4 \text{ch} f - 2a \text{sh} f] \left(2 \frac{\partial s_{14}}{\partial r} \text{ch} f - a \frac{\partial s_{15}}{\partial r} \text{sh} f \right), \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} 4[2s_{24} \text{ch} f - as_{25} \text{sh} f] \text{sh} f + 8as_{25} - 4 \text{ch}^2 f \frac{\partial^2 H_{25}}{\partial f_x^2} - a^2 \text{sh}^2 f \frac{\partial^2 H_{25}}{\partial r_x^2} + 4a \text{sh} f \text{ch} f \frac{\partial^2 H_{25}}{\partial f_x \partial r_x} = \\ = (4 \text{ch} f - 2a \text{sh} f) \left(2 \frac{\partial s_{24}}{\partial f} \text{ch} f - a \frac{\partial s_{25}}{\partial f} \text{sh} f \right) - \frac{4}{a} 2 \text{ch} f [2 \text{ch} f s_{14} - a \text{sh} f s_{15}]. \end{aligned} \quad (54)$$

(III). Условие совместности (49) для $j = 1, 2$ дает систему:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F_{15}}{\partial t \partial (uw)} - \frac{\partial^3 H_{15}}{\partial x^2 \partial (uw)} - a\sqrt{\mu} \text{ch} f H_{21} &= \frac{\partial}{\partial (uw)} \left(\frac{\partial^2 H_{11}}{\partial x^2} u + \frac{\partial^2 H_{13}}{\partial x^2} w \right), \\ 2\sqrt{\mu} \text{sh} f H_{21} + \frac{\partial^2 F_{25}}{\partial t \partial (uw)} - \frac{\partial^3 H_{25}}{\partial x^2 \partial (uw)} &= \frac{\partial}{\partial (uw)} \left(\frac{\partial^2 H_{21}}{\partial x^2} u + \frac{\partial^2 H_{23}}{\partial x^2} w \right), \end{aligned} \quad (55)$$

Используя ранее найденный вид коэффициентов и их зависимость от r_x, r, f_{x^2}, f , получим два новых дифференциальных уравнения:

$$\begin{aligned}
& a^2 \text{ch} f s_{25} - 4a \text{ch} f \frac{\partial^2 H_{15}}{\partial f_x \partial r_x} + 2a^2 \text{sh} f \frac{\partial^2 H_{15}}{\partial r_x^2} = \\
& = 8 \text{ch} f s_{14} + 4a \frac{\partial s_{14}}{\partial r} \text{ch} f - a^2 \frac{\partial s_{15}}{\partial r} \text{sh} f - 2a \text{ch} f \frac{\partial s_{15}}{\partial f} - 4a \text{sh} f s_{15}, \quad (56) \\
& 2a \text{sh} f s_{25} - 4a \text{ch} f \frac{\partial^2 H_{25}}{\partial f_x \partial r_x} + 2a^2 \text{sh} f \frac{\partial^2 H_{25}}{\partial r_x^2} = 8 \text{ch} f s_{24} - a^2 \frac{\partial s_{25}}{\partial r} \text{sh} f - 2a \text{ch} f \frac{\partial s_{25}}{\partial f} + 4a \frac{\partial s_{24}}{\partial r} \text{ch} f.
\end{aligned}$$

Полученные равенства (51), (53), (54), (56) не содержат в явном виде переменные f_x , r_x , это позволяет предположить, что функции H_{15} , H_{25} имеют зависимость от этих переменных не старше второго порядка по совокупности. Кроме этого из равенства $\frac{\partial^2 H_{25}}{\partial r_x^2} = 0$ следует, что H_{25} имеет только линейную зависимость от r_x . Используя (51) из перечисленной системы остается две пары уравнений

$$\begin{aligned}
& 4 \left(\frac{\partial^2 H_{15}}{\partial f_x^2} + 2a s_{24} + 2 \frac{\partial s_{14}}{\partial r} \right) \text{ch} f = 4a \left(2 \text{ch} f + \frac{\text{sh}^2 f}{\text{ch} f} \right) s_{15} + \\
& + \left(5a^2 s_{25} + 2a \frac{\partial s_{15}}{\partial f} - 24s_{14} + 4a \frac{\partial s_{15}}{\partial r} \right) \text{sh} f, \quad (57)
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 H_{15}}{\partial f_x \partial r_x} = \frac{a}{4} s_{25} - \frac{2}{a} s_{14} - \frac{\partial s_{14}}{\partial r} + \frac{3a}{4} \frac{\partial s_{15}}{\partial r} \text{th} f + \frac{1}{2} \frac{\partial s_{15}}{\partial f} + \text{th} f s_{15}, \quad (58)$$

$$\begin{aligned}
& 8a s_{25} - 2a s_{25} \text{sh}^2 f - 4 \text{ch}^2 f \frac{\partial^2 H_{25}}{\partial f_x^2} + a^2 \text{sh}^2 f \frac{\partial s_{25}}{\partial r} = 2 \text{ch} f \left(4 \frac{\partial s_{24}}{\partial f} \text{ch} f - 3a \frac{\partial s_{25}}{\partial f} \text{sh} f \right) - \\
& - 2a \text{sh} f \left(2 \frac{\partial s_{24}}{\partial f} \text{ch} f - a \frac{\partial s_{25}}{\partial f} \text{sh} f \right) + 4a \frac{\partial s_{24}}{\partial r} \text{sh} f \text{ch} f - \frac{4}{a} 2 \text{ch} f [2 \text{ch} f s_{14} - a \text{sh} f s_{15}]. \quad (59)
\end{aligned}$$

$$4a \text{ch} f \frac{\partial^2 H_{25}}{\partial f_x \partial r_x} = 2a \text{sh} f s_{25} - 8 \text{ch} f s_{24} + a^2 \frac{\partial s_{25}}{\partial r} \text{sh} f + 2a \text{ch} f \frac{\partial s_{25}}{\partial f} - 4a \frac{\partial s_{24}}{\partial r} \text{ch} f. \quad (60)$$

Как видно из оставшихся равенств, ранее неизвестные функции можно положить равными нулю при условии, что условие совместности (49) не будет содержать членов линейных относительно u , u_x , w , w_x . Выполним проверку, подставим в (49)

$$s_{jk}(f, r) = 0, \quad H_{j5}(f, r, f_x, r_x) = 0, \quad j = 1, 2, \quad k = 4, 5, 6, \quad (61)$$

и найдем необходимые производные, тогда система (49) упростится и примет вид

$$u_t + u_{xxx} - 6u u_x - \sqrt{\mu} \text{sh} f (w_t - 2w_{xxx}) = 6\sqrt{\mu} \text{sh} f w_x u + 12\mu w_x w,$$

$$w_t - 2w_{xxx} + 6u w_x = 0.$$

Из полученных равенств сразу же следует система (1), поэтому предположения (61) остаются в силе. Искомые функции (47) приобрели окончательный вид:

$$\begin{aligned} F_1 &= au - a\sqrt{\mu}shfw - \frac{a}{4}f_x^2 - \frac{1}{a}r_x^2, \\ F_2 &= 2\sqrt{\mu}chfw - \frac{2}{a}f_xr_x, \\ H_1 &= 2r_xu - au_x + 2\sqrt{\mu}(af_xchf + 2r_xshf)w - 2a\sqrt{\mu}shfw_x, \\ H_2 &= 2f_xu - 4\sqrt{\mu}\left(\frac{2}{a}r_xchf + 2f_xshf\right)w + 4\sqrt{\mu}chfw_x. \end{aligned} \quad (62)$$

ТЕОРЕМА 2.

Нелинейные системы уравнений в частных производных (1) и

$$\begin{aligned} r_t &= r_x\left(\frac{3}{2}f_x^2 + \frac{2}{a^2}r_x^2\right) - r_{xxx} - 3thf\left(\frac{a}{2}f_{xxx} + f_xr_{xx} - \frac{2}{a}r_x^2f_x\right) + \frac{3}{2}f_x(af_{xx} + 2f_xr_x)th^2f, \\ f_t &= 2f_x\left(\frac{1}{4}f_x^2 - \frac{3}{a^2}r_x^2\right) - \frac{5}{a}f_xthf[af_{xx} + 2f_xr_x] + 2f_{xxx} + \frac{6}{a}f_xr_{xx}, \end{aligned} \quad (63)$$

связаны между собой преобразованиями Бэклунда вида:

$$\begin{aligned} r_{xx} &= au - a\sqrt{\mu}wshf - \frac{a}{4}f_x^2 - \frac{1}{a}r_x^2, \\ f_{xx} &= 2\sqrt{\mu}wchf - \frac{2}{a}f_xr_x, \\ r_t &= 2r_xu - au_x + 2\sqrt{\mu}(af_xchf + 2r_xshf)w - 2a\sqrt{\mu}w_xshf, \\ f_t &= 2f_xu - 4\sqrt{\mu}\left(\frac{2}{a}r_xchf + 2f_xshf\right)w + 4\sqrt{\mu}w_xchf, \end{aligned} \quad (64)$$

где $u(x, t)$, $w(x, t)$, $f(x, t)$, $r(x, t)$ – дифференцируемые функции двух независимых переменных, $a \neq 0$, $\mu > 0$ – произвольные параметры отличные от нуля.

Выводы

В статье развит метод Клэрэна и осуществлено построение дифференциальных связей двух нелинейных систем в частных производных:

1. Проведен анализ нелинейной системы уравнений третьего порядка.
2. Определена общая структура преобразований Бэклунда.
3. Приведены два частных случая, позволяющих осуществить переход от одной системы к другой.

Библиографический список

1. Рыбников А. К. Связности Бэклунда и отображения Бэклунда, соответствующие эволюционным уравнениям второго порядка / А.К. Рыбников, К.В. Семенов // Известия высших учебных заведений. Математика. 2004. № 5. С. 52–68.
2. Лэм Д.Л. Введение в теорию солитонов / Д.Л. Лэм. М.: Мир, 1983. 294 с.
3. Miura R. M. Conservation laws for the fully nonlinear long-wave equations / R. M. Miura // Stud. Appl. Math. 1974. V. 53. P. 45–56.
4. Miura R.M. Korteweg-de Vries equation and generalizations II. Existence of conservation laws and constants of motion / R.M. Miura, C.S Gardner, M.D. Kruskal // Journal of Mathematical Physics. V. 9. 1968. P. 1204–1209.
5. Павлов М.В. Уравнение Буссинеска и преобразования типа Миуры / М.В. Павлов // Фундаментальная и прикладная математика. 2004. Т. 10. № 1. С. 175–182.
6. Рыбников А.К. Отображения Бэклунда и преобразования Ли-Бэклунда как дифференциально-геометрические структуры // Фундаментальная и прикладная математика. 2010. Т. 16. № 1. С. 135–150.

References

1. Rybnikov A. K. Svyaznosti Behklunda i otobrazheniya Behklunda, sootvetstvuyushchie ehvolyucionnym uravneniyam vtorogo poryadka (Bäcklund connectives and Backlund maps corresponding to second-order evolution equations) / A.K. Rybnikov, K.V. Semenov // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Matematika. 2004. № 5. S. 52–68.
2. Lehm D.L. Vvedenie v teoriyu solitonov (Introduction to the theory of solitons) / D.L. Lehm. M.: Mir, 1983. 294 s.
3. Miura, R. M., Conservation laws for the fully nonlinear long-wave equations (R. M. Miura, Stud. Appl. Math. 1974. V. 53. P. 45–56.
4. Miura R.M. Korteweg-de Vries equation and generalizations II. Existence of conservation laws and constants of motion. Miura, S.S. Gardner, M.D. Kruskal // Journal of Mathematical Physics. V. 9. 1968. P. 1204–1209.
5. Pavlov M.V. Uravnenie Bussineska i preobrazovaniya tipa Miury / M.V. Pavlov (Boussinesq equation and Miura type transformations) // Fundamental'naya i prikladnaya matematika. 2004. T. 10. № 1. S. 175–182.
6. Rybnikov A.K. Otobrazheniya Behklunda i preobrazovaniya Li-Behklunda kak differencial'no-geometricheskie struktury (Bäcklund mappings and Li-Backlund transformations as differential-geometric structures) // Fundamental'naya i prikladnaya matematika. 2010. T. 16. № 1. S. 135–150.

УДК 551.466

**Савотченко С.Е. [Savotchenko S.E.],
Горлов А.С. [Gorlov A.S.]****МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ
ПРОЦЕССОВ В ЖИДКОСТИ ПОД
ДЕЙСТВИЕМ КОЛЕБАНИЙ МЕМБРАНЫ
В ТРУБЕ****Simulation of wave processes in liquid under
the vibrations of the membrane in the tube**

В статье предложена математическая модель волновых процессов в идеальной несжимаемой жидкости внутри цилиндрической трубы с колеблющейся мембраной на одном конце. Показано, что внешняя сила, приложенная к мембране, находящейся на одном конце трубы, вызывает ее поперечные вынужденные колебания, которые в свою очередь вызывают возмущение давления внутри трубы. Рассмотрен случай гармонического внешнего воздействия при фиксированных частотах. Проанализированы результаты воздействия внешних сил различных распределений, в том числе и постоянного равномерного. Приведены аналитические результаты моделирования для трубы произвольного и кругового сечений. Численное моделирование проведено для случая равномерного распределения по поверхности мембраны внешней гармонической силы. В результате установлено, что максимальная амплитуда возбуждаемых колебаний расположена вблизи основания трубы, в котором закреплена мембрана. Затухание волны, как правило, происходит достаточно быстро.

The mathematical model of wave processes in an ideal incompressible liquid inside a cylindrical tube with a vibrating membrane on one end is presented in the article. It is shown that the external force applied to the membrane which is on the one end of the tube initiates its transverse forced vibrations which also initiate pressure disturbance inside the tube. The case of a harmonic external force at fixed frequencies is considered. The results of the influence of external forces of various distributions, including uniform and constant are analyzed. The analytical results for tube with circular and undefined sections are derived. Numerical simulation was carried out for the case of uniformed distribution on the surface of membrane of external harmonic force. It was found that maximum amplitude of forced vibrations is located near the tube edge where the membrane is fixed. As a rule, damping of wave occurs very quickly.

Ключевые слова: волны в жидкости, вынужденные колебания, несжимаемая жидкость, уравнение Эйлера.

Key words: waves in liquid, forced vibrations, incompressible liquid, Euler equation.

Введение

Изучение разнообразных колебательных и волновых явлений в жидкостях проводится достаточно давно, чему посвящена многочисленная литература [1, 2].

Целью данной работы является формулировка новой модели, описывающей возбуждение волн в жидкости внутри цилиндрической трубы колебаниями мембраны, закрепленной на одном ее конце. Данная модель может быть использована для цилиндрической трубы произвольной формы сечения.

В данной работе будет показано, что математическая формулировка предлагаемой модели приведет к краевой задаче для системы уравнения Лап-

ласа с неоднородными краевыми условиями второго рода и неоднородного волнового уравнения с однородными краевыми условиями первого рода [3, 4]. К достоинству данной модели следует отнести возможность получения решения поставленной задачи в явном аналитическом виде.

Рассматриваемый в данной работе тип волн отличается от изученных в [5, 6] тем, что капиллярные силы здесь не учитываются, поэтому данный тип волн не относится к капиллярным. Физический механизм возбуждения рассматриваемых в данной работе волн обусловлен взаимодействием жидкости в трубе с колебаниями мембраны под внешним гармоническим воздействием.

Материалы и методы исследования. Основные уравнения модели

В данной работе для исследования механизмов возбуждения волн под действием внешних сил применяются методы математического моделирования, которые базируются на традиционных методах математической физики [3, 4] и таком классическом разделе теоретической физики как гидродинамика [1, 2].

Рассмотрим постановку задачи для нахождения избыточного давления в заполненной несжимаемой жидкостью цилиндрической трубке произвольного сечения, создаваемого гармоническими колебаниями мембраны, закрывающей один конец трубки. Второй конец трубки считается закрепленным. Вынужденные колебания мембраны возникают за счет воздействия на нее внешней распределенной силы. Пусть длина цилиндра h , а мембрана занимает область $D \subset R^2$, ограниченную гладким плоским контуром C . Направим ось Oz в глубину вдоль оси цилиндра и пусть мембрана расположена на границе $z = 0$ в плоскости xOy . Тогда область поиска решения представляет собой множество $B = \{(x, y, z): (x, y) \in D \subset R^2, 0 \leq z \leq h\} \subset R^3$ при $t > 0$. Будем обозначать через M точки из трехмерной области B , а через M_2 точки двумерной области D , которую занимает мембрана. Пусть на закрепленную по краям мембрану действует внешнее давление, меняющееся по гармоническому закону с заданной частотой ω . Такое воздействие можно описать выражением $f(M_2)e^{i\omega t}$, где $f(M_2) = p(M_2)/\rho_m$ функция $p(M_2)$ распределение внешнего воздействия по поверхности мембраны, ρ_m – поверхностная плотность мембраны. Пусть $u(M_2, t)$ – форма мембраны в момент времени $t > 0$. Как хорошо известно [3, 4], установившиеся малые колебания мембраны описываются функцией $u(M_2, t)$, которая определяется как решение волнового уравнения:

$$u_{tt} = s^2 \Delta_2 u + f(M_2)e^{i\omega t}, \quad M_2 \in D, \quad t > 0 \quad (1)$$

где Δ_2 – двумерный оператор Лапласа по координатам M_2 ,
 $s = (\sigma/\rho_m)^{1/2}$ – скорость поперечных колебаний мембраны,
 σ – натяжение мембраны.

Смещение мембраны также должно удовлетворять однородному краевому условию 1-го рода, соответствующему закреплённому краю мембраны по контуру C :

$$u|_C = 0, \quad M_2 \in C$$

Таким образом, смещение мембраны определяется как решение 1-й краевой задачи для неоднородного волнового уравнения. Пусть $p(M, t)$ – избыточное давление внутри цилиндра в области $M_2 \in B$, создаваемое колебаниями мембраны, закреплённой на конце $z = 0$. Жидкость в цилиндре будем считать идеальной. Поэтому распределение скоростей частиц жидкости можно считать определяемой из уравнения Эйлера, в котором можно пренебречь квадратичным относительно скорости V членом в силу малости рассматриваемых колебаний [1]:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\nabla p}{\rho} \quad (2)$$

где $V(M, t)$ – вектор скорости движения частиц жидкости,
 ρ – невозмущённая плотность жидкости,
 ∇p – градиент давления. Нормальная производная давления в жидкости связана с изменением нормальной компоненты скорости частиц жидкости v_n соотношением [1]:

$$\left. \frac{\partial p}{\partial n} \right|_C = -\rho \frac{\partial V_n}{\partial t} \quad (3)$$

Поскольку на границе $z = 0$ нормальная скорость частиц жидкости определяется скоростью смещения мембраны

$$V_n|_{z=0} = \partial u / \partial t$$

то (3) примет вид:

$$\left. \frac{\partial p}{\partial z} \right|_{z=0} = \rho \omega^2 u \quad (4)$$

где учтено, что в силу гармонической зависимости от времени внешнего давления на мембрану, смещение u будет также зависеть от множителя $e^{i\omega t}$.

На неподвижной границе цилиндра нормальная компонента скорости равна нулю:

$$V_z|_{z=h} = 0$$

Из уравнения Эйлера для z -й компоненты скорости на границе $z = 0$, считая, что зависимость всех искомых величин (скорости, давления) от времени определяется множителем $e^{i\omega t}$, следует:

$$i\omega V_z \Big|_{z=h} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=h} \quad (5)$$

Следовательно, на неподвижной стенке цилиндра должно выполняться краевое условие второго рода:

$$\frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=h} = 0 \quad (6)$$

На остальных неподвижных боковых стенках цилиндра также из уравнения Эйлера в рассматриваемом случае гармонического воздействия получается соотношение:

$$i\omega V_n = -\frac{1}{\rho} (\mathbf{n}, \nabla p) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}$$

Остуда в силу равенства нулю нормальной компоненты скорости на неподвижных стенках цилиндра получается краевое условие 2-го рода:

$$\frac{\partial p}{\partial n} \Big|_c = 0, M_2 \in C, 0 \leq z \leq h \quad (7)$$

Из условия несжимаемости жидкости следует, что установившееся распределение давления в жидкости подчиняется уравнению Лапласа:

$$\Delta p = 0, M \in B$$

Следовательно, установившиеся малые возмущения давления жидкости в цилиндре определяются как решение 2-й краевой задачи (задачи Неймана) для уравнения Лапласа, причем в условие (4) оно входит в виде краевого режима смещение мембраны, определяемое как решение 1-й краевой задачи для неоднородного уравнения (1).

Таким образом, полагая везде $u = u(M_2)e^{-i\omega t}$ и $J'_n(\tilde{\Gamma}_m^{(n)}) = 0$, можно считать, что малые возмущения давления жидкости в цилиндре определяются как решение следующей задачи:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\omega^2 u(M_2) = s^2 \Delta u(M_2) + f(M_2), M_2 \in D \\ u|_c = 0, \\ \Delta p(M) = 0, M \in B \\ \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=0} = \rho \omega^2 u(M_2), M_2 \in D \\ \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=h} = 0, \\ \frac{\partial p}{\partial n} \Big|_c = 0. \end{array} \right. \quad (8)$$

Волновые процессы в цилиндре произвольного сечения

Решение задачи (8) разбивается на решение двух задач. Сначала находится решение первой краевой задачи для неоднородного волнового уравнения. В результате получается выражение, описывающее установившиеся колебания мембраны произвольной формы:

$$u(M_2) = \iint_D f(N_2) G_u(M_2, N_2) dS_N \quad (9)$$

где dS_N означает, что интегрирование проводится по точкам N_2 поверхности мембраны, и введена функция Грина:

$$G_u(M_2, N_2) = \sum_n \frac{1}{\omega_n^2 - \omega^2} \frac{\psi_n(M_2) \psi_n(N_2)}{\|\psi_n\|^2} \quad (10)$$

где $\omega_n = s\sqrt{\lambda_n}$ – собственная частота колебаний мембраны,
 λ_n – собственные числа, а ψ_n – собственные функции мембраны, определяемые как собственные числа и собственные функции задачи Штурма-Лиувилля с условиями 1-ого рода

$$\Delta \psi_n(M_2) + \lambda_n \psi_n(M_2) = 0, M_2 \in D \quad (11)$$

$$\psi_n|_c = 0, M_2 \in C \quad (12)$$

Норма собственных функций задачи (11)–(12):

$$\|\psi_n\|^2 = \iint_D |\psi_n(N_2)|^2 dS_N$$

Здесь следует отметить, что резонансный случай, когда частота внешнего воздействия совпадает с одной из собственных частот колебаний мембраны, исключается из рассмотрения в рамках данной модели. Для снятия данного ограничения следует изначально рассматривать вязкую жидкость и использовать для моделирования уравнение Навье-Стокса, а не уравнение Эйлера.

Далее находится решение второй части задачи (8) для определения давления из уравнения Лапласа с неоднородным краевым условием на подвижной границе, куда подставляется уже найденное выражение для смещения мембраны (9). В результате полученное выражение можно записать в виде:

$$p(M) = \iint_D u(N_2) G_p(M_2, N_2, z) dS_N \quad (13)$$

где введена функция Грина:

$$G_p(M_2, N_2, z) = \sum_m \frac{\rho \omega^2 \operatorname{ch}(\sqrt{\tilde{\lambda}_m}(h-z))}{\sqrt{\tilde{\lambda}_m} \operatorname{sh}(\sqrt{\tilde{\lambda}_m} h)} \frac{\varphi_m(M_2) \varphi_m(N_2)}{\|\varphi_m\|^2} \quad (14)$$

где $\tilde{\lambda}_m$ – собственные числа,
а $\varphi_m(M_2)$ – собственные функции задачи Штурма-Лиувилля с условиями 2-го рода:

$$\Delta_2 \varphi_m(M_2) + \tilde{\lambda}_m \varphi_m(M_2) = 0, \quad M_2 \in D \quad (15)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi_m}{\partial n} \right|_C = 0, \quad M_2 \in C \quad (16)$$

Подставив (9) в (13), можно получить установившееся распределение давления в цилиндре произвольного сечения, возбуждаемое колебаниями мембраны под действием внешнего гармонического давления. Оно позволяет изучать зависимость распределения давления в цилиндре от частоты внешнего воздействия на мембрану. Для получения более конкретных результатов необходимо выбрать форму сечения трубы и вид внешнего воздействия.

Волновые процессы в круговом цилиндре

Рассмотрим особенности аналитической формы решений (9) и (13) для случая кругового цилиндра. Пусть мембрана представляет собой круг радиуса R , тогда удобно перейти в полярные координаты и область D будет иметь вид: $D = \{(r, \theta): 0 \leq r \leq R, 0 \leq \theta \leq 2\pi\} \subset R^2$.

В этом случае в функцию Грина (10) следует подставить собственные функции и собственные значения задачи Штурма-Лиувилля (11)–(12) для круга [3, 4]:

$$\begin{aligned} \psi_{mn}^{(1)}(r, \theta) &= J_n \left(\mu_m^{(n)} \frac{r}{R} \right) \cos n\theta, \\ \psi_{mn}^{(2)}(r, \theta) &= J_n \left(\mu_m^{(n)} \frac{r}{R} \right) \sin n\theta \end{aligned} \quad (17)$$

$$\lambda_{mn} = \left(\frac{\mu_m^{(n)}}{R} \right)^2, \quad n = 0, 1, 2, \dots, m = 1, 2, \quad (18)$$

где J_n – функции Бесселя n -го порядка, $\mu_m^{(n)}$ являются m -ми нулями функций Бесселя n -го порядка, то есть корнями уравнения:

$$J_n(\mu_m^{(n)}) = 0.$$

Частоты собственных колебаний круглой мембраны:

$$\omega_{mn} = s \sqrt{\lambda_{mn}}.$$

Норма собственных функций (17) имеет вид:

$$\|\Psi_{mn}^{(j)}\| = \frac{\pi R^2}{2} J_n'^2(\mu_m^{(n)}), \quad j = 1, 2, \quad (19)$$

где $j = 1$ соответствует собственным функциям с косинусами,
а $j = 2$ – с синусами. Подстановка в функцию Грина (10) выражений (17)–(19) приводит к тому, что она становится двухпарциальной:

Тогда решение (9) примет вид:

$$G_u(r, \theta, r', \theta') = \sum_m \sum_n \frac{1}{\omega_{mn}^2 - \omega^2} \left\{ \frac{\Psi_{mn}^{(1)}(r, \theta) \Psi_{mn}^{(1)}(r', \theta')}{\|\Psi_{mn}^{(1)}\|^2} + \frac{\Psi_{mn}^{(2)}(r, \theta) \Psi_{mn}^{(2)}(r', \theta')}{\|\Psi_{mn}^{(2)}\|^2} \right\} \quad (20)$$

Тогда решение (9) примет вид:

$$u(r, \theta) = \int_0^R \int_0^{2\pi} f(r, \theta) G_u(r, \theta, r', \theta') r' dr' d\theta' \quad (21)$$

Далее полученное выражение (21) используется для построения решения (13). В функции Грина (14) для круглой мембраны подставляются собственные функции задачи Штурма-Лиувилля с условиями 2-го рода:

$$\Phi_{mn}^{(1)}(r, \theta) = J_n \left(\tilde{\mu}_m^{(n)} \frac{r}{R} \right) \cos n\theta, \quad (22)$$

$$\Phi_{mn}^{(2)}(r, \theta) = J_n \left(\tilde{\mu}_m^{(n)} \frac{r}{R} \right) \sin n\theta \quad (23)$$

и $\tilde{\mu}_m^{(n)}$ – соответствующие собственные числа:

$$\tilde{\lambda}_{mn} = \left(\frac{\tilde{\mu}_m^{(n)}}{R} \right)^2, \quad n = 0, 1, 2, \dots, m = 1, 2, \quad (24)$$

величины $\tilde{\mu}_m^{(n)}$ являются m -ми нулями производных функций Бесселя n -ого порядка, то есть корнями уравнения: $J_n'(\tilde{\mu}_m^{(n)}) = 0$. Нормы собственных функций (22, 23):

$$\|\Phi_{mn}^{(j)}\| = \frac{\pi R^2}{2} (1 + \delta_{n0} \delta_{m0} \delta_{j1}) J_n^2(\tilde{\mu}_m^{(n)}), \quad j = 1, 2,$$

δ_{ik} символ Кронекера.

С учетом (23) и (24) решение (13) примет вид

$$p(r, \theta, z) = \int_0^R \int_0^{2\pi} u(r', \theta') G_p(r, \theta, r', \theta', z) r' dr' d\theta' \quad (25)$$

где функция Грина (14) становится двухпарциальной:

$$G_p(r, \theta, r', \theta', z) = \sum_m \frac{\rho \omega^2 \operatorname{ch}(\sqrt{\tilde{\lambda}_{mn}}(h-z))}{\sqrt{\tilde{\lambda}_{mn}} \operatorname{sh}(\sqrt{\tilde{\lambda}_{mn}}h)} \left\{ \frac{\varphi_{mn}^{(1)}(r, \theta) \varphi_{mn}^{(1)}(r', \theta')}{\|\varphi_{mn}^{(1)}\|^2} + \frac{\varphi_{mn}^{(2)}(r, \theta) \varphi_{mn}^{(2)}(r', \theta')}{\|\varphi_{mn}^{(2)}\|^2} \right\} \quad (26)$$

Выражению (25) можно придать вид:

$$p(r, \theta, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\tilde{u}_{mn}^{(1)} \cos n\theta + \tilde{u}_{mn}^{(2)} \sin n\theta}{\sqrt{\tilde{\lambda}_{mn}} \operatorname{sh}(\sqrt{\tilde{\lambda}_{mn}}h)} J_n\left(\tilde{\mu}_m^{(n)} \frac{r}{R}\right) \operatorname{ch}(\sqrt{\tilde{\lambda}_{mn}}(h-z)) \quad (27)$$

где введены коэффициенты Фурье:

$$\tilde{u}_{mn}^{(1)} = \frac{\rho \omega^2}{\|\varphi_{mn}^{(1)}\|^2} \int_0^R \int_0^{2\pi} u(r, \theta) \cos n\theta J_n\left(\tilde{\mu}_m^{(n)} \frac{r}{R}\right) r dr d\theta \quad (28)$$

$$\tilde{u}_{mn}^{(2)} = \frac{\rho \omega^2}{\|\varphi_{mn}^{(2)}\|^2} \int_0^R \int_0^{2\pi} u(r, \theta) \sin n\theta J_n\left(\tilde{\mu}_m^{(n)} \frac{r}{R}\right) r dr d\theta \quad (29)$$

Выражение (27) описывает распределение давления жидкости, созданного в круговом цилиндре под действием гармонических колебаний круглой мембраны на одном из его краев.

Волновые процессы в круговом цилиндре, возбуждаемые равномерным распределением внешнего гармонического воздействия на мембрану

Пусть на закрепленную в плоскости $z = 0$ мембрану по гармоническому закону действует с внешней стороны давление, равномерно распределенное по всей поверхности мембраны: $p = p_0 - \text{const}$.

Тогда, обозначив $f_0 = p_0/\rho_m$, получим, что отличными от нуля будут только слагаемые ряда Фурье с $n = 0$. Поэтому решение (21) принимает вид

$$u(r) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2f_0}{\mu_m^{(0)} J_1(\mu_m^{(0)}) (\omega_{m0}^2 - \omega^2)} J_0\left(\mu_m^{(0)} \frac{r}{R}\right) \quad (30)$$

Поскольку колебания мембраны (30) при равномерном воздействии не зависят от угловой переменной, то отличными от нуля будут только коэффициенты Фурье (28) и (29) с $n = 0$,

то есть $\tilde{u}_{mn}^{(1)} = 0, n = 1, 2, \dots, m = 1, 2, \dots,$

$$\tilde{u}_{mn}^{(2)} = 0, n = 0, 1, 2, \dots, m = 1, 2, \dots$$

Ненулевые коэффициенты Фурье (28) в этом случае будет иметь вид

$$\tilde{u}_{mn}^{(1)} = \frac{2\rho\omega^2}{R^2 J_0^2(\mu_m^{(0)})} \int_0^R u(r) J_0\left(\tilde{\mu}_m^{(0)} \frac{r}{R}\right) r dr. \quad (31)$$

Подстановка (31) в (27) приводит к выражению:

$$p(r, z) = \sum_{m=1}^{\infty} P_m(\omega) J_0\left(\tilde{\mu}_m^{(0)} \frac{r}{R}\right) \text{ch}(\sqrt{\tilde{\lambda}_{m0}}(h-z)) \quad (32)$$

где амплитуды давления:

$$P_m(\omega) = \frac{2\rho\omega^2}{R^2 \sqrt{\tilde{\lambda}_{m0}} \text{sh}(\sqrt{\tilde{\lambda}_{m0}} h) J_0^2(\mu_m^{(0)})} \int_0^R u(r) J_0\left(\tilde{\mu}_m^{(0)} \frac{r}{R}\right) r dr \quad (33)$$

Интегральная форма решения (32) будет иметь вид:

$$p(r, z) = \int_0^R u(r') G_p(r, r', z) r' dr' \quad (34)$$

где определена соответствующая функция Грина:

$$G_p(r, r', z) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2\rho\omega^2 \text{ch}(\sqrt{\tilde{\lambda}_{m0}}(h-z))}{R^2 \sqrt{\tilde{\lambda}_{m0}} \text{sh}(\sqrt{\tilde{\lambda}_{m0}} h) J_0^2(\mu_m^{(0)})} J_0\left(\tilde{\mu}_m^{(0)} \frac{r}{R}\right) J_0\left(\tilde{\mu}_m^{(0)} \frac{r'}{R}\right) \quad (35)$$

Таким образом, из полученных результатов следует, что в случае равномерного воздействия по всей площади мембраны потенциал, скорость, давление и плотность жидкости в звуковой волне не зависят от угловой переменной.

Результаты и их обсуждение

Для численного моделирования волновых процессов в рассматриваемой системе использовалась вычислительная система MatLab. Была составлена программа, в которой сначала рассчитывалась форма колеблющейся мембраны по формуле (30), а затем полученное распределение использовалось для вычисления возмущения давления жидкости по формуле (32). Учитывалось $N = 1000$ слагаемых. Решение строилось при следующих фиксированных значениях: плотность жидкости $\rho = 1002 \text{ кг/м}^3$, радиус мембраны $R = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, длина цилиндрической трубы $h = 30 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $p_0 = 10$, $s = 0,1$.

Из анализа полученных результатов численного моделирования следует, что в цилиндре возбуждаются затухающие колебания. Обнаружено, что при частотах внешнего воздействия, близких к $\omega = 50 \text{ Гц}$, наблюдается «резонанс» в виде узколокализованного резкого всплеска амплитуды. Стоячие волны в случае, когда один конец цилиндра закреплен, а на другом происходят вынужденные колебания мембраны его перекрывающей, не возникают. Данное обстоятельство обусловлено тем, что в рамках рассматриваемой модели

изучаются стационарные малые возмущения давления жидкости в цилиндре, возникающие под действием постоянной внешней распределенной силы как краевого режима. Стоячие звуковые волны могут возникать в цилиндре под действием гармонических колебаний мембраны, в рамках другой модели, подробно изложенной в [7].

Максимальная амплитуда возбуждаемых колебаний расположена вблизи основания цилиндра, в котором закреплена колеблющаяся в результате внешнего воздействия мембрана. Затухание волны, как правило, происходит достаточно быстро. Наличие затухания волны при отсутствии вязкости связано с тем, что все слагаемые функции Грина (14), не зависимо от формы сечения цилиндрической трубы, выражаются через монотонно убывающие функции вида $\text{ch}(\sqrt{\lambda_m}(h-z))$, которые стремятся к своему минимуму при $z \rightarrow h$. Физически такая ситуация обусловлена требованием того, чтобы на неподвижных стенках цилиндра, в том числе и на его втором конце, нормальные компоненты скорости равнялись нулю. Данное требование было исходным при формулировке рассматриваемой модели и выражалось математически выражениями (5–7). Поэтому возмущение давления в жидкости, создаваемое стационарными колебаниями мембраны на подвижном (первом) конце цилиндра, должны затухать при движении ко второму неподвижному концу цилиндра.

Предложенная модель в качестве обязательного элемента включает в себя взаимодействие механических смещений структур мембраны с жидкостью внутри цилиндрической трубы. Именно такое взаимодействие обеспечивает возникновение колебаний малых возмущений давления в жидкости. Анализ полученных результатов, показал, что колебания в системе, описываемой исходными уравнениями предложенной модели, действительно обладают качественными особенностями, характерными для физических свойств гидродинамических систем, которые могут возникать в различных технических компонентах и биологических системах. Следует отметить, что предложенная модель представляет собой некую гидродинамическую абстракцию, поэтому уравнения в ней скорее позволяют определить лишь класс систем, колебания в которых отвечают поставленным требованиям.

Заключение

В работе построена математическая модель возбуждения волн избыточного давления в заполненном жидкостью цилиндре под действием равномерно распределенной по поверхности мембраны гармонической силы. При гармоническом внешнем воздействии получено аналитическое выражение для распределения избыточного давления в цилиндре.

С целью упрощения моделирования предполагалось, что будут исключаться частоты внешнего воздействия, совпадающие с собственными частотами колебаний мембраны. Другими словами, в рамках данной модели резонансный случай не рассматривается. Для анализа резонансного случая, как отмечалось выше, следует формулировать модель для колебаний вязкой жидкости, что потребует использования уравнения Навье-Стокса, а не уравнение Эйлера, что, очевидно, приведет к усложнению модели. Однако, для анализа определенных эффектов на качественном уровне этого не требуется, например, в жидкостях с пренебрежительно малой вязкостью.

Проведено аналитическое и численное моделирование для случая постоянного равномерного воздействия внешней силы для трубы кругового сечения. Показано, что распределение давления является осесимметричным и затухание волны происходит достаточно быстро при удалении от края колеблющейся мембраны. Максимальная амплитуда возбуждаемых волн расположена вблизи мембраны.

Библиографический список

1. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. М.: Наука, 1986. 736 с.
2. Биркгоф Г. Гидродинамика / Г. Биркгоф. М.: Изд-во ин. лит, 1963. 244.
3. Боголюбов А.Н. Задачи по математической физике / А.Н. Боголюбов, В.В. Кравцов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 350 с.
4. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. М.: Изд-во МГУ, 1999. 798 с.
5. Савотченко С.Е. Вынужденные капиллярные волны в покрытом тонкой пленкой бассейне / С.Е. Савотченко // Известия высших учебных заведений. Физика. 2008. Т. 51. №3. С. 3–6.
6. Савотченко С.Е. Моделирование вынужденных внутренних капиллярных волн / С.Е. Савотченко // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 2. С. 87–90.
7. Савотченко С.Е. Резонансные особенности распространения вынужденных волн в жидкостях по трубам / С.Е. Савотченко, А.С. Горлов // Наука. Инновации. Технологии. 2017. №. 2. С. 63–72.

References

1. Landau L.D., Lifshic E.M. Teoreticheskaja fizika. T. VI. Gidrodinamika. (Theoretical physics. Vol. VI. Hydrodynamics). M.: Nauka, 1986. 736 p.
2. Birkhof G. Gidrodinamika (Hydrodynamics). M.: Izd-voin. lit, 1963. 244 p.
3. Bogoljubov A.N., Kravcov V.V. Zadachi po matematicheskoj fizike. (Problems in mathematical physics). M.: MGU, 1998. 350 p.
4. Tihonov A.N., Samarskij A.A. Uravnenija matematicheskoj fiziki (Mathematical physics equations). M.: MGU, 1999. 798 p.
5. Savotchenko S.E. Vynuzhdennye kapilljarnye volny v pokrytom tonkoj plenkoj bassejne. (Forced capillary waves in the pool covered with a thin film) I zvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika. 2008. Vol. 51. No. 3. Pp. 3-6.
6. Savotchenko S.E. Modelirovanie vynuzhdennyh vnutrennih kapilljarnyh voln. (Modeling of the forced internal capillary waves) Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2015. Vol. 11. №2. Pp. 87-90.
7. Savotchenko S.E. Nauka. Innfovacii. Tehnologii. 2017. №2. Pp. 63–72.

УДК 53.097

**Степкина М.Ю. [Stepkina M.Yu.],
Кудряшова О.Б. [Kudryashova O.B.],
Муравлев Е.В. [Muravlev E.V.]****ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
РАСПЫЛЕННЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ
МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ
С ЭЛЕКТРОНЕЙТРАЛЬНЫМИ
ЖИДКОФАЗНЫМИ И ТВЕРДОФАЗНЫМИ
АЭРОЗОЛЬНЫМИ СРЕДАМИ****Interaction sprayed of charge fine powders
with electroneutral liquid-phase and solid-phase
aerosol environments**

В работе рассмотрено взаимодействие твердофазного мелкодисперсного аэрозольного облака заряженных частиц, созданного посредством электростатического распылителя, с жидкофазными и твердофазными частицами аэрозоля, распыленными в воздухе импульсным и пневматическим способом соответственно. Каждый метод распыления позволяет формировать поток конденсированных частиц для моделирования реальных ситуаций образования вредных мелкодисперсных аэрозольных сред, возникающих при авариях на промышленности, чрезвычайных природных катаклизмах, террористических актах, проведении военных действий и т.п. Именно введение заряженных частиц в нейтральный поток вредного аэрозоля вызывает явление электростатической коагуляции, ускоряя процесс осаждения такого аэрозоля. С целью определения скорости осаждения за счёт возникновения эффекта электростатической коагуляции проведены экспериментальные исследования, позволяющие оценить изменение дисперсности и концентрации мелкодисперсных аэрозольных сред в замкнутом объеме. Для наблюдений за возникновением и развитием коагуляции в аэрозолях использовался лазерный измерительный комплекс ЛИД-2М. В установке ЛИД-2М реализована модификация оптического метода малоуглового рассеяния, связанная с решением серии прямых задач оптики аэрозолей в задаче о рассеянии лазерного луча дисперсной средой под малыми углами.

In work the interaction of a solid-phase fine aerosol cloud of charged particles atomized by means of the electrostatic spray with the liquid-phase and solid-phase weighed particles aerosol created in the pulse and pneumatic way is considered. Each method of dispersion allows to form a stream of the condensed particles for modeling real situations of formation of the harmful fine aerosol environments arising at accidents on the industry, extraordinary natural cataclysms, acts of terrorism, conducting military operations, etc. Introduction of charged particles to a neutral stream of a harmful aerosol causes the phenomenon of electrostatic coagulation, accelerating process sedimentation of such aerosol. For the purpose of determination of speed of sedimentation due to emergence of effect of electrostatic coagulation the pilot studies allowing to estimate change of dispersion and concentration of fine aerosol environments in the closed volume are conducted. Observation of emergence and development of coagulative processes in aerosols the laser measuring LID-2M complex was used. In the LID-2M installation the modification of an optical method of low-angle dispersion connected with the solution of a series of direct problems of optics of aerosols in a task about dispersion of a laser beam the disperse environment under small corners is realized.

Ключевые слова: дисперсность, относительная концентрация, распыление, осаждение, аэрозольные среды**Key words:** dispersion, relative concentration, dispersion, sedimentation, aerosol environments

Введение

На динамику движения частиц в замкнутом объеме существенное влияние оказывает процесс коагуляции. Частицы, налипая друг на друга, увеличиваются в размерах, и далее гораздо быстрее оседают под действием гравитационных сил. Процессы коагуляции широко распространены в природе, и их изучение представляет несомненный научный и практический интерес. С необходимостью рассмотрения этих процессов встречаются в различных областях науки и техники (например, в физической и химической кинетике, биофизике, астрономии, в химической технологии, при решении проблемы очистки от аэрозольных или коллоидных загрязнений и т.п. [1]). Особое значение коагуляция имеет для атмосферного аэрозоля, поскольку именно этот процесс является одним из основных физико-химических механизмов эволюции аэрозоля в атмосфере [2].

В контексте настоящей работы особый интерес представляет взаимодействие разноименно заряженных частиц или взаимодействие между нейтральными частицами и частицами с зарядом любого знака. Такое явление называют электростатической коагуляцией.

На процесс коагуляции влияют факторы двух видов. Первые обуславливают вероятность столкновения между частицами – это размер, распределение частиц по размерам, распределение электрического заряда частиц, температура и давление газа. Вторые факторы определяют, слипнутся ли они или диффундируют. К этим факторам относятся форма и структура частиц и адсорбционные свойства [3].

Цель настоящей работы заключается в экспериментальном исследовании изменения дисперсных характеристик и концентрации аэрозольных сред при электростатической коагуляции в зависимости от рода распыляемого вещества и способа распыления.

Методы исследования

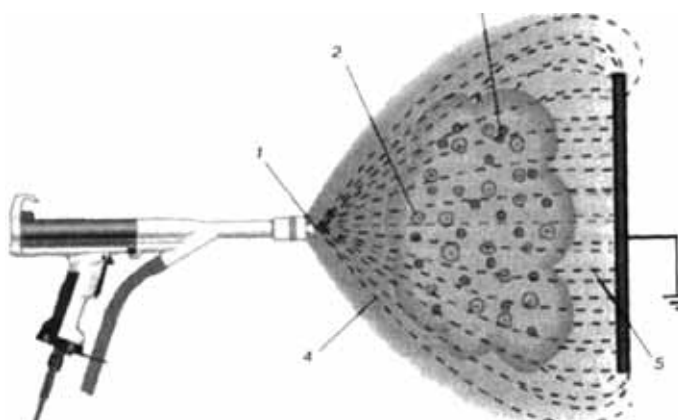
Рассмотрим подробнее электростатическую коагуляцию. Частицы с противоположными зарядами коагулируют быстрее, чем частицы без заряда, но нейтральные частицы имеют выше скорость коагуляции, чем одинаково заряженные. Анализируя экспериментальные константы (табл. 1) для различных типов аэрозолей при нормальных условиях исследований можно сделать вывод, что процесс коагуляции незначительно зависит от рода вещества [4]. Однако электростатическая коагуляция наиболее заметна при зарядении частиц с малым (до 10 Ом·м) и большим (более 20 Ом·м) удельным сопротивлением частиц [5].

При проведении экспериментальных исследований использовалось три способа распыления: электростатический, пневматический, импульсный.

Электростатический способ распыления позволяет создавать облако заряженных частиц вещества и свободных (неприсоединившихся) ионов

Таблица 1. ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА КОАГУЛЯЦИИ
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

Вещество	Константа коагуляции*10 ⁹ , см ³ /с
Хлорид аммония	0,60
Оксид железа	0,66
Оксид магния	0,83
Оксид кадмия	0,80
Стеариновая кислота	0,51



- 1 – электрод коронирующий;
- 2 – поток заряженных частиц вещества;
- 3 – ионы;
- 4 – создаваемое электрическое поле;
- 5 – силовые линии.

Рис. 1. Зарядка мелкодисперсных частиц в потоке коронного разряда.

(рис. 1) между распылителем и объектом. Совокупный заряд порошкообразных частиц и ионов, составляющих облако, образуют «пространственный заряд». При этом «пространственный заряд» формирует собственное электрическое поле, которое действует на аэрозольные частицы совместно с полем высоковольтного электрода и приводит к осаждению мелкодисперсных частиц порошка на заземленную подложку.

Пневматический способ распыления заключается в образовании аэрозоля при дроблении мелкодисперсных частиц порошка струей сжатого газа.

Организуется высокая скорость вылета частиц из отверстия и образуется густой туман аэрозоля. Такой способ более пригоден при моделировании твердофазных аэрозольных образований. При этом распыление порошка происходит в течение относительно долгого времени, например, несколько минут для нескольких десятков грамм [6].

Перспективным методом создания облака мелкодисперсного аэрозоля является импульсный (за счет энергии высокоэнергетических материалов (ВЭМ)). Такой метод обладает рядом преимуществ по сравнению с другими. Во-первых, дешевизна и простота реализации, во-вторых, малые габариты распылителей, что позволяет реализовывать импульсный метод диспергирования на разных объектах без предварительной сложной подготовки [7].

После распыления и в процессе дальнейшего осаждения аэрозолей в качестве показателя электростатической коагуляции выступает изменение дисперсных параметров и концентрации аэрозоля во времени (средний объемно-поверхностный диаметр частиц D_{32} и относительная массовая концентрация аэрозоля C_m). Для отображения данных характеристик в данной работе применялся модифицированный метод малоуглового рассеяния, основанный на нахождении функции распределения частиц по размерам путем решения серии прямых задач оптики аэрозолей [8]. Сущность метода заключается в определении спектра размеров аэрозольных частиц по измеренной малоугловой индикатрисе рассеяния путем перебора соответствующих параметров функции распределения. Данный метод позволяет определить дисперсность и концентрацию частиц аэрозоля в диапазоне размеров частиц от 1 до 100 мкм. Поэтому с помощью него определялись размеры только тех частиц, которые находятся в этом диапазоне [9]. Погрешность измерений данным методом составляет около 10 % в отсутствии нестационарных потоков частиц.

Результаты исследований и их обсуждение

Экспериментальные исследования проводились в измерительной камере объемом 1 м³. Внутри и за пределами камеры установлены (рис. 2): устройства электростатического распыления заряженных частиц (1), распыления электронейтрального твердофазного (2) и жидкофазного аэрозольного облака (3), оптический комплекс измерения дисперсности и концентрации частиц аэрозоля внутри камеры во времени. В качестве системы распыления жидкости в измерительном объеме камеры используется импульсный метод [6].

В качестве модельной жидкости для распыления импульсным способом были выбраны 18 %, 50 % и 70 %-ные растворы глицерина массой 3 мл. Средний объемно-поверхностный диаметр частиц полученного аэрозоля растворов глицерина составляет 20–25 мкм. Распространение аэрозоля в пространстве происходило в течение 1 минуты. Затем распылялся порошок талька, оксида алюминия или псевдобемита (гидроксида алюминия), в первом

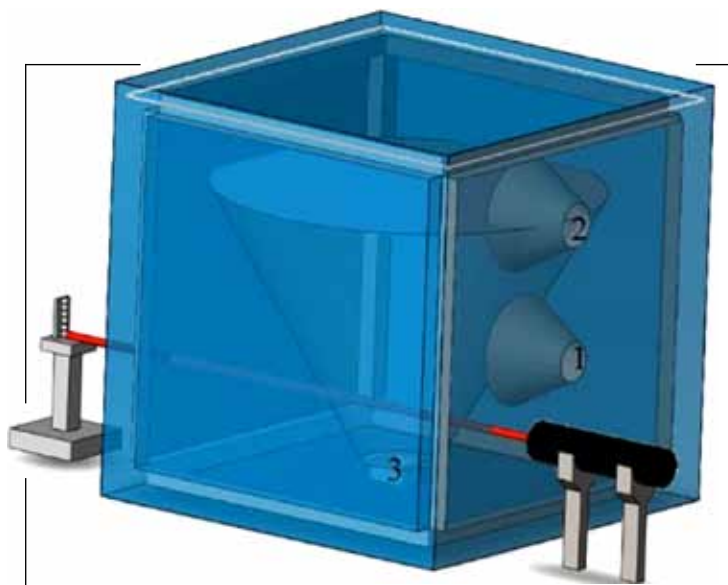


Рис. 2. Схема расположения приборов и устройств измерительной экспериментальной камеры.

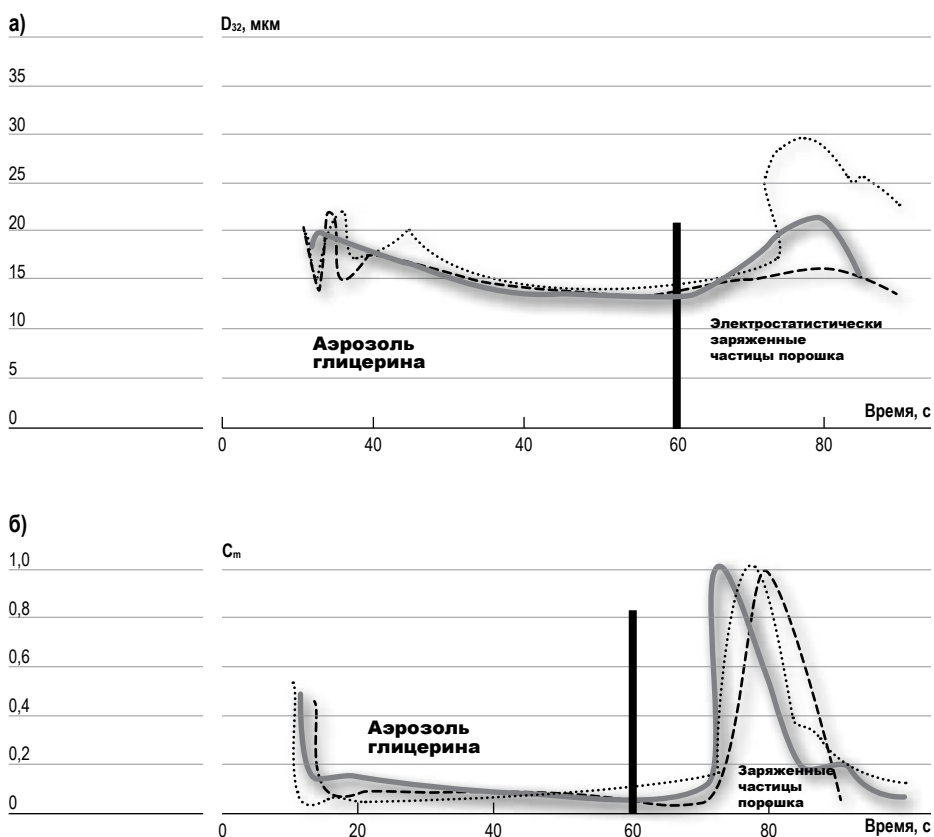


Рис. 3. Средний объемно-поверхностный диаметр D_{32} (а) и относительная концентрация C_m (б) частиц в зависимости от времени для талька, псевдобемита, оксида алюминия при взаимодействии с растворами глицерина.

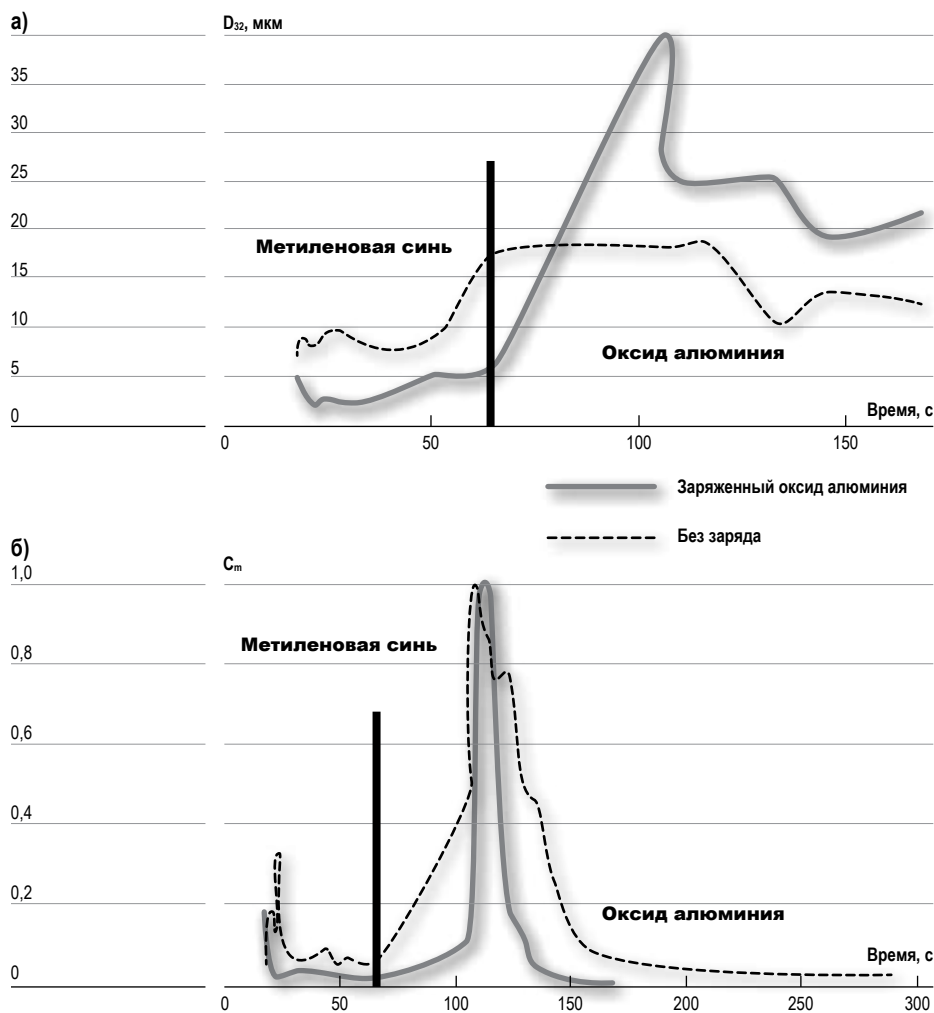


Рис. 4.

Средний объемно-поверхностный диаметр D_{32} (а) и относительная концентрация C_m (б) в зависимости от времени для электронейтральных частиц метиленовой сини и частиц оксида алюминия (заряженных и без заряда).

опыте масса талька – 50 граммов, во втором – масса псевдобемита – 28 граммов, в третьем – масса оксида алюминия составила 7 граммов. Время распыления составляло 20 секунд. Результаты экспериментальных измерений среднего объемно-поверхностного диаметра и концентрации частиц полученного аэрозоля представлены на рисунке 3.

Анализируя рисунок 3, можно сделать вывод, что характер изменения кривой среднего объемно-поверхностного диаметра частиц и относительной

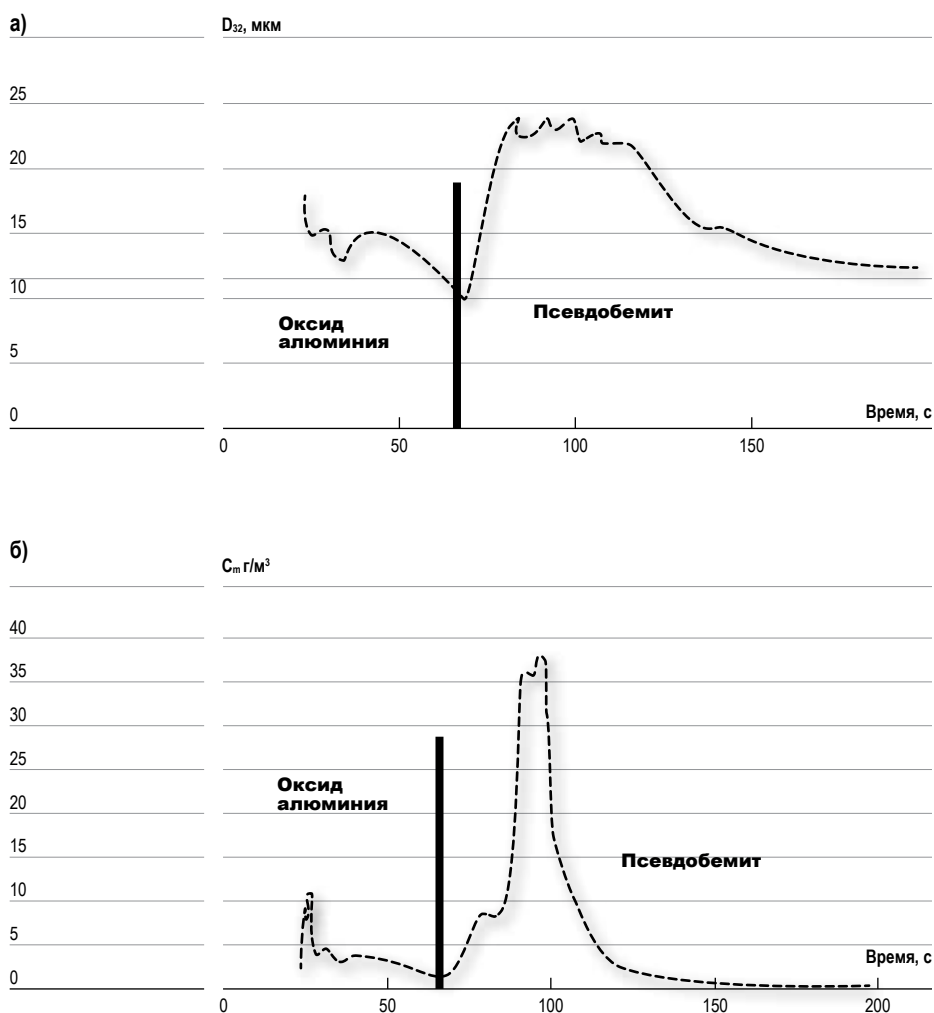


Рис. 5. Средний объемно-поверхностный диаметр частиц D_{32} (а) и относительная концентрация частиц C_m (б) в зависимости от времени для нейтральных частиц оксида алюминия и заряженных частиц псевдобемита.

концентрации носят идентичный характер для различных веществ, следовательно, коагуляционные процессы несущественно зависят от физико-химических свойств распыляемых частиц, что подтверждает ранее представленные выводы теоретического исследования.

Следующая серия экспериментов касалась взаимодействия твердофазных порошков – электронейтральных и заряженных. При этом моделировалась ситуация наличия в воздухе загрязняющего твердофазного аэрозоля и

его слипания с частицами заряженного, специально распыленного поглощающего вещества (сорбента). В качестве имитатора загрязняющего вещества взята метиленовая синь, в качестве сорбента – оксид алюминия.

Пневматическим способом в камере распылена масса 1,2 г метиленовой сини в течение 10 секунд, и затем, через 10 секунд, электростатическим способом распылена масса 20 граммов порошка оксида алюминия в течение 30 секунд (рис. 4). Результат измерений контрольных параметров, в которых распыление оксида алюминия происходило без зарядки, также представлен на рисунке 4.

Порошок метиленовой сини, распределённый в измерительном объеме камеры, в первые 30 секунд регистрации процесса имеет высокую дисперсность $D_{32} \approx 5$ мкм. После электростатического распыления сорбента, в момент времени около 60 секунд, образуется резкий скачок – до $D_{32} \approx 40$ мкм, обусловленный электростатической коагуляцией. В контрольном эксперименте с незаряженными частицами коагуляция не выражена. Уже после 150 секунд концентрация аэрозольных частиц (порошка метиленовой сини, оксида алюминия и их агломератов) в камере стремится к нулевому значению, если оксид алюминия распылялся электростатически. При распылении оксида алюминия без заряда концентрация частиц стремилась к нулю только после ~ 300 секунд наблюдения.

Можно отметить высокую скорость процесса осаждения аэрозольных частиц за время 50 секунд (рис. 5, б), поскольку без применения электрических полей подобный процесс осаждения занимает более 150 секунд [6].

Выводы

Таким образом, электростатическая коагуляция вносит значительный вклад в ускорение процессов осаждения как твердофазных, так и жидкофазных аэрозолей, вне зависимости от физико-химических свойств распыляемых конденсированных сред.

Применение электростатического распыления существенно увеличивает скорость осаждения веществ различной природы и позволяет в течение короткого времени осадить распыленный продукт на стенки измерительного объема.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант мол_а 16-38-00581).

Библиографический список

1. Эрнст М. Фракталы в физике // Тр. VI Междунар. симпозиума по фракталам в физике. М.: Мир, 1988. С. 399-429.
2. Довгальук Ю. А., Ивлев Л. С. Физика водных и других атмосферных аэрозолей. СПб.: СПбГУ, 1998.
3. Санаев Ю.И. Обеспыливание газов электрофильтрами. Семibratovo: Кондор-Эко, 2009.
4. Пискунов В. Н. Теоретические модели кинетики формирования аэрозолей: монография. Саратов: РFYЦ-ВНИИЭФ, 2000. 209 с.
5. Коровина Н. В. Распыление жидкости при импульсном воздействии / Н. В. Коровина, О. Б. Кудряшова, А. А. Антонникова, Б.И. Ворожцов // Известия вузов. Физика. 2013. № 9/3(56). С. 169-172.
6. Степкина М.Ю. Создание аэрозоля мелкодисперсных электростатически заряженных частиц и его применение в технологических процессах: дис ... канд. тех. наук. АлтГТУ: Бийск, 2016. 163 с.
7. Муравлев Е.В. Исследование процессов диспергирования компактированных порошков / Е.В. Муравлев, А.А. Павленко, И.Р. Ахмадеев, О.Б. Кудряшова, М.Ю. Степкина, Н.В. Коровина // Ползуновский Вестник. 2016. №4. Т. 1 С. 64-67.
8. Kudryashova O.B., Pavlenko A.A., Vorozhtsov B.I., Titov S.S., Arkhipov V.A., Bondarchuk S.S., Maksimenko E.A., Akhmadeev I.S., Muravlev E.V. Remote optical diagnostics of nonstationary aerosol media in a wide range of particle sizes. Photodetectors, Croatia: InTech, 2012. Pp. 341-364.
9. Кудряшова, О.Б. Распыление нанопорошков для адсорбции токсичных веществ / О.Б. Кудряшова, М.Ю. Степкина, Н.В. Коровина, А.А. Антонникова, Е.В. Муравлев, А.А. Павленко // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 4. С. 808-813.

References

1. Ernst M. Fraktaly v fizike // Tr. VI Mezhdunar. simpoziuma po fraktalam v fizike (Fractals in physics). M.: Mir, 1988. S. 399-429.
2. Dovgalyuk Yu. A., Ivlev L.S. Fizika vodnykh i drugikh atmosferynykh aerolei (Fizik of water and other atmospheric aerosols). SPb: SPbGU, 1998.
3. Sanaev Yu. I. Obespylivanie gazov elektrofil'trami (Dust removal of gases electric precipitators). Semibratovo: «Kondor-Eko», 2009.
4. Piskunov V. N. Teoreticheskie modeli kinetiki formirovanie aerolei: monografiya (Theoretical models of kinetics formation of aerosols). Saratov: RFYaTs-VNIIEF, 2000. 209 s.
5. Korovina N. V. Raspylenie zhidkosti pri impul'snom vozdeistvii (Dispersion of liquid at pulse influence) / N. V. Korovina, O. B. Kudryas-

- hova, A. A. Antonnikova, B. I. Vorozhtsov // *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2013. № 9/3(56). S. 169-172.
6. Stepkina M.Yu. Sozdanie aerolya melkodispersnykh elektrosticheski zaryazhennykh chastits i ego primenenie v tekhnologicheskikh protsessakh (Creation of an aerosol of fine electrostatic charged particles and its application in technological processes): dis ... kand. tekhn. nauk. AltGTU: Biisk, 2016. 163 s.
 7. Muravlev E.V. Issledovanie protsessov dispergirovaniya kompaktirovannykh poroshkov (A research of the processes of dispersing compacted powders) / Muravlev E.V., Pavlenko A.A., Akhmadeev I.R., Kudryashova O.B., M. Yu. Stepkina, Korovina N.V. // *Polzunovskii Vestnik*. 2016. №4. T. 1 S. 64-67.
 8. Kudryashova O.B., Pavlenko A.A., Vorozhtsov B.I., Titov S.S., Arkhipov V.A., Bondarchuk S.S., Maksimenko E.A., Akhmadeev I.S., Muravlev E.V. Remote optical diagnostics of nonstationary aerosol media in a wide range of particle sizes. *Photodetectors*, Croatia: InTech, 2012. Pp. 341-364.
 9. Kudryashova, O.B. Raspylenie nanoporoshkov dlya adsorbtsii toksichnykh veshchestv (Dispersion of nanopowders for adsorption of toxic substances) / O.B. Kudryashova, M.Yu. Stepkina, N.V. Korovina, A.A. Antonnikova, E.V. Muravlev, A.A. Pavlenko // *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2015. T. 88. № 4. S. 808-813.

УДК 517.95

Сурнева О.Б. [Surneva O.B.],
Яновская О.С. [Yanovskaya O.S.]

ПАРАБОЛИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ С ПОКАЗАТЕЛЬНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ КАК УСЛОВИЕ СОВМЕСТИМОСТИ ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ

**Parabolic equation with exponential nonlinearity
as the condition of joint venture linear system**

Рассматривается попытка построить $2 + 1$ – мерную нелинейную модель, являющуюся условием совместности системы двух линейных дифференциальных уравнений первого порядка. Полученное уравнение связано с операторной L , A – парой и уравнением Лакса, когда оператор L содержит дифференцирование только по одной переменной и параметрически зависит от двух дополнительных переменных, дифференцирование по которым входит в оператор A . Исследуется возможность приведения линейной части к параболическому виду, а также преобразования координат приводящих к показательной нелинейности. Полученное уравнение имеет прикладное значение, так как его можно отнести к моделям типа диффузионных цепочек Toda, основной особенностью которых является наличие у них нелинейностей экспоненциального типа. Такие уравнения описывают перенос пассивной примеси, например тепла в турбулентной среде с нелинейным турбулентным коэффициентом теплопроводности.

An attempt is made to construct a $2 + 1$ - dimensional nonlinear model that is a condition for the compatibility of a system of two first – order linear differential equations. The resulting equation is related to the operator L , A to the pair and the Lax equation, when the operator L contains differentiation with respect to only one variable and depends parametrically on two additional variables differentiation with respect to which enters into the operator A . We study the possibility of reducing the linear part to a parabolic form, and also transformation of coordinates leading to exponential nonlinearity. The resulting equation has an applied value, since it can be attributed to Toda-type diffusion chain models, the main feature of which is the presence of nonlinearities of exponential type in them. Such equations describe the transfer of a passive impurity, for example, heat in a turbulent medium with a nonlinear turbulent thermal conductivity coefficient.

Ключевые слова: солитон, уравнение Лакса, оператор, нелинейное уравнение, пара Лакса, уравнение в частных производных.

Key words: soliton, Lax equation, operator, nonlinear equation, Lax pair, partial differential equation.

Введение

Большинство известных интегрируемых нелинейных моделей описывают поведение функций, зависящих от двух пространственно-временных переменных. В настоящее время большое развитие получила математическая теория, связанная с солитонами. С момента создания теории солитонов, при построении нелинейных уравнений в частных производных, часто используется операторная структура изоспектральной деформации или, как ее еще называют, уравнение Лакса

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

которая при некоторых условиях эквивалентна условию совместности линейной системы

$$L\phi = \lambda\phi, \quad \phi_t = -A\phi, \quad (2)$$

где L, A – дифференциальные операторы со специальными свойствами,
 λ – собственное значение оператора L , $\phi(x, t, \lambda)$ – собственная функция оператора L .

Теория солитонов породила теорию интегрируемых систем, получившую большое развитие. Попытка распространить эту теорию на $2+1$, $3+1$ -мерную ситуацию в последнее время привела к заметным успехам. Некоторые примеры были описаны в работах О.И. Богоявленского [1], Саянук В.И. [2] и другими [3–6].

Интересные результаты можно получить если оператор L параметрически зависит от дополнительных переменных, дифференцирование по которым входит в оператор A , но не входит в оператор L [1].

Материалы и методы исследований

Продemonстрируем возможность построения $2+1$ -мерного дифференциального уравнения в частных производных из операторного уравнения Лакса (1). Будем рассматривать класс функций, зависящих от трех переменных, оператор L задает дифференцирование только по переменной x и параметрически зависит от дополнительной переменной y , дифференцирование по которой входит в оператор A . Следует ожидать, что собственные числа λ уже не являются постоянными, а представляют функции $\lambda(y)$. В силу этого с течением времени возможна их многозначность. Как, например [1], двумерное взаимодействие волны Римана, распространяющейся по оси y , с длинными волнами, распространяющимися по оси x . В некотором приближении такое явление наблюдается в волнах на поверхности моря, а так же при возникновении ударной волны.

ЛЕММА. Для того чтобы коммутатор $[L, A]$ двух операторов вида

$$L = a_0 \frac{\partial}{\partial x} + U \quad (3)$$

$$A = \beta_0 \frac{\partial}{\partial x} + \gamma_0 \frac{\partial}{\partial y} + V, \quad (4)$$

где
$$a_0 = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ \alpha & -\alpha \end{pmatrix}, \quad \beta_0 = \begin{pmatrix} 2\alpha k + \beta & 0 \\ ak & \beta \end{pmatrix}, \quad \gamma_0 = \begin{pmatrix} \gamma & 0 \\ 0 & \gamma \end{pmatrix} -$$

постоянные матрицы, $\alpha, \alpha, \beta, \gamma$

k – произвольные постоянные,

$U = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{pmatrix}$, $V = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} \\ v_{21} & v_{22} \end{pmatrix}$ – функциональные матрицы,

$v_{ij}(x, y, t)$, $u_{ij}(x, y, t)$ ($i, j = 1, 2$) – произвольные функции трех переменных x , y и t , не содержащих операторов дифференцирования

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}, \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}, \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y},$$

необходимо и достаточно, чтобы функции v_{12} , v_{21} удовлетворяли следующим равенствам

$$v_{12} = ku_{12}, \quad v_{21} = ku_{21} + \frac{a}{2\alpha}(v_{11} + ku_{22} - v_{22} - ku_{11}). \quad (5)$$

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО

Покажем, что такой выбор операторов обуславливает равенство нулю коэффициентов при дифференциалах

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}, \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}, \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}. \text{ Раскроем коммутатор}$$

$$\begin{aligned} [L, A] &= LA - AL = \left(a_0 \frac{\partial}{\partial x} + U\right) \left(\beta_0 \frac{\partial}{\partial x} + \gamma_0 \frac{\partial}{\partial y} + V\right) - \left(\beta_0 \frac{\partial}{\partial x} + \gamma_0 \frac{\partial}{\partial y} + V\right) \left(a_0 \frac{\partial}{\partial x} + U\right) = \\ &= (a_0 \beta_0 - \beta_0 a_0) \frac{\partial^2}{\partial x^2} + (a_0 \gamma_0 - \gamma_0 a_0) \frac{\partial^2}{\partial y \partial x} + (a_0 V - V a_0 + U \beta_0 - \beta_0 U) \frac{\partial}{\partial x} + a_0 \frac{\partial V}{\partial x} + \\ &+ (U \gamma_0 - \gamma_0 U) \frac{\partial}{\partial y} + UV - \beta_0 \frac{\partial U}{\partial x} - \gamma_0 \frac{\partial U}{\partial y} - VU. \end{aligned}$$

Очевидно, надо проверить вид коммутационных связей при операторах дифференцирования

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2}: a_0 \beta_0 - \beta_0 a_0 &= \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ a & -\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2\alpha k + \beta & 0 \\ ak & \beta \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2\alpha k + \beta & 0 \\ ak & \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ a & -\alpha \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \alpha[2\alpha k + \beta] & 0 \\ a[2\alpha k + \beta] - \alpha ak & -\alpha\beta \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} [2\alpha k + \beta]\alpha & 0 \\ ak\alpha + \beta a & -\beta\alpha \end{pmatrix} = 0. \end{aligned}$$

Так как матрица γ_0 – диагональная, то выражения

$$\frac{\partial^2}{\partial y \partial x}: a_0 \gamma_0 - \gamma_0 a_0 = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial y}: U \gamma_0 - \gamma_0 U = 0$$

Осталось проверить только коэффициент при $\frac{\partial}{\partial x}$, для этого найдем

$$a_0 V - V a_0 = \begin{pmatrix} -av_{12} & 2\alpha v_{12} \\ av_{11} - 2\alpha v_{21} - av_{22} & av_{12} \end{pmatrix},$$

$$U \beta_0 - \beta_0 U = \begin{pmatrix} aku_{12} & -2\alpha ku_{12} \\ 2\alpha ku_{21} + aku_{22} - aku_{11} & -aku_{12} \end{pmatrix},$$

тогда коэффициент $(a_0 V - V a_0 + U \beta_0 - \beta_0 U)$ будет равен нулю при условии что выполняется (5).

Обратное утверждение доказывается простой проверкой.

ТЕОРЕМА 1. Уравнение на функцию $u(x, y, t)$

$$\alpha q_x + \frac{\alpha^2 k}{2} (\ln u)_{xx} - \frac{\gamma^2}{2k} (\ln u)_{yy} = \frac{a}{2\alpha} (u_z + \gamma u_y) + \frac{\gamma}{2k} (\ln u)_{yz} - \frac{\alpha}{2} (\ln u)_{xz} \quad (6)$$

обладает парой Лакса с операторами L и A вида

$$L = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ a & -\alpha \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} + \begin{pmatrix} \frac{\gamma}{2k} (\ln u)_y - \frac{\alpha}{2} (\ln u)_x & u \\ \frac{a^2}{4\alpha^2} u + \frac{\gamma a}{2\alpha k} (\ln u)_y & -\frac{\gamma}{2k} (\ln u)_y - \frac{\alpha}{2} (\ln u)_x \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$A = \begin{pmatrix} 2\alpha k + \beta & 0 \\ ak & \beta \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} + \begin{pmatrix} \gamma & 0 \\ 0 & \gamma \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial y} + \begin{pmatrix} q & ku \\ \frac{a^2 k}{4\alpha^2} u - \frac{a}{2\alpha} (\ln u)_z & q + (\ln u)_z \end{pmatrix}. \quad (8)$$

где оператор $(\alpha k + \beta) \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}$, $q(x, y, t)$ – произвольная функция, $\alpha, \beta, \gamma, k, a$ – произвольные параметры.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО

Рассмотрим частный случай, когда оператор L не содержит дифференцирования по y и имеет ту же структуру, которая использовалась в лемме. Запишем уравнение на собственные значения $L\varphi = \lambda\varphi$, где $\lambda(y)$ параметрически зависит от y , но не зависит от t , и уравнение, описывающее динамику вектор-функции $\varphi(x, y, t, \lambda) = (\varphi_1(x, y, t, \lambda), \varphi_2(x, y, t, \lambda))^T$ (Т – означает транспонирование) $\varphi_t = -A\varphi$. Распишем уравнения с учетом структуры операторов

$$\left(a_0 \frac{\partial}{\partial x} + U \right) \varphi = \lambda \varphi, \quad a_0 \varphi_x = \lambda \varphi - U \varphi,$$

$$\varphi_t = - \left(\beta_0 \frac{\partial}{\partial x} + \gamma_0 \frac{\partial}{\partial y} + V \right) \varphi \quad \text{или} \quad \varphi_t = -\beta_0 \varphi_x - \gamma_0 \varphi_y - V \varphi.$$

Продифференцируем первое равенство по t

$$a_0\varphi_{xt} = \lambda\varphi_t - U_t\varphi - U\varphi_t,$$

и подставим значения φ_i из второго равенства системы

$$a_0[\beta_0\varphi_x + \gamma_0\varphi_y + V\varphi]_x - \lambda[\beta_0\varphi_x + \gamma_0\varphi_y + V\varphi] - U_t\varphi + U[\beta_0\varphi_x + \gamma_0\varphi_y + V\varphi] = 0.$$

Так как $\lambda\varphi = a_0\varphi_x + U\varphi$, $\lambda\varphi_x = a_0\varphi_{xx} + U_x\varphi + U\varphi_x$, $\lambda\varphi_y = a_0\varphi_{xy} + U_y\varphi + U\varphi_y$, то выполняя подстановку этих значений можно избавиться от параметра λ :

$$a_0[\beta_0\varphi_x + \gamma_0\varphi_y + V\varphi]_x - \beta_0[a_0\varphi_{xx} + U_x\varphi + U\varphi_x] - \gamma_0[a_0\varphi_{xy} + U_y\varphi + U\varphi_y] - \\ - V[a_0\varphi_x + U\varphi] - U_t\varphi + U[\beta_0\varphi_x + \gamma_0\varphi_y + V\varphi] = 0,$$

сгруппируем элементы с φ_{xx} , φ_{xy} , φ_x , φ_y

$$[a_0\beta_0 - \beta_0a_0]\varphi_{xx} + [a_0\gamma_0 - \gamma_0a_0]\varphi_{xy} + [a_0V - Va_0 - \beta_0U + U\beta_0]\varphi_x + [U\gamma_0 - \gamma_0U]\varphi_y + \\ + [a_0V_x - \beta_0U_x - \gamma_0U_y - VU - U_t + UV]\varphi = 0,$$

в силу выполнения выше сформулированной леммы, остается уравнение

$$a_0V_x - \beta_0U_x - \gamma_0U_y - VU + UV = U_t. \quad (9)$$

Распишем матричное уравнение (9) на систему, используя равенства (5)

$$u_{11t} = \frac{a}{2\alpha}u_{12}(v_{11} + ku_{22} - v_{22} - ku_{11}) + \alpha v_{11x} - (2\alpha k + \beta)u_{11x} - \gamma u_{11y}, \quad (10)$$

$$(\ln u_{12})_t = ku_{11} + v_{22} - v_{11} - ku_{22} - (\alpha k + \beta)(\ln u_{12})_x - \gamma(\ln u_{12})_y, \quad (11)$$

$$u_{21t} = (v_{11} - v_{22} + ku_{22} - ku_{11})\left[u_{21} + \frac{a}{2\alpha}(u_{22} - u_{11})\right] - (\alpha k + \beta)u_{21x} + \\ + \frac{a}{2}(v_{11x} - ku_{22x} + v_{22x} - ku_{11x}) - \gamma u_{21y}, \quad (12)$$

$$u_{22t} = -u_{12}\frac{a}{2\alpha}(v_{11} + ku_{22} - v_{22} - ku_{11}) - \alpha v_{22x} - \beta u_{22x} - \gamma u_{22y}, \quad (13)$$

Полученная система имеет большое число свобод, поэтому с учетом равенства (11) определим дополнительные условия так чтобы

$$v_{11} + (\ln u_{12})_t + (\alpha k + \beta)(\ln u_{12})_x = v_{22}, \quad (14)$$

$$\frac{\gamma}{k}(\ln u_{12})_y + u_{22} = u_{11}. \quad (15)$$

Подставим найденные значения в оставшуюся систему (10), (12), (13)

$$\begin{aligned} \frac{\gamma}{k}(\ln u_{12})_{yt} + u_{22t} = & -\frac{a}{2\alpha}u_{12}((\ln u_{12})_t + (\alpha k + \beta)(\ln u_{12})_x + \gamma(\ln u_{12})_y) + \alpha v_{11x} - \\ & -(2\alpha k + \beta)\left[\frac{\gamma}{k}(\ln u_{12})_{yx} + u_{22x}\right] - \frac{\gamma^2}{k}(\ln u_{12})_{yy} - \gamma u_{22y}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} u_{21t} = & -((\ln u_{12})_t + (\alpha k + \beta)(\ln u_{12})_x + \gamma(\ln u_{12})_y)\left[u_{21} - \frac{\gamma}{k}\frac{a}{2\alpha}(\ln u_{12})_y\right] - \\ & -(\alpha k + \beta)u_{21x} + \frac{a}{2}(2v_{11x} - 2ku_{22x} + (\ln u_{12})_{xt} + (\alpha k + \beta)(\ln u_{12})_{xx} - \\ & - \gamma(\ln u_{12})_{yx}) - \gamma u_{21y}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} u_{22t} = & u_{12}\frac{a}{2\alpha}((\ln u_{12})_t + (\alpha k + \beta)(\ln u_{12})_x + \gamma(\ln u_{12})_y) - \\ & -\alpha\{v_{11} + (\ln u_{12})_t + (\alpha k + \beta)(\ln u_{12})_x\}_x - \beta u_{22x} - \gamma u_{22y} \end{aligned} \quad (18)$$

Найдем сумму (16) и (18) и выделим полные производные:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\gamma}{k}(\ln u_{12})_y + 2u_{22} + \alpha(\ln u_{12})_x\right]_t + \gamma\left[\frac{\gamma}{k}(\ln u_{12})_y + 2u_{22} + \alpha(\ln u_{12})_x\right]_y + \\ & + (\alpha k + \beta)\left[\frac{\gamma}{k}(\ln u_{12})_y + 2u_{22} + \alpha(\ln u_{12})_x\right]_x = 0, \end{aligned}$$

что позволяет определить ранее неизвестную функцию u_{22}

$$u_{22} = -\frac{\gamma}{2k}(\ln u_{12})_y - \frac{\alpha}{2}(\ln u_{12})_x. \quad (19)$$

Выразим $v_{11x} - ku_{22}$ из (18)

$$\begin{aligned} v_{11x} - ku_{22x} = & \frac{a}{2\alpha^2}[u_{12t} + (\alpha k + \beta)u_{12x} + \gamma u_{12y}] - (\ln u_{12})_{xt} - (\alpha k + \beta)(\ln u_{12})_{xx} - \\ & - \frac{1}{\alpha}[u_{22t} + (\beta + \alpha k)u_{22x} + \gamma u_{22y}]. \end{aligned}$$

и выполним подстановку найденной функции (19)

$$\begin{aligned} v_{11x} - ku_{22x} = & \frac{a}{2\alpha^2}[u_{12t} + (\alpha k + \beta)u_{12x} + \gamma u_{12y}] - \frac{1}{2}(\ln u_{12})_{xt} - \\ & - \frac{1}{2}(\alpha k + \beta)(\ln u_{12})_{xx} + \frac{\gamma}{2\alpha k}[(\ln u_{12})_t + (\beta + 2\alpha k)(\ln u_{12})_x + \gamma(\ln u_{12})_y]_y. \end{aligned} \quad (20)$$

Найденное соотношение (20) подставим в (17) и умножим

все члены на u_{12}

$$\begin{aligned} u_{12}u_{21t} = & -(u_{12t} + (\alpha k + \beta)u_{12x} + \gamma u_{12y})\left[u_{21} - \frac{\gamma}{k}\frac{a}{2\alpha}(\ln u_{12})_y\right] + \\ & + \frac{a^2u_{12}}{2\alpha^2}[u_{12t} + (\alpha k + \beta)u_{12x} + \gamma u_{12y}] + \frac{\gamma au_{12}}{2\alpha k}[(\ln u_{12})_t + (\beta + \alpha k)(\ln u_{12})_x + \end{aligned}$$

$$+ \gamma (\ln u_{12})_y] - (\alpha k + \beta) u_{12} u_{21x} - \gamma u_{12} u_{21y}.$$

Тогда выделяя полные производные, имеем

$$\left(\partial_t + (\alpha k + \beta) \partial_x + \gamma \partial_y \right) \left[u_{12} u_{21} - \frac{a^2}{4\alpha^2} u_{12}^2 - \frac{a\gamma}{2\alpha k} u_{12y} \right] = 0,$$

в результате можно найти функцию u_{21}

$$u_{21} = \frac{a^2}{4\alpha^2} u_{12} + \frac{a\gamma}{2\alpha k} (\ln u_{12})_y \quad (21)$$

И так, в ходе преобразований системы (16–18) из (17) найдена функция u_{21} , а из (18) u_{22} , поэтому осталось единственное уравнение (16), связывающее две функции $u_{12} = u(x, y, t)$ и $v_{11} = q(x, y, t)$

$$\begin{aligned} \frac{ak}{\alpha} \left(\partial_t + (\alpha k + \beta) \partial_x + \gamma \partial_y \right) u_{12} = \\ = 2\alpha k q_x + \left(\partial_t + (2\alpha k + \beta) \partial_x + \gamma \partial_y \right) [k\alpha (\ln u_{12})_x - \gamma (\ln u_{12})_y]. \end{aligned} \quad (22)$$

Для получения явного вида пары Лакса, соответствующей форме (3), (4) необходимо выполнить подстановку найденных значений функций (5), (14), (15), (19), (21), что дает:

$$\begin{aligned} v_{11} &= q(x, y, t), \quad u_{12} = u(x, y, t), \quad v_{22} = q + (\ln u)_t + (\alpha k + \beta) (\ln u)_x, \\ v_{12} &= ku, \quad v_{21} = \frac{a^2 k}{4\alpha^2} u - \frac{a}{2\alpha} ((\ln u)_t + (\alpha k + \beta) (\ln u)_x), \\ u_{21} &= \frac{a^2}{4\alpha^2} u + \frac{a\gamma}{2\alpha k} (\ln u)_y, \quad u_{11} = \frac{\gamma}{2k} (\ln u)_y - \frac{\alpha}{2} (\ln u)_x, \quad u_{22} = -\frac{\gamma}{2k} (\ln u)_y - \frac{\alpha}{2} (\ln u)_x. \end{aligned} \quad (23)$$

В результате получен вид матриц U, V операторов Лакса (7), (8), указанных в теореме 1.

Для компактности записи будем использовать комбинированную переменную так, что $(\alpha k + \beta) \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}$, уравнение (22) преобразуется к виду:

$$\alpha q_x + \frac{\alpha^2 k}{2} (\ln u)_{xx} - \frac{\gamma^2}{2k} (\ln u)_{yy} = \frac{a}{2\alpha} (u_z + \gamma u_y) + \frac{\gamma}{2k} (\ln u)_{yz} - \frac{\alpha}{2} (\ln u)_{xz}. \quad (24)$$

Если в (22) выделить комбинированную производную $(\alpha k + \beta) \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} + \gamma \frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial r}$, то равенство (22), сохраняя при этом зависимость от трех переменных, примет вид:

$$\frac{ak}{\alpha} u_{12r} = 2\alpha k v q_x + (\partial_r + \alpha k \partial_x) [k\alpha (\ln u_{12})_x - \gamma (\ln u_{12})_y]. \quad (25)$$

Полученное уравнение в частных производных имеет вид локального

закона сохранения, при этом функция $q(x, y, t)$ является произвольной и может описывать некоторое внешнее возмущение. В последующих исследованиях будем считать произвольную функцию $q(x, y, t) = 0$, тогда уравнение (24) примет вид

$$\alpha^2 k (\ln u)_{xx} - \frac{\gamma^2}{k} (\ln u)_{yy} - \frac{\gamma}{k} (\ln u)_{yz} + \alpha (\ln u)_{xz} = \frac{a}{\alpha} (u_z + \gamma u_y). \quad (26)$$

Очевидно, имеет место следующее

СЛЕДСТВИЕ 1.

Уравнение (26) обладает парой Лакса с операторами L и A вида:

$$L = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ a & -\alpha \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} + \begin{pmatrix} \frac{\gamma}{2k} (\ln u)_y - \frac{\alpha}{2} (\ln u)_x & u \\ \frac{a^2}{4\alpha^2} u + \frac{\gamma a}{2\alpha k} (\ln u)_y & -\frac{\gamma}{2k} (\ln u)_y - \frac{\alpha}{2} (\ln u)_x \end{pmatrix}, \quad (27)$$

$$A = \begin{pmatrix} 2\alpha k + \beta & 0 \\ ak & \beta \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} + \begin{pmatrix} \gamma & 0 \\ 0 & \gamma \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial y} + \begin{pmatrix} 0 & ku \\ \frac{a^2 k}{4\alpha^2} u - \frac{a}{2\alpha} (\ln u)_z & (\ln u)_z \end{pmatrix}. \quad (28)$$

где $(\alpha k + \beta) \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}$, $\alpha, \beta, \gamma, k, a$ – произвольные параметры.

СЛЕДСТВИЕ 2.

Уравнение на функцию $v(x, y, t)$

$$\alpha^2 k v_{xx} + \alpha v_{xt} - \frac{\gamma^2}{k} v_{yy} - \frac{\gamma}{k} v_{yt} = \frac{a}{\alpha} e^v (v_t + \gamma v_y) \quad (29)$$

обладает парой Лакса с операторами L и A вида

$$L = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ a & -\alpha \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} + \begin{pmatrix} \frac{\gamma}{2k} v_y - \frac{\alpha}{2} v_x & e^v \\ \frac{a^2}{4\alpha^2} e^v + \frac{\gamma a}{2\alpha k} v_y & -\frac{\gamma}{2k} v_y - \frac{\alpha}{2} v_x \end{pmatrix}, \quad (30)$$

$$A = k \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ a & -\alpha \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} + \begin{pmatrix} \gamma & 0 \\ 0 & \gamma \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial y} + \begin{pmatrix} 0 & ke^v \\ \frac{a^2 k}{4\alpha^2} e^v - \frac{a}{2\alpha} v_t & v_t \end{pmatrix}, \quad (31)$$

где α, γ, k, a – произвольные параметры.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО.

Для получения нужного вида операторов достаточно в (26), (27) и (28) выполнить замену $\ln u(x, y, t) = v(x, y, t)$, где $v(x, y, t)$ – новая неизвестная функция, и положить параметр $\beta = -ak$. В результате компоненты матриц преобразуются к виду:

$$u_{11} = \frac{\gamma}{2k} v_y - \frac{\alpha}{2} v_x, \quad u_{12} = e^v, \quad u_{21} = \frac{a^2}{4\alpha^2} e^v + \frac{a\gamma}{2\alpha k} v_y, \quad u_{22} = -\frac{\gamma}{2k} v_y - \frac{\alpha}{2} v_x,$$

$$v_{11} = 0, \quad v_{22} = v_t, \quad v_{12} = k e^v, \quad v_{21} = \frac{a^2 k}{4\alpha^2} e^v - \frac{a}{2\alpha} v_t,$$

т. е. получим вид (30) и (31).

Результаты исследований и их обсуждение

Полученное нелинейное уравнение (29) имеет линейную часть, содержащую как вторые так и смешанные производные. Выполним замену переменных так чтобы остались только вторые производные.

ТЕОРЕМА 2.

Уравнение (29), при $k > 0$, $\alpha, \gamma, a \in \mathbb{R}$ сводится к параболическому квазилинейному уравнению вида

$$v_{\chi\chi} - v_{\varsigma\varsigma} = \frac{ak}{\alpha\gamma^2} e^v (\gamma v_{\varsigma} + v_t), \quad (32)$$

где $v = v(\chi, \varsigma, t)$ – неизвестная функция трех переменных,

$$\chi = \pm \frac{\gamma}{\alpha k} x, \quad \varsigma = y, \quad t = -\frac{1}{\alpha k} x - \frac{1}{\gamma} y + 2t. \quad (33)$$

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО 1.

Использование квадратичных форм. Рассмотрим левую часть уравнения (29). Ей соответствует квадратичная форма вида

$$Q = \frac{\alpha^2 k}{2} \lambda_1^2 + \frac{\alpha}{2} \lambda_1 \lambda_3 - \frac{\gamma^2}{2k} \lambda_2^2 - \frac{\gamma}{2k} \lambda_2 \lambda_3 \quad (34)$$

Методом Лагранжа приведем квадратичную форму (34) к каноническому виду $Q = \mu_1^2 + \mu_2^2 + \mu_3^2$, где $\mu_1 = m_1 \lambda_1 + n_1 \lambda_2 + p_1 \lambda_3$, $\mu_2 = m_2 \lambda_1 + n_2 \lambda_2 + p_2 \lambda_3$, $\mu_3 = p_3 \lambda_3$, тогда

$$Q = m_1^2 \lambda_1^2 - n_2^2 \lambda_2^2 - 2n_2 p_2 \lambda_2 \lambda_3 + 2m_1 p_1 \lambda_1 \lambda_3 - (p_1^2 - p_2^2 - p_3^2) \lambda_3^2. \quad (35)$$

Для того чтобы квадратичная форма (35) имела такую же структуру, как и левая часть уравнения (29), необходимо, чтобы соблюдалось условие $p_1^2 - p_2^2 - p_3^2 = 0$, или $p_3^2 = p_1^2 - p_2^2$, тогда (35) после выполнения элементарных преобразований, примет вид

$$Q = m_1^2 \lambda_1^2 - n_2^2 \lambda_2^2 - 2n_2 p_2 \lambda_2 \lambda_3 + 2m_1 p_1 \lambda_1 \lambda_3 \quad (36)$$

Сравнивая коэффициенты при $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ в формулах (34) и (36), получим:

$$m_1 = \frac{\alpha\sqrt{k}}{\sqrt{2}}, n_2 = \frac{\gamma}{\sqrt{2k}}, p_1 = \frac{\sqrt{2}}{4\sqrt{k}}, p_2 = \frac{\sqrt{2k}}{4k}, \quad (37)$$

где $p_3^2 = p_1^2 - p_2^2 = 0$, а равенство (35) принимает вид

$$Q = \left(\frac{\alpha\sqrt{k}}{\sqrt{2}} \lambda_1 + \frac{\sqrt{2}}{4\sqrt{k}} \lambda_3 \right)^2 - \left(\frac{\gamma}{\sqrt{2k}} \lambda_2 + \frac{\sqrt{2k}}{4k} \lambda_3 \right)^2. \quad (38)$$

Для построения матрицы невырожденного аффинного преобразования необходимо выразить $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ через μ_1, μ_2, μ_3 . Так как имеется только два соотношения вида:

$$\mu_1 = \frac{\alpha\sqrt{k}}{\sqrt{2}} \lambda_1 + \frac{\sqrt{2}}{4\sqrt{k}} \lambda_3, \mu_2 = \frac{\gamma}{\sqrt{2k}} \lambda_2 + \frac{\sqrt{2k}}{4k} \lambda_3,$$

это не позволяет выразить λ_i , через μ_j .

Исследование показало, что квадратичная форма Q имеет вырожденный вид, следовательно, для приведения к нужному виду надо использовать другой подход.

- 2. Специальная замена.** Проведем замену независимых переменных $v(x, y, t) \rightarrow v(\chi, \zeta, l)$ так, чтобы смешанные производные уничтожились. Так как в исследуемом уравнении отсутствует смешанная производная v_{xy} , то предположим, что две переменные не зависят от t , а третья зависит от всех трех переменных исходного уравнения, новые переменные будут иметь вид:

$$\chi = px, \quad \zeta = by, \quad l = cx + dy + mt. \quad (39)$$

где $\{p, b, c, d, m\} \in R / \{0\}$. Определив частные производные новых переменных по старым, производные от неизвестной функции примут вид.

$$v_y = bv_\zeta + dv_l, v_t = mv_l,$$

$$v_{xx} = p^2 v_{\chi\chi} + c^2 v_{\iota\iota} + 2pc v_{\chi\iota}, \quad v_{yy} = b^2 v_{\varsigma\varsigma} + d^2 v_{\iota\iota} + 2bd v_{\varsigma\iota}, \quad (40)$$

$$v_{yt} = dm v_{\iota\iota} + bm v_{\varsigma\iota}, \quad v_{xt} = cm v_{\iota\iota} + pm v_{\chi\iota}$$

Подставляя (40) в (29), получим:

$$\begin{aligned} \alpha^2 k p^2 v_{\chi\chi} + \left[\alpha^2 k c^2 - \frac{\gamma^2}{k} d^2 - \frac{\gamma}{k} dm + \alpha cm \right] v_{\iota\iota} + [2\alpha^2 k pc + \alpha pm] v_{\chi\iota} - \\ - \left[\frac{\gamma}{k} bm + 2 \frac{\gamma^2}{k} bd \right] v_{\varsigma\iota} - \frac{\gamma^2}{k} b^2 v_{\varsigma\varsigma} = \frac{a}{\alpha} e^v (\gamma b v_{\varsigma} + [m + \gamma d] v_{\iota}). \end{aligned} \quad (41)$$

Для того чтобы (41) имело канонический вид, необходимо, чтобы коэффициенты при смешанных производных обратились в нуль, тогда

$$\begin{cases} \alpha^2 k pc + \frac{\alpha}{2} pm = 0, \\ \frac{\gamma^2}{k} bd + \frac{\gamma}{2k} bm = 0, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c = -\frac{m}{2\alpha k}, \\ d = -\frac{m}{2\gamma}, \end{cases}$$

а модули коэффициентов при вторых производных должны быть равны, т.е. $\alpha^2 k p^2 = \frac{\gamma^2}{k} b^2$, следовательно $p = \pm \frac{\gamma b}{\alpha k}$.

Подставив полученные значения в равенство (321), получим:

$$v_{\chi\chi} - v_{\varsigma\varsigma} = \frac{ak}{\alpha \gamma^2 b^2} e^v \left(b \gamma v_{\varsigma} + \frac{m}{2} v_{\iota} \right). \quad (42)$$

Коэффициенты a, k, α, γ – параметры уравнения, а коэффициенты b, m – параметры преобразования, поэтому можно положить $b = 1$, а $m = 2$, и уравнение (42) примет вид (32), при этом преобразования координат имеют вид (33).

Замена (33) сводит уравнение (29) к параболическому типу (отсутствует вторая производная $v_{\iota\iota}$, но первая производная v_{ι} входит в правую часть уравнения (32)).

СЛЕДСТВИЕ 1.

Уравнение (32) эквивалентно гиперболическому уравнению следующего вида

$$v_{\phi\phi} = b e^v (\gamma v_{\phi} - \gamma v_{\varphi} + v_{\iota}), \quad (43)$$

где $\frac{ak}{4\alpha\gamma^2} = b$, $v(\chi, \varsigma, \iota) = v(\phi, \varphi, \iota)$, $\phi = \chi + \varsigma$, $\varphi = \chi - \varsigma$, $\iota = \iota$.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО.

Доказательство сводится к выполнению замены переменных:

$$v(\chi, \varsigma, l) = v(\phi, \varphi, l), \quad \phi = \chi + \varsigma, \quad \varphi = \chi - \varsigma, \quad l = l.$$

СЛЕДСТВИЕ 2.

Уравнение (26), при условии $\beta = 0$ с помощью преобразования пространства:

$$\begin{aligned} u(x, y, t) &= e^{v(\xi, \eta, \zeta)}, \quad \xi = \gamma t - \frac{\gamma}{\alpha k} x + y, \quad \eta = 5\gamma t - \frac{\gamma}{\alpha k} x - y, \\ \zeta &= 3t - \frac{1}{\alpha k} x - \frac{1}{\gamma} y, \end{aligned} \quad (44)$$

приводится к квазилинейному уравнению вида

$$v_{\eta\xi} + be^v[3\gamma v_{\eta} + v_{\zeta} + \gamma v_{\xi}] = 0 \quad (45)$$

где $b = -\frac{\alpha k}{4\alpha\gamma^2}$, ξ, η, ζ – новые независимые переменные функции $v(\xi, \eta, \zeta)$.

Пара Лакса для уравнения (45)

Посмотрим, какой парой Лакса теперь будет обладать полученное уравнение (45). Для этого воспользуемся системой

$$\begin{aligned} L\varphi(x, y, t, \lambda) &= \lambda\varphi(x, y, t, \lambda), \\ \varphi_t(x, y, t, \lambda) &= -A\varphi(x, y, t, \lambda), \end{aligned} \quad (46)$$

с операторами L, A вида (27), (28) соответственно (при $\beta=0$), и вектор-функцией $\varphi(x, y, t, \lambda) = (\varphi_1(x, y, t, \lambda), \varphi_2(x, y, t, \lambda))^T$ (T – транспонирование)

$$\begin{aligned} \alpha\varphi_{1x} + u_{11}\varphi_1 + u_{12}\varphi_2 &= \lambda\varphi_1, \\ \alpha\varphi_{1x} - \alpha\varphi_{2x} + u_{21}\varphi_1 + u_{22}\varphi_2 &= \lambda\varphi_2, \end{aligned} \quad (47)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{1t} &= -2\alpha k\varphi_{1x} - \gamma\varphi_{1y} - ku_{12}\varphi_2, \\ \varphi_{2t} &= -\alpha k\varphi_{1x} - \gamma\varphi_{2y} - v_{21}\varphi_1 - v_{22}\varphi_2, \end{aligned} \quad (48)$$

где $v_{ij}(x, y, t)$, $v_{ij}(x, y, t)$ ($i, j = 1, 2$) после замены $q(x, y, t) = 0$, $u(x, y, t) = e^{v(x, y, t)}$, $\beta = 0$ в (4.23), имеют вид:

$$\begin{aligned}
 v_{11} &= 0, \quad v_{22} = v_t + \alpha k v_x, \quad v_{12} = k e^v, \quad v_{21} = \frac{a^2 k}{4\alpha^2} e^v - \frac{a}{2\alpha} (v_t + \alpha k v_x), \\
 u_{12} &= e^v, \quad u_{21} = \frac{a^2}{4\alpha^2} e^v + \frac{a\gamma}{2\alpha k} v_y, \quad u_{11} = \frac{\gamma}{2k} v_y - \frac{\alpha}{2} v_x, \quad u_{22} = -\frac{\gamma}{2k} v_y - \frac{\alpha}{2} v_x.
 \end{aligned} \quad (49)$$

Выполним в системе (47), (48) замену переменных $(x, y, t) \rightarrow (\xi, \eta, \zeta)$: (44), тогда с учетом (341) ($j = 1, 2$), получим

$$\begin{aligned}
 \varphi_{j\eta} &= \varphi_{j\xi} - \varphi_{j\eta} - \frac{1}{\gamma} \varphi_{j\zeta}, \quad \varphi_{j\kappa} = -\frac{\gamma}{\alpha k} \varphi_{j\xi} - \frac{\gamma}{\alpha k} \varphi_{j\eta} - \frac{1}{\alpha k} \varphi_{j\zeta}, \\
 \varphi_{j\iota} &= 5\gamma\varphi_{j\eta} + \gamma\varphi_{j\xi} + 3\varphi_{j\zeta},
 \end{aligned} \quad (50)$$

линейная система (47), (48) примет вид

$$\begin{aligned}
 -\gamma\varphi_{1\xi} - \gamma\varphi_{1\eta} - \varphi_{1\zeta} + k u_{11}\varphi_1 + k u_{12}\varphi_2 &= \lambda k \varphi_1, \\
 \gamma\varphi_{2\xi} + \gamma\varphi_{2\eta} + \varphi_{2\zeta} - \frac{a}{\alpha} (\gamma\varphi_{1\xi} + \gamma\varphi_{1\eta} + \varphi_{1\zeta}) + k u_{21}\varphi_1 + k u_{22}\varphi_2 &= \lambda k \varphi_2,
 \end{aligned} \quad (51)$$

$$\begin{aligned}
 2\gamma\varphi_{1\eta} &= -k u_{12}\varphi_2, \\
 4\gamma\varphi_{2\eta} + 2\gamma\varphi_{2\xi} + 2\varphi_{2\zeta} &= \frac{a}{\alpha} (\gamma\varphi_{1\xi} + \gamma\varphi_{1\eta} + \varphi_{1\zeta}) - v_{21}\varphi_1 - v_{22}\varphi_2,
 \end{aligned} \quad (52)$$

где функциональные коэффициенты (49) преобразуются по этому же правилу

$$\begin{aligned}
 u_{11} &= \frac{\gamma}{2k} v_y - \frac{\alpha}{2} v_x = \frac{\gamma}{k} v_\xi, \quad u_{22} = -\frac{\gamma}{2k} v_y - \frac{\alpha}{2} v_x = \frac{\gamma}{k} \left(v_\eta + \frac{1}{\gamma} v_\zeta \right), \\
 u_{12} &= e^v, \quad u_{21} = \frac{a^2}{4\alpha^2} e^v + \frac{\gamma a}{2\alpha k} v_y = \frac{\gamma a}{2\alpha k} \left(v_\xi - v_\eta - \frac{1}{\gamma} v_\zeta \right) + \frac{a^2}{4\alpha^2} e^v.
 \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned}
 v_{11} &= 0, \quad v_{21} = \frac{a^2 k}{4\alpha^2} e^v - \frac{a}{2\alpha} (\alpha k v_x + v_t) = \frac{a^2 k}{4\alpha^2} e^v - \frac{a}{\alpha} (2\gamma v_\eta + v_\zeta), \\
 v_{12} &= k e^v, \quad v_{22} = \alpha k v_x + v_t = 4\gamma v_\eta + 2v_\zeta.
 \end{aligned} \quad (54)$$

Так как система (52) является следствием уравнения $\varphi_t(x, y, t, \lambda) = -A\varphi(x, y, t, \lambda)$, которое определяет динамику собственных функций оператора L по времени t , и в новой системе первое равенство содержит только дифференцирование по η , будем считать, что именно эта переменная играет роль координаты «времени». Следовательно, дифференцирование функций $\varphi_i(\xi, \eta, \zeta)$ по этой переменной в системе (51) и пра-

вой части (52) не должно присутствовать, поэтому, используя равенства (52), выполним замену этих производных $\varphi_{1\eta}$, $\varphi_{2\eta}$ во всех равенствах системы (51), (52), тогда имеем

$$-\gamma\varphi_{1\xi} - \varphi_{1\zeta} + ku_{11}\varphi_1 + \frac{3k}{2}u_{12}\varphi_2 = \lambda k\varphi_1,$$

$$\frac{1}{2}(\gamma\varphi_{2\xi} + \varphi_{2\zeta}) - \frac{3a}{4\alpha}(\gamma\varphi_{1\xi} + \varphi_{1\zeta}) + \left(ku_{21} - \frac{1}{4}v_{21}\right)\varphi_1 + \left[\frac{3ka}{8\alpha}u_{12} + ku_{22} - \frac{1}{4}v_{22}\right]\varphi_2 = \lambda k\varphi_2, \quad (55)$$

$$\gamma\varphi_{1\eta} = -\frac{k}{2}u_{12}\varphi_2,$$

$$\gamma\varphi_{2\eta} = -\frac{1}{2}\gamma\varphi_{2\xi} - \frac{1}{2}\varphi_{2\zeta} + \frac{a}{4\alpha}(\gamma\varphi_{1\xi} + \varphi_{1\zeta}) - \frac{1}{4}v_{21}\varphi_1 - \frac{1}{4}\left[v_{22} + \frac{ka}{2\alpha}u_{12}\right]\varphi_2, \quad (56)$$

Представим левую часть полученной системы (55) с операторами дифференцирования $\frac{\partial}{\partial\xi}, \frac{\partial}{\partial\zeta}$ по переменным ξ, ζ в линейном виде:

$$L = B\left(\gamma\frac{\partial}{\partial\xi} + \frac{\partial}{\partial\zeta}\right) + U, \quad (57)$$

где B, U – матрицы 2×2 вида

$$B = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -\frac{3h}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}, \quad U = \begin{pmatrix} \gamma v_\xi & \frac{3}{2}ke^v \\ h\left(\gamma v_\xi - \frac{1}{2}v_\zeta\right) + \frac{3h^2k}{4}e^v & \frac{3kh}{4}e^v + \frac{1}{2}v_\zeta \end{pmatrix}, \quad h = \frac{a}{2\alpha} \quad (58)$$

Представим систему (52) в виде

$$\varphi_{1\eta} = -\frac{k}{2\gamma}u_{12}\varphi_2,$$

$$\varphi_{2\eta} = -\frac{1}{2}\varphi_{2\xi} - \frac{1}{2\gamma}\varphi_{2\zeta} + \frac{h}{2\gamma}(\gamma\varphi_{1\xi} + \varphi_{1\zeta}) - \frac{1}{4\gamma}(v_{21}\varphi_1 + v_{22}\varphi_2 + khu_{12}\varphi_2), \quad (59)$$

и в правой части выделим линейный оператор с матричными коэффициентами

$$A = D\left(\gamma\frac{\partial}{\partial\xi} + \frac{\partial}{\partial\zeta}\right) + V, \quad (60)$$

$$\text{где } D = \frac{1}{2\gamma} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -h & 1 \end{pmatrix}, \quad V = \frac{1}{2\gamma} \begin{pmatrix} 0 & ke^v \\ \frac{h^2k}{2}e^v - h(2\gamma v_\eta + v_\zeta) & \frac{kh}{2}e^v + 2\gamma v_\eta + v_\zeta \end{pmatrix}. \quad (61)$$

Проведенные исследования дают возможность сформулировать следующую

ТЕОРЕМА 3. *Уравнение (45) имеет коммутационное представление $L_\eta = [L, A]$ с операторами L, A вида (57), (60).*

При классическом рассмотрении операторного уравнения Лакса (1.1), оператор L задается так, чтобы уравнение на собственные значения $L\varphi = \gamma\varphi$ являлось системой уравнений, в которой дифференцирование выполняется только по одной переменной, остальные переменные входят в связь параметрически. В полученной паре для уравнения (45) оператор L (57) содержит дифференцирование по двум переменным и, следовательно, даст систему уравнений в частных производных на собственные функции φ , что значительно усложнит анализ этого уравнения.

Выводы

В статье осуществлена идея построения $2 + 1$ – мерной нелинейной модели типа диффузионной цепочки Тоды, основной особенностью которой является наличие нелинейности экспоненциального типа. Проведены следующие исследования:

1. Определены условия совместности системы двух линейных дифференциальных уравнений первого порядка.
2. Доказано, что полученное уравнение связано с операторной L, A – парой и уравнением Лакса, когда оператор L содержит дифференцирование только по одной переменной и параметрически зависит от двух дополнительных переменных, дифференцирование по которым входит в оператор A .
3. Использованы методика приведения линейной части к параболическому виду, а также преобразования координат приводящих к показательной нелинейности.
4. Построена операторная пара, соответствующая квазилинейному уравнению.

Библиографический список

1. Богоявленский О.И. Опрокидывающиеся солитоны в новых двумерных интегрируемых уравнениях // Изв. АН СССР Сер. матем. 1989. Т. 53. № 2. С. 243–258.
2. Санюк В.И. Топологические многомерные солитоны. Докторская диссертация. 1997.
3. Фаддеев Л. Д. Что мы знаем о солитонах в многомерном случае? Общеинститутский математический семинар Санкт-Петербургского отделения Математического института им.

- В.А. Стеклова РАН, г. Санкт-Петербург http://www.mathnet.ru/php/seminars.phtml?option_lang=rus&presentid=1420.
4. Редькина Т.В. Возможность построения солитонных $1 + 1$ и $2 + 1$ -мерных уравнений, имеющих общую задачу рассеяния. // Вестник СГУ, № 43. Ставрополь, 2005. С. 47–52.
 5. Есмаханова К.Р. Солитонные решения $2 + 1$ -мерного нелинейного уравнения Шредингера. Математический журнал. Алматы. 2007. Т. 7. №3 (25). С. 41–44.
 6. Жестков С.В., Новошинская В. С. О существовании солитонных решений систем связанных $2 + 1$ -мерных уравнений Шредингера с керровской нелинейностью и степенными законами нелинейности, Доклады национальной академии наук Беларуси. Минск: Белорусская наука. Т. 54. №3. 2010.

References

1. Bogoyavlensky O.I. Overturning solitons in new two-dimensional integrable equations, Izv. AN SSSR Ser. Math. 1989. T.53, No. 2. P. 243-258.
2. Sanyuk V.I. Topological multidimensional solitons. Doctoral dissertation. 1997.
3. Faddeev L.D. What do we know about solitons in the multidimensional case? General Mathematics Seminar of the St. Petersburg Branch of the Steklov Mathematical Institute. Steklov Mathematical Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg http://www.mathnet.ru/php/seminars.phtml?option_lang=rus&presentid=1420.
4. Redkina T.V. The possibility of constructing soliton $1 + 1$ and $2 + 1$ -dimensional equations having a common scattering problem. // Bulletin of the SSU, No. 43. Stavropol, 2005, p. 47-52.
5. Esmakhanova K.R. Soliton solutions of the $2 + 1$ -dimensional nonlinear Schrödinger equation. Mathematical Journal. Almaty. 2007. Volume 7. №3 (25). P. 41–44.
6. Zhestkov S.V. and Novoshinskaya V.S., The existence of soliton solutions of systems of coupled $2 + 1$ -dimensional Schrödinger equations with Kerr nonlinearity and power law of nonlinearity, Reports of the National Academy of Sciences of Belarus. Minsk, Belarus, vol. 54, 2010.

УДК 534.141+517.95

Чиркунов Ю.А. [Chirkunov Yu. A.]

ПОДМОДЕЛИ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ВЕСТЕРВЕЛЬТА ПРИ ОТСУТСТВИИ ДИССИПАЦИИ

Submodels of the three-dimentional Westervelt model in the absence of dissipation

Получен общий вид всех инвариантных подмоделей ранга 1 трехмерной модели Вестервельта нелинейной гидроакустики при отсутствии диссипации. Исследованы некоторые подмодели, описываемые инвариантными решениями ранга 1, которые найдены либо явно, либо их поиск сводится к решению нелинейных интегральных уравнений. С помощью этих подмоделей исследованы различные волновые процессы в нестационарных ультразвуковых полях. При некоторых условиях установлены существование и единственность решений краевых задач, описывающих эти волновые процессы. Среди исследованных подмоделей содержатся, в частности, следующие подмодели: подмодель, описывающая «коническое ультразвуковое поле»; подмодель, описывающая «спиральное ультразвуковое поле»; подмодель, описывающая «пульсирующий ультразвуковой пучок», инициированный сингулярными направленными источниками; подмодель, описывающая сферически-симметричное ультразвуковое поле, для которого скорость изменения акустического давления имеет особенность в центре, хотя акустическое давление особенности не имеет.

A general form of all invariant submodels of rank 1 of the three-dimensional model of the Westervelt model of nonlinear hydroacoustics is obtained in the absence of dissipation. Some submodels, described by invariant solutions of rank 1 which are found either explicitly or their search is reduced to the solution of nonlinear integral equations. With the help of these submodels, various wave processes in nonstationary ultrasonic fields were investigated. Under certain conditions, the existence and uniqueness of the solutions of the boundary value problems describing these wave processes are established. Among the submodels studied, in particular, the following submodels are contained: a submodel that describes a "conical ultrasonic field"; a submodel, describing the "spiral ultrasonic field"; a submodel describing a "pulsating ultrasonic beam" initiated by singular directional sources; a submodel that describes a spherically symmetric ultrasonic field for which the rate of change of the acoustic pressure has a singularity at the center, although the acoustic pressure does not have of the singularity.

Ключевые слова: нелинейная гидроакустика, модель Вестервельта при отсутствии диссипации, инвариантные подмодели, интенсивные акустические волны.

Key words: nonlinear hydroacoustics, Westervelt model in the absence of dissipation, invariant submodels, intense acoustic waves.

ВВЕДЕНИЕ

Многие математические модели механики сплошной среды сформулированы в виде линейных и квазилинейных дифференциальных уравнений. При выводе этих уравнений использована их инвариантность при различных преобразованиях пространства-времени. Но симметрии модели могут быть скрыты, они могут быть результатом физических свойств моделируемого явления. Использование всех свойств симметрии позволяет корректно моделировать явление и классифицировать подмодели. Симметричный анализ этих подмоделей является одним из наиболее эффективных способов

получения количественных и качественных характеристик описываемых ими физических процессов.

В нелинейной гидроакустике модель Вестервельта [1–4] используется для исследования ультразвуковых полей, генерируемых мощными излучателями. В этой модели не делается предположения о малости углов дифракции, что позволяет более точно учитывать дифракционные эффекты. Наиболее известными практическими применениями модели Вестервельта являются использование этой модели для расчета параметрических сонарных антенн и для расчета ультразвуковых полей в медицине.

В настоящей работе исследуется модель Вестервельта в отсутствие диссипации. Эта модель задается следующим уравнением Вестервельта [1–3]:

$$P_{xx} + P_{yy} + P_{zz} - \frac{1}{2} P_{TT} + \frac{\varepsilon}{\rho_0 c_0^4} (P^2)_{TT} = 0 \quad (1)$$

где $P = P(T, \mathbf{x})$ – акустическое давление,
 T – время, $\mathbf{x} = (x, y, z) \in R^3$,
 ε – параметр нелинейности,
 ρ_0 – равновесная плотность среды,
 c_0 – скорость звука.

С помощью переменных

$$t = c_0 T, \quad p(t, \mathbf{x}) = \frac{\varepsilon}{\rho_0 c_0^2} P(T, \mathbf{x}) \quad (2)$$

уравнение (1) записывается в следующем виде

$$p_{xx} + p_{yy} + p_{zz} - p_{tt} + (p^2)_{tt} = 0 \quad (3)$$

Уравнение (3) является основным объектом дальнейшего исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе исследуется трехмерная модель Вестервельта нелинейной гидроакустики при отсутствии диссипации. Получены подмодели, задаваемые инвариантными решениями ранга 1, которые найдены либо явно, либо их поиск сведен к решению нелинейных интегральных уравнений. С помощью этих подмоделей исследовано: 1) распространение интенсивных акустических волн (автомодельных, осесимметричных, плоских и одномерных), 2) сферически-симметричное ультразвуковое поле. При

некоторых условиях установлены существование и единственность решений краевых задач, описывающих эти процессы. Методами исследований являются: групповой (симметричный) анализ дифференциальных уравнений и общие методы математической физики.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Групповое свойство.

Основная группа Ли преобразований уравнения (3) определяется по стандартному алгоритму [5] и порождается операторами:

$$X_0 = \partial_t, \quad X_1 = \partial_x, \quad X_2 = \partial_y, \quad X_3 = \partial_z, \quad R_1 = t\partial_t + x\partial_x + y\partial_y + z\partial_z, \quad (4)$$

$$R_2 = t\partial_t + (2p-1)\partial_p, \quad Z_1 = y\partial_z - z\partial_y, \quad Z_2 = z\partial_x - x\partial_z, \quad Z_3 = x\partial_y - y\partial_x.$$

Симметричные свойства (4) позволяют получить формулу, производства новых решения уравнения (3). Пусть $p = q(t, x)$ – решение уравнения (3). Тогда решением этого уравнения является следующая функция:

$$p = b_4^{-2} \left(q \left(b_3 b_4 t + b_1, \quad b_3 Bx^* + b_2 \right) - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2}. \quad (5)$$

Здесь b_1, b_3, b_4 – произвольные постоянные, такие что $b_3 b_4 \neq 0$, знак * означает транспонирование, b_2 – произвольный постоянный вектор, а матрица B имеет вид

$$B = \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 & \sin \alpha_1 \cos \alpha_2 & \sin \alpha_2 \\ -\cos \alpha_1 \sin \alpha_2 \sin \alpha_3 & -\sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \sin \alpha_3 + \cos \alpha_1 \cos \alpha_3 & \cos \alpha_2 \sin \alpha_3 \\ \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 \cos \alpha_3 & -\sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \cos \alpha_3 - \cos \alpha_1 \sin \alpha_3 & \cos \alpha_2 \cos \alpha_3 \end{pmatrix},$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – произвольные постоянные.

2. Инвариантные подмодели

Инвариантные подмодели ранга 1 задаются инвариантными решениями ранга 1 уравнения (3). Действие группы внутренних автоморфизмов основной алгебры Ли (4) уравнения (3) на эту алгебру разбивает ее на непересекающиеся классы подобных подалгебр. Выбор простейшего представителя в каждом классе дает оптимальную систему неподобных подалгебр основной алгебры Ли этого уравнения. Чтобы получить все не связанные точечными преобразованиями инвариантные решения ранга 1 уравнения

(3), строятся оптимальные системы трехмерных и четырехмерных подалгебр алгебры Ли с базисом (4). Каждой подалгебре этой оптимальной системы соответствует подгруппа основной группы уравнения (3), порожденная этой подалгеброй. Применение критерия инвариантности функции относительно группы Ли преобразований [5] дает универсальный инвариант каждой подгруппы оптимальной системы подгрупп в пространстве $R^5(t, x, p)$. Так как стационарное решение уравнения (3) является произвольной гармонической функцией, то нетривиальными инвариантными решениями этого уравнения являются нестационарные решения, т. е. решения, инвариантные относительно подгрупп, для которых его алгебра Ли не содержат оператор X_0 .

Оптимальная система не содержащих оператор X_0 трехпараметрических и четырехпараметрических подгрупп основной группы уравнения (3) и универсальные инварианты этих подгрупп приведены в таблицах 1 и 2,

где

$$\mu_k (k = 1, 2, \dots, 8) - \text{произвольные постоянные,}$$
$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \varphi = \arctan \frac{y}{x}, |x| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.$$

Таблица 1. ТРЕХПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ПОДГРУППЫ $\theta_{3,k}$

<i>k</i>	Базис подалгебры			Универсальный инвариант
1.	R_1	R_2	Z_3	$rz^{-1}, (2p-1) t^{-2} z^2$
2.	$\mu_1 R_1 + Z_3$	R_2	X_3	$r \exp(\mu_1 \varphi), (2p-1) t^{-2} \exp(2\mu_1 \varphi)$
3.	$R_1 + \mu_3 R_2$	$Z_3 + \mu_2 R_2$	X_3	$tr^{-2\mu_3-1} \exp(-\mu_2 \varphi), (2p-1) r^{-2\mu_3} \exp(-2\mu_2 \varphi)$
4.	$X_0 + R_1 - R_2$	$\mu_4 X_0 + Z_3$	X_3	$r \exp(\mu_4 \varphi - t), (2p-1) \exp(2(t - \mu_4 \varphi))$
5.	$X_0 + X_3$	R_1	Z_3	$(z-t) r^{-1}, p$
6.	$X_0 + Z_3$	$R_1 - R_2$	X_3	$\varphi - t, (2p-1) r^2$
7.	$X_1 + \mu_5 X_3$	$X_3 - R_2$	X_2	$t \exp(\mu_5 x - z), (2p-1) \exp(2(\mu_5 x - z))$
8.	X_1	X_2	R_2	$z, (2p-1) t^{-2}$
9.	R_1	X_3	R_2	$yx^{-1}, (2p-1) t^{-1} x^1$
10.	$R_1 + \mu_3 R_2$	X_1	X_2	$tz^{-\mu_3-1}, (2p-1) z^{-2\mu_3}$
11.	$X_0 + R_1 - R_2$	X_1	X_2	$z \exp(-t), (2p-1) \exp(2t)$
12.	$X_1 + \mu_6 X_2$	$X_0 + X_2$	X_3	$y - t - \mu_6 x, p$
13.	$X_1 + \mu_5 X_3$	$X_0 + X_3$	R_1	$(z - t - \mu_5 x) y^{-1}, p$
14.	X_1	X_2	X_3	t, p
15.	Z_1	Z_2	Z_3	t, x , p

Таблица 2. ЧЕТЫРЕХПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ПОДГРУППЫ $\theta_{4,k}$

k	Базис подалгебры				Универсальный инвариант
1	R_1	Z_3	R_2	X_3	$(2\rho-1)r^2r^2$
2	X_1	X_2	X_3	R_2	$(2\rho-1)r^2$
3	$X_1 + \mu_5 X_3$	X_2	R_1	R_2	$(2\rho-1)r^2(z - \mu_5 x)^2$
4	$X_2 + \mu_6 X_1$	$X_0 + X_1$	R_1	X_3	ρ
5	$R_1 + \mu_3 R_2$	X_1	X_2	X_3	$\mu_3 = -1: \tau$ $\mu_3 \neq -1: (2\rho-1)t^{\frac{2\mu_1}{\mu_3+1}}$
6	$X_0 + R_1 - R_2$	X_1	X_2	X_3	$(2\rho-1) \exp(2t)$
7	$R_1 + \mu_3 R_2$	Z_1	Z_2	Z_3	$t \mathbf{x} ^{-\mu_3-1}, (2\rho-1) \mathbf{x} ^{-2\mu_3}$
8	R_2	Z_1	Z_2	Z_3	$ \mathbf{x} , (2\rho-1)t^2$
9	$X_0 + R_1 - R_2$	Z_1	Z_2	Z_3	$ \mathbf{x} , \exp(-t), (2\rho-1) \exp(2t)$

Таблицы 1 и 2 позволяют получить все не связанные точечными преобразованиями нестационарные инвариантные решения ранга 1 уравнения (3). Входящие в последующие формулы величины

$$c_k \; (k = 1, \; 2, \; ..., \; 17), \; p_n \; (n = 0, \; 1, \; 2, \; ..., \; 5),$$

$$t_0, \; x_0, \; y_0, \; z_0, \; r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}, \; \varphi_0 = \arctan \frac{y_0}{x_0},$$

$$|\mathbf{x}_0| = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}$$

суть произвольные вещественные постоянные.

2.1. Инвариантные подмодели ранга 1

Нестационарные инвариантные подмодели ранга 1 определяются инвариантными H – решениями, где

$$H \in \left\{ \theta_{3,k} \; (k = 1, \; 2, \; ..., \; 14), \; \theta_{4,m} \; (m = 7, \; 8, \; 9) \right\}.$$

Рассмотрим решения, инвариантные относительно подгрупп $\theta_{3,1}, \; \theta_{3,2}, \; \theta_{3,3}, \; \theta_{3,8}, \; \theta_{4,8}, \; \theta_{4,9}$.

Инвариантное $\theta_{3,1}$ – решение

Это решение описывает осесимметричное ультразвуковое поле, является автомодельным и имеет вид

$$p = t^2 z^{-2} q(\xi) + \frac{1}{2}, \quad \xi = rz^{-1}. \quad (6)$$

Функция $q(\xi)$ является решением следующего интегрального уравнения:

$$q(\xi) = \frac{1}{(\xi^2 + 1)^2} \left(c_2 + c_3 \xi (\xi^2 + 3) + \frac{1}{3} \int_{\xi_0}^{\xi} (A(\xi, \eta) q(\eta) + B(\xi, \eta) q^2(\eta)) d\eta \right), \quad (7)$$

где $\xi_0 = r_0 z_0^{-1}$, $A(\xi, \eta) = 2\eta(\eta^4 + 2\eta^2 - 1) - \xi(\xi^2 + 3) \left(2\eta^2 + 1 + \frac{1}{\eta^2} \right)$,
 $B(\xi, \eta) = 12(\eta^2 + 1) \left(\eta(\eta^2 + 3) - \xi(\xi^2 + 3) \right)$.

Наличие произвольных постоянных в интегральном уравнении (7) позволяет использовать решение (6) для решения краевых задач. В частности, это решение описывает распространение интенсивных акустических волн, для которых давление и его производная в направлении оси Oz заданы в начальный момент времени $t = t_0 > 0$ на окружности

$$r = r_0 > 0, \quad z = z_0 \neq 0:$$

$$p(t_0, \mathbf{x}_0) = p_0, \quad \frac{\partial p}{\partial z}(t_0, \mathbf{x}_0) = p_1. \quad (8)$$

В этом случае c_2, c_3 определяются по формулам:

$$c_2 = \frac{1}{3t_0^2} \left(\frac{|\mathbf{x}_0|^2}{z_0} \left(|\mathbf{x}_0|^2 + 2z_0^2 \right) p_1 + \left(4z_0^2 - |\mathbf{x}_0|^2 \right) (2p_0 - 1) \right), \quad (9)$$

$$c_3 = \frac{z_0}{3t_0^2 r_0} \left(\left(3|\mathbf{x}_0|^2 - 4z_0^2 \right) \left(p_0 - \frac{1}{2} \right) - z_0 |\mathbf{x}_0|^2 p_1 \right).$$

Решение уравнения (3), удовлетворяющее условиям (8), для которого величина $t^{-2} r^2 (2p(t, \mathbf{x}) - 1)$ постоянна на поверхности каждого кругового конуса $x^2 + y^2 = c^2 z^2$ ($c = \text{const} \neq 0$) с удаленной вершиной существует и единственно в окрестности окружности $r = r_0 > 0, z = z_0 \neq 0$. Это решение определяется формулами (6), (7), (9).

Применение этого решения состоит в следующем:

Пусть сингулярный точечный источник (например, точечный взрыв), расположенный в точке $(0, 0, 0)$, инициирует в пространстве ультразвуковое поле такое, что в каждой точке поверхности каждого кругового конуса

$$x^2 + y^2 = c^2 z^2 (c = \text{const} \neq 0)$$

с удаленной вершиной акустическое давление определяется по закону

$$p = k \frac{t^2}{r^2} + \frac{1}{2} \quad (k = \text{const}).$$

Если на окружности $r = r_0 > 0$, $z = z_0 \neq 0$ в момент времени $t_0 > 0$ измерить акустическое давление и скорость его изменения в направлении оси Oz , то в окрестности этой окружности акустическое давление однозначно определяется по формулам (6), (7), (9). Подмодель, определяемую этим решением, можно назвать «коническим ультразвуковым полем».

Инвариантное $\theta_{3,2}$ – решение

Это решение описывает плоское ультразвуковое поле и имеет вид

$$p = t^2 \exp(-2\mu_1 \varphi) q(\xi) + \frac{1}{2}, \quad \xi = r \exp(-\mu_1 \varphi). \quad (10)$$

Функция $q(\xi)$ является решением следующих интегральных уравнений: для $\mu_0 = 0$:

$$q(r) = c_4 + c_5 \ln r + 12 \int_{\xi_0}^{\xi} \eta^3 \ln \frac{\eta}{r} q^2(\eta) d\eta, \quad (11)$$

для $\mu_0 = 0$:

$$q(\xi) = \xi^{\frac{2\mu_1^2}{\mu_1^2+1}} \left(c_6 \sin \left(\frac{2\mu_1}{\mu_1^2+1} \ln \xi \right) + c_7 \cos \left(\frac{2\mu_1}{\mu_1^2+1} \ln \xi \right) + \frac{6}{\mu_1} \int_{\xi_0}^{\xi} \eta^{\frac{5\mu_1^2+3}{\mu_1^2+1}} \sin \left(\frac{2\mu_1}{\mu_1^2+1} \ln \frac{\eta}{\xi} \right) q^2(\eta) d\eta \right), \quad (12)$$

где $\xi_0 = r_0 \exp(-\mu_1 \varphi_0)$.

В окрестности точки (t_0, x_0) , $(x_0 = (x_0, y_0) \neq (0, 0))$ существует единственное решение уравнения (3), для которого в точке $x_0 = (x_0, y_0) \neq (0, 0)$ в начальный момент времени $t = t_0 > 0$ заданы акустическое давление и его производная в радиальном направлении:

$$p(t_0, x_0) = p_0, \quad \frac{\partial p}{\partial r}(t_0, x_0) = p_2. \quad (13)$$

Для этого решения величина $t^{-2} \exp(2\mu_1 \varphi) (2p(t, x) - 1)$ постоянна на каждой логарифмической спирали $r \exp(-\mu_1 \varphi) = c$ ($c = \text{const} \neq 0$). Это решение определяется формулами (10) – (12), в которых c_k ($k=4, 5, 6, 7$) таковы:

$$c_4 = t_0^{-2} \left(p_0 - \frac{1}{2} - r_0 p_1 \ln r_0 \right), \quad c_5 = t_0^{-2} r_0 p_1,$$

$$\begin{aligned}
c_6 &= t_0^{-2} r_0^{\frac{2\mu_1^2}{\mu_1^2+1}} \exp\left(\frac{2\mu_1\varphi_0}{\mu_1^2+1}\right) \left(\left(p_0 - \frac{1}{2}\right) \left(\sin\left(\frac{2\mu_1}{\mu_1^2+1}(\ln r_0 - \mu_1\varphi_0)\right) \right) + \right. \\
&\quad \left. + \mu_1 \cos\left(\frac{2\mu_1}{\mu_1^2+1}(\ln r_0 - \mu_1\varphi_0)\right) \right) + \frac{\mu_1^2+1}{2\mu_1} r_0 p_1 \cos\left(\frac{2\mu_1}{\mu_1^2+1}(\ln r_0 - \mu_1\varphi_0)\right) \Bigg), \\
c_7 &= t_0^{-2} r_0^{\frac{2\mu_1^2}{\mu_1^2+1}} \exp\left(\frac{2\mu_1\varphi_0}{\mu_1^2+1}\right) \left(\left(p_0 - \frac{1}{2}\right) \left(\cos\left(\frac{2\mu_1}{\mu_1^2+1}(\ln r_0 - \mu_1\varphi_0)\right) \right) - \right. \\
&\quad \left. - \mu_1 \sin\left(\frac{2\mu_1}{\mu_1^2+1}(\ln r_0 - \mu_1\varphi_0)\right) \right) - \frac{\mu_1^2+1}{2\mu_1} r_0 p_1 \sin\left(\frac{2\mu_1}{\mu_1^2+1}(\ln r_0 - \mu_1\varphi_0)\right) \Bigg). \quad (14)
\end{aligned}$$

Применение этого решения состоит в следующем:

Пусть задано плоское ультразвуковое поле такое, что в каждой точке логарифмической спирали $r \exp(-\mu_1\varphi) = c$ ($c = \text{const} > 0$) акустическое давление определяется по закону

$$p = kt^2 \exp(-2\mu_1\varphi) + \frac{1}{2} \quad (k = \text{const}).$$

Если в точке $x_0 = (x_0, y_0) \neq (0, 0)$ в момент времени $t_0 > 0$ измерить акустическое давление и его производную в радиальном направлении, то в окрестности точки x_0 акустическое давление однозначно определяются по формулам (10) – (12), (14). Подмодель, определяемую этим решением, можно назвать «спиральным ультразвуковым полем».

Инвариантное $\theta_{3,3}$ – решение

Это решение описывает нелинейные и дифракционные эффекты в сфокусированном одномерном ультразвуковом пучке волн. Оно имеет вид

$$p = r^{2\mu_3} \exp(2\mu_2\varphi) q(\xi) + \frac{1}{2}, \quad \xi = tr^{-\mu_3-1} \exp(-\mu_2\varphi). \quad (15)$$

1. Пусть $\mu_2 = 0$. В этом случае при $\mu_3 = -1$ функция $q(\xi)$ неявно определяется квадратурой

$$\int_{q(t_0)}^{q(t)} \frac{q dq}{\sqrt{c_8 - q^3}} = c_9 \pm \frac{2t}{\sqrt{3}}. \quad (16)$$

Интеграл в левой части (16) элементарными преобразованиями [6] сводится к линейной комбинации эллиптических интегралов и интегралов, выражаемых через элементарные функции.

При $\mu_3 \neq -1$ функция $q(\xi)$ является решением интегрального уравнения:

$$q(\xi) = \xi^{\frac{2\mu_3}{\mu_3+1}} (c_{10} + c_{11} \ln \xi) - \frac{q^2(\xi)}{(\mu_3+1)^2} + \\ + \frac{\xi^{\frac{2\mu_5}{\mu_3+1}}}{(\mu_3+1)^4} \int_{\xi_0}^{\xi} \left(2\mu_3(1-\mu_5) \ln \frac{\xi}{\eta} - (\mu_3+1)(3\mu_3-1) \right) \eta^{\frac{-3\mu_5-1}{\mu_5+1}} q^2(\eta) d\eta, \\ \xi_0 = t_0 r_0^{-\mu_3-1}. \quad (17)$$

Решение (15), (17) можно использовать для описания распространения сфокусированного пучка интенсивных одномерных ультразвуковых волн, инициированных акустическим давлением и скоростью его изменения, заданных в начальный момент времени $t = t_0 > 0$ на окружности $r = r_0 > 0$:

$$p(t_0, r_0) = p_0, \quad \frac{\partial p}{\partial t}(t_0, r_0) = p_3. \quad (18)$$

В окрестности окружности $r = r_0 > 0$ существует единственное решение уравнения (3), удовлетворяющее условию (18), для которого величина $r^{-2\mu_5}(2p(t, \mathbf{x}) - 1)$ постоянна вдоль каждой траектории $t = cr^{\mu_5+1}$ ($c = \text{const}$).

Это решение определяется формулами (15) и (17), в которых c_{10} и c_{11} задаются формулами

$$c_{10} = c_{11} \left((\mu_3+1) \ln r_0 - \ln t_0 \right) + t_0^{\frac{2\mu_3}{\mu_3+1}} \left(p_0 - \frac{1}{2} \right) \left(\frac{r_0^{-2\mu_3} \left(p_0 - \frac{1}{2} \right)}{(\mu_3+1)^2} + 1 \right), \quad (19) \\ c_{11} = t_0^{\frac{1-\mu_3}{\mu_3+1}} p_3 \left(\frac{r_0^{-2\mu_3} (2p_0-1)}{(\mu_3+1)^2} + 1 \right) + \frac{1}{\mu_3+1} t_0^{\frac{2\mu_3}{\mu_3+1}} \left(p_0 - \frac{1}{2} \right) \left(\frac{(\mu_3-1)r_0^{-2\mu_3} \left(p_0 - \frac{1}{2} \right)}{(\mu_3+1)^2} - 2\mu_3 \right).$$

2. Пусть $\mu_2 \neq 0$. В этом случае функция $q(\xi)$ является решением интегрального уравнения:

$$q(\xi) + \frac{q^2(\xi)}{\mu_2^2 + (\mu_3+1)^2} = \xi^a (c_{12} \sin(b \ln \xi) + c_{13} \cos(b \ln \xi)) - \frac{1}{2\mu_2} \int_{\xi_0}^{\xi} \eta^{-a-1} q^2(\eta) d\eta, \\ a = \frac{2(\mu_2^2 + \mu_3^2 + \mu_3)}{\mu_2^2 + (\mu_3+1)^2}, \quad b = \frac{2\mu_2}{\mu_2^2 + (\mu_3+1)^2}, \quad \xi_0 = t_0 r_0^{-\mu_5-1} \exp(-\mu_2 \varphi). \quad (20)$$

В окрестности точки $(t_0, \mathbf{x}_0)$, $(\mathbf{x}_0 = (x_0, y_0) \neq (0, 0))$ существует решение уравнения (3), удовлетворяющее условиям

$$p(t_0, \mathbf{x}_0) = p_0, \quad \frac{\partial p}{\partial t}(t_0, \mathbf{x}_0) = p_4.$$

Единственность этого решения обеспечивается условием постоянства величины $(2p(t, \mathbf{x}) - 1)r^{-2\mu_5} \exp(-2\mu_2\varphi)$ вдоль каждой траектории

$$t = cr^{\mu_5+1} \exp(\mu_2\varphi) \quad (c = \text{const} > 0).$$

Это решение определяется формулами (15) и (20), в которых c_{12} и c_{13} определяются формулами

$$c_{12} = A \cos(b \ln \xi_0) + B \sin(b \ln \xi_0), \quad c_{13} = B \cos(b \ln \xi_0) - A \sin(b \ln \xi_0), \quad (21)$$

$$\text{где } A = b^{-1} \xi_0^{-a} \left(a q_0 \left(\frac{b q_0}{2 \mu_2} + 1 \right) - \xi_0 r_0^{1-\mu_5} p_4 \left(\frac{b q_0}{\mu_2} + 1 \right) \exp(-2 \mu_2 \varphi_0) - \frac{b q_0^2 (2a-1) \xi_0^{-a}}{2 \mu_2} \right),$$

$$B = \xi_0^{-a} q_0 \left(\frac{b q_0}{2 \mu_2} + 1 \right), \quad q_0 = r_0^{-2 \mu_5} \left(p_0 - \frac{1}{2} \right) \exp(-2 \mu_2 \varphi_0).$$

Применение этого решения состоит в следующем:

Пусть задан сфокусированный пучок ультразвуковых волн такой, что в каждый фиксированный момент времени t в каждой точке траектории

$$t = cr^{\mu_5+1} \exp(\mu_2\varphi) \quad (c = \text{const} > 0)$$

акустическое давление определяется по закону

$$p = kr^{2\mu_5} \exp(2\mu_2\varphi) + \frac{1}{2} \quad (k = \text{const}).$$

Если в момент времени $t_0 > 0$ измерить в точке $\mathbf{x}_0 \neq (0, 0)$

акустическое давление и скорость его изменения, то в окрестности точки $(t_0, \mathbf{x}_0)$ акустическое давление однозначно определяется по формулам (15), (17), (19) – (21). Подмодель, определяемая этим решением, характеризуется нетривиальной зависимостью акустического давления от времени.

Инвариантное $\theta_{3,8}$ – решение

Это решение описывает нелинейные и дифракционные эффекты в сфокусированном одномерном ультразвуковом пучке волн, распространяющихся вдоль оси Oz . Оно определяется по формуле

$$p = \frac{1}{2} - \frac{t^2}{8} \wp \left(c_{14} \pm \frac{z}{\sqrt{6}}; \quad 0; \quad c_{15} \right), \quad (22)$$

$$\text{где } \wp \left(c_{14} \pm \frac{z}{\sqrt{6}}; \quad 0; \quad c_{15} \right)$$

– эллиптическая функция Вейерштрасса [6] переменной $\left(c_{14} \pm \frac{z}{\sqrt{6}}\right)$ с инвариантами $g_2 = 0$ и $g_3 = c_{15}$.

При $c_{15} = 0$ решение (22) имеет вид

$$p = -\frac{t^2}{8} \left(c_{14} \pm \frac{z}{\sqrt{6}}\right)^{-2} + \frac{1}{2}. \quad (23)$$

Решение (23) имеет физический смысл в каждой точке только в течение ограниченного периода времени, а именно для

$$t \leq t_* = 2 \left| c_{14} \pm \frac{z}{\sqrt{6}} \right|^{-2}.$$

При $c_{15} \neq 0$ акустическое давление $p(t, z)$ в каждый фиксированный момент времени является периодической функцией второго порядка [6] переменной z с двумя периодами

$$2\omega_1 = 2^{\frac{13}{6}} c_{15}^{-\frac{1}{3}} (K(k) - iK(k')), \quad 2\omega_2 = 2^{\frac{13}{6}} c_{15}^{-\frac{1}{3}} (K(k) + iK(k')) \quad (i^2 = -1),$$

где
$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{(1 - k^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{1}{2}}} -$$

полный эллиптический интеграл первого рода [6] с модулем

$$k = \frac{1}{2} \sqrt{2 - \sqrt{3}}$$

и дополнительным модулем

$$k' = \frac{1}{2} \sqrt{2 + \sqrt{3}}.$$

Акустическое давление имеет полюсы второго порядка в точках

$$z_{m,n} = 2m\omega_1 + 2n\omega_2$$

(m и n – произвольные целые числа). Каждый параллелограмм периодов содержит только один полюс.

Подмодель, определяемая этим решением, описывает «пульсирующий ультразвуковой пучок», инициированный сингулярными направленными точечными источниками

Инвариантное $\theta_{4,9}$ – решение

Это решение имеет вид

$$p = t^2 q(|x|) + \frac{1}{2}, \quad x = (x, y, z). \quad (24)$$

Функция $q(\xi)$ является решением уравнения Эмдена

$$\xi q'' + 2q' + \xi q^2 = 0. \quad (25)$$

Это уравнение имеет частное решение $q(\xi) = -\frac{2}{\xi^2}$. Этому решению соответствует акустическое давление

$$p = -\frac{2t^2}{|\mathbf{x}|^2} + \frac{1}{2}, \quad (26)$$

описывающее сферически-симметричное ультразвуковое поле с особенностью в точке $\mathbf{x} = \mathbf{0}$.

Уравнение (25) также имеет решение, для которого, полученное по формуле (24) акустическое давление принимает конечное значение в точке $\mathbf{x} = \mathbf{0}$. А именно: из уравнения (25) следует, что в окрестности точки $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ существует единственное решение уравнения (3), такое, что для каждого значения времени:

$$\lim_{|\mathbf{x}| \rightarrow +0} p(t, \mathbf{x}) = \frac{1}{2}, \quad \lim_{|\mathbf{x}| \rightarrow +0} |\mathbf{x}|^2 \frac{\partial p(t, \mathbf{x})}{\partial |\mathbf{x}|} = 0.$$

В этом случае акустическое давление для всех $t > 0$ удовлетворяет условию $p(t, \mathbf{x}) \geq 1/2$ и на некоторой сфере с центром в точке $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ акустическое давление $p(t, \mathbf{x}) = 1/2$. Подмодель, определяемая этим решением, описывает сферически-симметричное ультразвуковое поле, для которого скорость изменения акустического давления имеет особенность в центре, хотя акустическое давление не имеет особенности.

Инвариантное $\theta_{4,9}$ – решение

Это решение имеет вид

$$p = q(\xi) \exp(-2t) + \frac{1}{2}, \quad \xi = |\mathbf{x}| \exp(-t), \quad \mathbf{x} = (x, y, z), \quad (27)$$

где $q(\xi)$ – решение интегрального уравнения

$$q(\xi) + q^2(\xi) = \xi^{-4} c_{16} + c_{17} \ln \xi + \int_{\xi_0}^{\xi} \left(12 \ln \frac{\eta}{\xi} + 7 \right) \eta^3 q(\eta) d\eta, \quad \xi_0 = |\mathbf{x}_0| \exp(-t_0). \quad (28)$$

Решение (27), (28) можно использовать для описания сферически-симметричного ультразвукового поля, инициированного в начальный момент времени $t = t_0 \geq 0$ в фиксированной точке $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 \neq \mathbf{0}$ акустическим давлением и его радиальной производной:

$$p(t_0, \mathbf{x}_0) = p_0, \quad \frac{\partial p}{\partial |\mathbf{x}|}(t_0, \mathbf{x}_0) = p_5. \quad (29)$$

В окрестности точки $(t_0, \mathbf{x}_0)$ существует единственное решение уравнения (3), удовлетворяющее условию (29), для которого величина $(2p(t, \mathbf{x}) - 1) \exp(2t)$ постоянна вдоль каждой траектории $t = \ln |\mathbf{x}| + c$ ($c = \text{const}$). Это решение определяется формулами (27) и (28), в которых c_{16} и c_{17} задаются формулами

$$c_{16} = |\mathbf{x}_0|^4 \left(p_0 - \frac{1}{2} \right) \left(\left(p_0 - \frac{1}{2} \right) \exp(2t_0) + 1 \right) \exp(-2t_0) + c_{43} (t_0 - \ln |\mathbf{x}_0|), \quad (30)$$

$$c_{17} = |\mathbf{x}_0|^4 \left(\left(p_0 - \frac{1}{2} \right) (2(2p_0 - 1) \exp(2t_0) - 3) + |\mathbf{x}_0| p_5 ((2p_0 - 1) \exp(-2t_0) + 1) \right) \exp(-2t_0).$$

Применение этого решения состоит в следующем:

Пусть задано сферически-симметричное ультразвуковое поле такое, что в каждый фиксированный момент времени t в каждой точке траектории $t = \ln |\mathbf{x}| + c$ ($c = \text{const}$) акустическое давление определяется по закону $p = k \exp(-2t) + 1/2$ ($k = \text{const}$). Если в момент времени $t_0 \geq 0$ измерить в точке $\mathbf{x}_0 \neq (0, 0, 0)$ акустическое давление и его радиальную производную, то в окрестности точки $(t_0, \mathbf{x}_0)$ акустическое давление однозначно определяется по формулам (27), (28), (30). Подмодель, определяемая этим решением, описывает сферически-симметричное ультразвуковое поле, для которого акустическое давление нетривиально зависит от времени.

2.2. Семейства решений

Применение формулы производства решений (5) к решениям, определяемым формулами (6), (7), (10) (10) – (12), (14) – (17), (20), (22) – (24), (26) – (28) дает содержащее произвольные постоянные семейство решений нелинейного уравнения (3). Эти решения по формулам (2) дают семейство решений уравнения (1). Наличие произвольных постоянных открывает новые возможности для изучения других имеющих физический смысл краевых задач для этих уравнений в дополнение к уже рассмотренным в этой статье задачам.

ВЫВОДЫ

Для трехмерной модели Вестервельта нелинейной гидроакустики при отсутствии диссипации получен общий вид всех инвариантных подмоделей ранга 1. Исследованы некоторые подмодели, описываемые инвариантными решениями ранга 1, которые найдены либо явно, либо их поиск сводится к решению нелинейных интегральных уравнений. С помощью этих подмоделей исследованы различные волновые процессы в нестационарных ультразвуковых полях. При некоторых условиях установлены существование и единственность решений краевых задач, описывающих эти волновые процессы. Среди исследованных подмоделей нужно отметить следующие: подмодель, описывающая «коническое ультразвуковое поле»; подмодель, описывающая

«спиральное ультразвуковое поле»; подмодель, описывающая «пульсирующий ультразвуковой пучок», инициированный сингулярными направленными источниками; подмодель, описывающая сферически-симметричное ультразвуковое поле, для которого скорость изменения акустического давления имеет особенность в центре, хотя акустическое давление особенности не имеет. Применение полученной формулы производства решений к полученным решениям дает содержащее произвольные постоянные семейство решений нелинейного уравнения (3). Наличие произвольных постоянных открывает новые возможности для изучения других имеющих физический смысл краевых задач для этих уравнений в дополнение к уже рассмотренным в этой статье задачам.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета и РФФИ в рамках научного проекта № 16-01-00446 а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Westervelt P. Parametric acoustic array. J. Acoustic Soc. Am., 1963. V. 35(4). P. 535–537.
2. Novikov B.K., Rudenko V.I., Timoshenko V.I. Nonlinear underwater acoustics. New York, AIP-Press. 1987. 262 p.
3. Voronin V.A., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. Nonlinear acoustics. New York, AIP-Press. 1995. 314 p.
4. Чиркунов Ю.А., Пикмуллина Е.О. Точные решения нелинейных уравнений мелкой воды над прямолинейным дном. Ж.: Наука. Инновации. Технологии. 2017. Вып. 2. С. 73–86.
5. Чиркунов Ю.А., Хабиров С.В. Элементы симметричного анализа дифференциальных уравнений механики сплошной среды. Новосибирск. НГТУ. 2012. 659 с.
6. Whittaker E.T., Watson G.N. A course of modern analysis. V. 2. Cambridge: Univ. Press. 1962. 515 p.

REFERENCES

1. Westervelt P. Parametric acoustic array. J. Acoustic Soc. Am., 1963. V. 35(4). P. 535–537.
2. Novikov B.K., Rudenko V.I., Timoshenko V.I. Nonlinear underwater acoustics. AIP-Press, New York, 1987. 262 p.
3. Voronin V.A., Tarasov S.P., Timoshenko V.I. Nonlinear acoustics. AIP-Press, New York, 1995. 314 p.
4. Chirkunov Yu.A., Pikmullina E.O. Tochnye reshenia nelineynykh uravneniy melkoy vody nad priamolineynym dnom (Exact solutions of nonlinear shallow water equations over square bottom). J.: Science. Innovations. Technologies. 2017. No2. P. 73–86.
5. Yu. A. Chirkunov, S. V. Khabirov. Elementy simmetriynogo analiza differentsialnykh uravneniy mehaniki sploshnoi sredy (Elements of symmetry analysis of differential equations of continuum mechanics). Novosibirsk: NGTU. 2012. 659 p.
6. Whittaker E.T., Watson G.N. A course of modern analysis. V. 2. Cambridge: Univ. Press. 1962. 515 p.

УДК 556.5

Батчаев М.И. [Batchaev M.I.],
Закинян Р.Г. [Zakinyan R.G.]

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАВОДКОВ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Mathematical model of floods with the distributed parameters

Хотя в целом картина формирования паводков ясна и понятно, что они в основном определяются интенсивностью и продолжительностью осадков над бассейном реки, но математического подхода, в рамках которого можно было спрогнозировать для конкретного бассейна момент наступления паводков с достаточной заблаговременностью, все еще нет. Это связано с наличием множества взаимозависимых факторов, влияющих на накопление влаги в бассейне реки. На наш взгляд, слабой стороной существующих математических моделей паводков является то, что они носят «накопительный» характер. Мы же рассматриваем паводок, как качественно новое состояние бассейна, как катастрофу. В работе получена новая математическая модель паводков с распределенными параметрами. Показано, что предложенная математическая модель описывает режим с обострением. Это значит, что за конечное время количество влаги в почве стремится к бесконечности, оставаясь локализованной в ограниченном объеме. Приток влаги происходит намного быстрее оттока и влага не успевает уйти за определенную границу и происходит накопление (локализация) влаги, что приводит к возникновению катастрофы, то есть к паводковым явлениям.

Though in general the picture of formation of floods is clear and it is clear that they generally are defined by intensity and duration of rainfall over a river basin, but there is no mathematical approach, within which it was possible to predict for the concrete pool, the moment of approach of floods with sufficient advance time, still. In our opinion, weakness of the existing mathematical models of floods is that they have "accumulative" character. We consider a flood as qualitatively new condition of the pool as accident. In work the new mathematical model of floods with the distributed parameters is received. It is shown that the offered mathematical model describes the mode with an exacerbation. It means that for final time the amount of moisture in the soil strives for infinity. Inflow of moisture happens much quicker than outflow and moisture doesn't manage to leave for a certain border and there is an accumulation (localization) of moisture that leads to accident emergence that is to the flood phenomena.

Ключевые слова: бассейн реки, приток, сток, паводок, водосбор, подземные воды.

Keywords: river basin, inflow, drain, flood, reservoir, underground waters.

Введение

В настоящее время проблема прогноза паводков является актуальной проблемой, как с научной, так и с практической точки зрения. Хотя в целом картина формирования паводков ясна и понятно, что они в основном определяются интенсивностью и продолжительностью осадков над бассейном реки, но математического подхода, в рамках которого можно было спрогнозировать для конкретного бассейна момент наступления паводков с достаточной

заблаговременностью, все еще нет. Это связано с наличием множества взаимозависимых факторов, влияющих на накопление влаги в бассейне реки.

На наш взгляд, слабой стороной существующих математических моделей паводков является то, что они носят «накопительный» характер. Мы же рассматриваем паводок, как качественно новое состояние бассейна, как катастрофу. Поэтому нами в настоящей работе предлагается математическая модель паводков, в которой процесс накопления влаги рассматривается, как «режим с обострением».

Материалы и методы исследования

Математическая модель

с сосредоточенными параметрами

Начнем с анализа модели *HBV*. Эта модель, разработанная Бергстрёмом (Bergström, 1992, 1995) [3, 4] в Шведском метеорологическом и гидрологическом институте, представляет собой концептуальную модель водосбора, которая преобразует осадки, температуру воздуха и потенциальное суммарное испарение либо в снеготаяние, либо в сток или приток в водохранилище.

Модель описывает общий баланс воды следующим образом [1]:

$$P - E - Q = \frac{d}{dt}(SP + SM + UZ + LZ + VL), \quad (1)$$

где P – осадки,
 E – суммарное испарение,
 Q – сток,
 SP – снежный покров,
 SM – влажность почвы,
 UZ – верхняя зона подземных вод,
 LZ – нижняя зона подземных вод и
 VL – объем озер.

В выражении (1) под P надо понимать не сами осадки, а интенсивность осадков. Соответственно, E – скорость испарения, а Q – скорость пополнения стока.

В действительности уравнение (1) выражает всего лишь баланс влаги. Оно не является кинематическим и не описывает динамику явления. Тем более, из него непосредственно не следует возникновение катастрофического явления, каковым являются паводки.

Немного видоизменив уравнение (1), можно свести его к виду, описывающему катастрофические явления. Действительно, так как в формуле (1) отражены основные составляющие баланса влаги, но можно предположить, что остались неизвестные нам составляющие баланса, то можно записать:

$$P - E - Q = A(SP + SM + UZ + LZ + VL)^\alpha, \quad (2)$$

где A и α находятся статистическими методами по данным наблюдений.

Из (1) и (2) следует

$$\frac{d}{dt}(SP + SM + UZ + LZ + VL) = A(SP + SM + UZ + LZ + VL)^\alpha. \quad (3)$$

Уравнение (3) решается обычным способом. Мы для краткости изложения, согласно нашей основной концепции, остановим наше внимание только на одном, на наш взгляд важном параметре UZ . Тогда уравнение (3) запишется в виде:

$$\frac{dUZ}{dt} = AUZ^\alpha. \quad (4)$$

Решая это уравнение находим:

$$UZ^{\alpha-1} = \frac{1}{A(\alpha-1)(t_c - t)}, \quad (5)$$

где
$$t_c = \frac{1}{A(\alpha-1)UZ_0^{\alpha-1}}.$$

Запишем уравнение (5) в виде:

$$UZ = \frac{B}{(t_c - t)^{1/(\alpha-1)}}, \quad (6)$$

где
$$B = \frac{1}{[A(\alpha-1)]^{1/(\alpha-1)}}. \quad (7)$$

Как видно из формулы (6), когда время $t = t_c$ запасы влаги в верхней зоне подземных вод $UZ \rightarrow \infty$. Поэтому время t_c – это время катастрофы. Термин катастрофа здесь применяется в широком смысле слова, как резкое увеличение искомой величины.

Конечно же, в реальности дело до бесконечности не доходит. Но так как мы создаем прогностическую модель, нам до катастрофы дело доводить не надо. Из предложенной модели можно получить следующую практическую рекомендацию. Если в результате мониторинга статистическими методами по данным наблюдений мы получили в модели (2) значение параметра $\alpha > 1$, то катастрофа неизбежна.

Результаты исследования и их обсуждение**Математическая модель****с распределенными параметрами**

Выше мы анализировали модель с сосредоточенными параметрами, постоянными для всего водосбора. В математическом смысле в этом случае водосбор представляется материальной точкой. Однако, имеются модели с распределенными параметрами. Они предназначены для более надежного описания природных гидрологических процессов и поэтому могут включать некоторые метеорологические переменные и параметры водосбора. Однако потенциал распределенных, физически обоснованных моделей до сих пор используется лишь частично (Refsgaard and Abbott, 1996) [6]. Это объясняется несколькими причинами. Модели с распределенными параметрами требуют большого количества данных, которые не всегда существуют или недоступны.

Европейская гидрологическая система (DHI, 1985) [5] является примером модели с распределенными параметрами. Блок, описывающий процесс задержания осадков растительностью в этой модели, позволяет определять интенсивность изменения количества влаги, задержанной поверхностью растительного покрова. Согласно модели Руттера указанную закономерность можно представить в виде [1]:

$$\frac{dc}{dt} = Q - K(c - S), \quad (8)$$

где c – слой воды, задержанной поверхностью растительного покрова; S – водоудерживающая способность растительного покрова; Q – интенсивность выпадения жидких осадков; K – фильтрационный параметр; t – время.

Найдем решение уравнения (8):

$$-\frac{1}{K} \frac{d[Q - K(c - S)]}{dt} = Q - K(c - S),$$

$$\frac{d[Q - K(c - S)]}{Q - K(c - S)} = -K dt,$$

$$\ln[Q - K(c - S)] = -Kt + \text{const.}$$

Константу найдем из условия, что к началу наблюдения имелся начальный слой воды, задержанной поверхностью растительного покрова.

Тогда

$$Q - K(c - S) = [Q - K(c_0 - S)]e^{-Kt},$$

$$Q(1 - e^{-Kt}) = K(c - c_0 e^{-Kt}) - KS(1 - e^{-Kt}),$$

$$c = c_0 e^{-Kt} + \left(\frac{Q}{K} + S \right) (1 - e^{-Kt}). \quad (9)$$

Отсюда следует, что с увеличением времени $t \rightarrow \infty$ слой воды, задержанной поверхностью растительного покрова, стремиться к предельному значению, равному:

$$c_{\max} = \frac{Q}{K} + S. \quad (10)$$

График зависимости (9) в условных единицах представлен на рисунке 1.

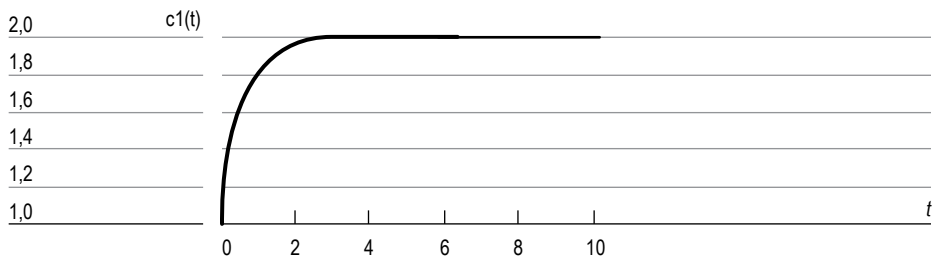


Рис. 1.

Изменение слоя воды, задержанной поверхностью растительного покрова, в модели Руттера [1].

Как видно из проведенного анализа и рисунка модель Руттера не описывает катастрофу, в ней нет «режима обострения». Но в этой модели есть такое важное понятие, как водоудерживающая способность растительного покрова S , которая вместе с интенсивностью осадков и фильтрационными коэффициентами определяет максимальный слой воды, задержанной поверхностью растительного покрова $c_{\max}$.

Хотя в модели Руттера насыщение достигается за бесконечно большое время, она может быть полезна в практическом применении. Действительно, как только согласно модели слой воды приближается к состоянию насыщения и достигает порядка 80 % от максимального значения, то ясно, что дополнительные осадки могут вызвать катастрофические явления.

В самом общем виде процесс накопления влаги может быть описан с помощью уравнения Ричардса [1]:

$$c = \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} + S, \quad (11)$$

где

ψ – напор; t – переменная времени; z – вертикальная координата (положительное направление вверх); $c = \frac{\partial \Theta}{\partial \psi}$ – влагоемкость почвы; Θ – запас воды в почве; K – гидравлическая проводимость; S – источник и сток воды.

Как известно [2], решение уравнения типа (11) зависит от начальных и граничных условий. А они, в свою очередь, могут быть установлены только экспериментально или из общих концептуальных соображений. Поэтому модель (1) также не описывает катастрофу или режим с обострением. Использование этой модели позволяет определить количество прибывшей влаги к уже имеющемуся объему воды. Продолжая процедуру накопления, человек сам определяет, является ли полученный уровень накопленной воды критическим или нет.

Предложенную выше нашу модель с сосредоточенными параметрами рассмотрим в рамках модели с распределенными параметрами. Изменение влагоемкости в почве опишем нелинейным уравнением диффузии, которое является следствием закона сохранения массы:

$$\frac{\partial UZ}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_0 UZ^\sigma \frac{\partial UZ}{\partial z} \right), \quad (12)$$

где UZ – влагоемкость верхней зоны подземных вод. Здесь коэффициент фильтрации является функцией от влагоемкости: $k = k_0 UZ^\sigma$. Причем на границе $z = 0$, изменение этой величины описывается уравнением (6):

$$UZ(0, t) = \frac{B}{(t_c - t)^{1/(\alpha-1)}}. \quad (13)$$

Уравнение (12) с граничным условием (13) имеет решение [2]:

$$UZ(z, t) = \frac{B}{(t_c - t)^{1/(\alpha-1)}} f(\xi),$$

где ξ – автомодельная переменная, равная

$$\xi = \frac{z}{k_0^{1/2} B^{\sigma/2} (t_c - t)^{\frac{\alpha-1-\sigma}{2(\alpha-1)}}}. \quad (14)$$

Из (14) вытекает, что это автомодельное решение удовлетворяет краевой задаче с граничным условием (13) и начальным условием:

$$UZ(z, 0) = \frac{B}{t_c^{1/(\alpha-1)}} f \left(\frac{z}{k_0^{1/2} B^{\sigma/2} t_c^{\frac{\alpha-1-\sigma}{2(\alpha-1)}}} \right). \quad (15)$$

В случае $\sigma = \alpha - 1$ решение имеет вид:

$$UZ(z, t) = \begin{cases} \frac{B}{(t_c - t)^{1/(\alpha-1)}} \left(1 - \frac{z}{z_f} \right)^{2/(\alpha-1)}, & 0 \leq z \leq z_f, \\ 0, & z > z_f \end{cases}, \quad (16)$$

$$z_f = \sqrt{\frac{2(\alpha + 1)}{\alpha - 1}} k_0 B^{\alpha-1}. \quad (17)$$

Из уравнения (16) следует, так называемый, эффект локализации. А именно, устанавливается такой режим притока и оттока влаги, что за конечное время t_c количество влаги стремится к бесконечности, но при этом граница перемещения влаги локализована в объеме $z \leq z_f$.

График распространения влаги вглубь почвы с течением времени представлен на рисунке 2.

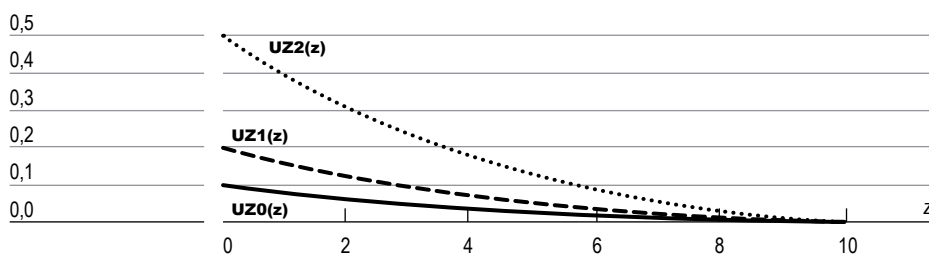


Рис. 2. Локализация влаги в почве при режиме с обострением.

Обсуждение результатов

Полученный выше результат можно сформулировать другими словами, а именно, когда имеет место режим с обострением, то приток влаги происходит намного быстрее оттока и влага не успевает уйти за определенную границу и происходит накопление (локализация) влаги, а это, в свою очередь, приводит к возникновению катастрофы, то есть к паводковым явлениям.

Для того чтобы указанную выше модель можно было реализовать на практике, необходима хорошая организация мониторинга бассейна реки.

Выводы

1. Предложена математическая модель паводка, рассматривающая процесс накопления влаги в бассейне реки, как режим с обострением.
2. Организация мониторинга за режимом осадков над территорией бассейна реки позволит определить необходимые параметры модели, по которым можно определить время наступления катастрофы.

Благодарности

Настоящая работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания (задание №2014/216, проект 653).

Библиографический список

1. Руководство по гидрологической практике. Т. II. Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов. ВМО № 168. Шестое издание. 2012. 324 с.
2. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Изд-во МГУ. 6-е издание. 1999. 799 с.
3. Bergström, S., 1992: The HBV model – its structure and applications. SMHI Reports RH, No. 4, Norrköping, Sweden.
4. Bergström, S., 1995: The HBV model. In Singh, V.P. (ed): Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications. Colorado, United States, 443, 476.
5. DHI (Danish Hydraulic Institute), 1985: Introduction to the SHE-European Hydrologic System, Horsholm.
6. Refsgaard, J.C. and M.B. Abbott, 1996: The role of distributed modeling in water resources management. In: M.B. Abbott and J. Ch. Refsgaard, (eds.), 1996: Distributed Hydrological Modeling, Water Science and Technology Library, Vol. 22, Kluwer, Dordrecht.

References

1. Rukovodstvo po gidrologicheskoy praktike. Tom II. Upravleniye vodnymi resursami i praktika primeneniya gidrologicheskikh metodov (Guide to Hydrological Practice). VMO № 168. Shestoye izdaniye. 2012. 324 s.
2. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. Uravneniya matematicheskoy fiziki (Equations of mathematical physics). M.: Izd-vo MGU. 6-ye izdaniye. 1999. 799 s.
3. Bergström, S., 1992: The HBV model – its structure and applications. SMHI Reports RH, No. 4, Norrköping, Sweden.
4. Bergström, S., 1995: The HBV model. In Singh, V.P. (ed): Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications. Colorado, United States, 443, 476.
5. DHI (Danish Hydraulic Institute), 1985: Introduction to the SHE-European Hydrologic System, Horsholm.
6. Refsgaard, J.C. and M.B. Abbott, 1996: The role of distributed modeling in water resources management. In: M.B. Abbott and J. Ch. Refsgaard, (eds.), 1996: Distributed Hydrological Modeling, Water Science and Technology Library, Vol. 22, Kluwer, Dordrecht.

УДК 911.2

Водопьянова Д.С. [Vodopyanova D.S.],
Скрипчинская Е.А. [Skripchinskaya E.A.],
Нефедова М.В. [Nefedova M.V.],
Диденко П.А. [Didenko P.A.]

АНТРОПОГЕННАЯ ПРЕОБРАЗОВАННОСТЬ И ПРИРОДНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ЛАНДШАФТОВ АПАНАСЕНКОВСКОГО РАЙОНА

Anthropogenic transformation and natural potential of landscapes of Apanasenkovsky district

В статье рассматриваются вопросы современного состояния и степень антропогенной преобразованности ландшафтов. В научном исследовании использована разработанная комплексная методика по определению зависимости антропогенной преобразованности от природного потенциала ландшафтов. На примере ландшафтов Апанасенковского района Ставропольского края проанализированы типы землепользования, проведена оценка антропогенной нагрузки, проанализирована динамика изменения площади антропогенно преобразованных земель и изменения состояния природных комплексов в ландшафтах, а так же оценка природного потенциала ландшафтов района, которая позволит решить задачи по повышению производительности и эффективности сельского хозяйства на изучаемой территории. Полученные результаты целесообразно использовать для устойчивого, сбалансированного развития природно-антропогенных геосистем, обеспечивающих возможность существования природы и общества в состоянии равновесия, что позволит равнозначно учитывать экологические, экономические и социальные критерии и сформировать оптимально сбалансированный агроландшафт с заданными параметрами функционирования.

The article analyzes the current state and the degree of anthropogenic transformation of landscapes on the basis of the on modern method. In scientific research, the developed complex methodology for determining the dependence of anthropogenic transformation on the natural potential of landscapes was used. The land-uses analyzed in the case of landscapes of the Apanasenkovsky district of the Stavropol Territory, the anthropogenic load assessment completed, the dynamics of the change in the area of anthropogenically transformed lands is analyzed and changes in the state of natural complexes in landscapes are revealed. The assessment of the natural potential of the landscapes of the region will allow solving the tasks of increasing the productivity and efficiency of agriculture in the study area. The obtained results will allow to correct the land-use planning methods. The obtained results should be used for sustainable, balanced development of natural-anthropogenic geosystems that ensure the existence of nature and society in a state of equilibrium, which will allow for the equal consideration of ecological, economic and social criteria and the formation of an optimally balanced agricultural landscape with specified parameters of functioning.

Ключевые слова: природный и антропогенный ландшафт, ландшафтный подход, антропогенная преобразованность, антропогенная нарушенность, природный потенциал.

Key words: natural and anthropogenic landscape, landscape approach, anthropogenic transformation, anthropogenic disturbance, natural potential.

Введение

На современном этапе на первый план выступает проблема оптимизации землепользования, обеспечение устойчивости и сохранения каркаса природных комплексов. Для поиска оптимального варианта взаимоотношений между человеком и природой необходимо знание процессов, про-

текающих в ландшафте, их направленность под влиянием хозяйственной деятельности человека. Оптимальной для решения данных задач является концепция ландшафтного подхода (Исаченко, 1992). Суть ландшафтного подхода состоит в системном анализе взаимодействия природной и антропогенной составляющих в современных ландшафтах и оценке результатов изменений и последствий, оказываемых на окружающую среду.

Преобразование и освоение ПТК должно основываться на принципах соответствия хозяйственной деятельности природным особенностям территории, соответствия границ сельскохозяйственных угодий границам природных комплексов (Виноградов, 1998). Чем более организована сельскохозяйственная геосистема, тем более она стабильна, устойчива, тем более она способна противостоять негативным воздействиям, оказываемым на нее.

В Ставропольском крае в виду его сельскохозяйственной специализации в настоящее время практически не осталось ландшафтов неизмененных антропогенной деятельностью. Изучением антропогенной преобразованности ландшафтов края занимаются Е.В. Витько (2003), И.Ю. Каторгин (2004), Д.В. Юрин (2006) и др.

Материалы и методы исследования

В ходе проведения научных исследований была разработана комплексная методика по определению степени антропогенной преобразованности ландшафтов, которая базируется на расчете коэффициентов антропогенного нарушения и необратимых антропогенных процессов, показывающих интенсивность антропогенной нагрузки в отдельных ландшафтах. Эта методика была использована при оценке структуры землепользования в ландшафтах Апанасенковского района края.

Апанасенковский район расположен в пределах полупустынной (Чограйско-Прикаспийского и Западно-Маньчского) и степной (Бурукшунский, Нижнекалаусский, Айгурский) ландшафтной провинции. *Сельское хозяйство на протяжении всей истории существования района было и остается ведущей отраслью. Производство жизненно важной сельскохозяйственной продукции и продуктов питания определяет его главную роль в обеспечении населения продовольствием. Сельскохозяйственная освоенность ландшафтов Апанасенковского района достигает более 90% от их общей площади.* Поэтому решение задач по оптимизации агроландшафтов должно опираться на систему показателей оценки преобразованности агроландшафтов Апанасенковского района.

Природные ландшафты и их морфологические единицы под влияние человеческой деятельности трансформируются в природно-антропогенные и антропогенные ландшафты. Степень антропогенной преобразованности зависит от типов землепользования, которые группируются, согласно классификации Ф.Н. Милькова (1990), в сельскохозяйственные геосистемы: поле-

вые, пастбищные и садово-огородные. Анализ результатов исследования свидетельствует о том, что полевые и пастбищные геосистемы в районе занимают наибольшую площадь (88,54 %), поэтому основными отраслями сельского хозяйства являются растениеводство (зерновое хозяйство) и животноводство. Земли, находящиеся в стадии восстановления плодородия и мелиоративного строительства занимают небольшие площади и составляют всего 1,2%. На природные геосистемы приходится всего 5,33 % от всей площади. Остальная площадь занята под сетью дорог, селитьбой, сенокосами и т.д.

Полевые геосистемы района занимают 138728 га в северо-восточной, северо-западной и южной частях района. На полях района выращивают пшеницу, ячмень, овёс, просо, горчицу. Пастбищные геосистемы занимают северные и центрально-восточные части района, их площадь – 19363 га. Садово-огородные геосистемы находятся в центральной и западной части района, занимая 171 га. На их территории выращивают овощи и бахчевые культуры.

Пастбищные системы занимают 126003 га (35%). Основная особенность современных пастбищ – приуроченность к землям, непригодным для распашки. Около 75% от естественных пастбищ в районе составляют сбитые пастбища, где распространена рудеральная растительность.

Садово-огородные системы получили небольшое развитие, в основном в окрестностях сел Дивное, Вознесеновское и Манычское. Небольшие садовые участки имеются в каждом хозяйстве района. Выращиваются семечковые плодовые (яблоки, груши, айва) и разнообразные косточковые (черешня, вишня, слива, абрикос, алыча). Следует отметить, что по сравнению с другими районами края в Апанасенковском районе эта важная отрасль слабо развита, несмотря на наличие благоприятных условий.

Оценка антропогенной преобразованности. Антропогенное воздействие оценивалось по наличию эрозионно опасных площадей в ландшафтах, по степени сельскохозяйственной освоенности и распаханности территории [Почвозащитное..., 1983; Носов, Кочуров, 1985] (табл. 1).

Таблица 1. ПОКАЗАТЕЛИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ОСВОЕННОСТИ И РАСПАХАННОСТИ ЛАНДШАФТОВ АПАНАСЕНКОВСКОГО РАЙОНА

Ландшафт	Сельскохозяйственная освоенность, %	Распаханность, %
Бурукшунский	98	90
Нижнекалаусский	80	72
Западно-Манычский	84	76
Айгурский	90	82
Чограйско-Прикаспийский	18	10

Из данных таблицы видно, что сельскохозяйственная освоенность территории ландшафтов достигает 80–98%, а распаханность 70–80%

Больше всего распаханы земли Айгурского (82%) и Бурукшунского (90%) ландшафтов. В Нижнекалаусском, Западно-Манычском ландшафтах она колеблется от 72 до 76%. Исключением является Чограйско-Прикаспийский ландшафт, в котором преобладают пастбища.

Группировка геосистем по типам землепользования позволила рассчитать индекс антропогенной преобразованности по методике С. И. Носова и Б.И. Кочурова (1985) (табл. 2). В качестве показателя антропогенного изменения предлагается индекс антропогенной преобразованности (I_a), равный произведению балла антропогенной преобразованности (r) на долю (%) данной территории в общей площади ландшафта (S): $I_a = r_s S$

Индекс антропогенной преобразованности ландшафта представляет сумму индексов антропогенной преобразованности изучаемых видов угодий и землепользований данного ландшафта: $I_{ал} = \sum I_a$

Результаты исследования и их обсуждение

В соответствии с итоговым показателем ($I_{ал}$) антропогенной преобразованности, наибольшая нагрузка наблюдается в Айгурском ландшафте (460,7). В Западно-Манычском ландшафте она составляет 443,9. Полевые геосистемы в этих ландшафтах имеют индекс 410; 380 соответственно, антропогенные – 11, 15, пастбищные геосистемы – 27,5; 47,5, садово-огородные – 10,8; 1,2. Природные геосистемы имеют индекс 1,4; 0,2. Такой большой итоговый показатель антропогенной преобразованности получен из-за большой распаханности в этих ландшафтах, большего индекса антропогенных и пастбищных геосистем (табл. 2).

Таблица 2. ИНДЕКСЫ АНТРОПОГЕННОЙ ПРЕОБРАЗОВАННОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ЛАНДШАФТОВ

Ландшафт	Геосистемы					Итоговый показатель Iал
	Сельскохозяйственные, Ia			При- родные	Антро- погенные	
	паст- бищные	садово- огородные	поле- вые			
Западно-Манычский	47,5	1,2	380	0,2	15	443,9
Бурукшунский	57,5	3,2	450	1,3	10	522
Нижнекалаусский	57,5	3,2	365	0,3	13	439
Чограйско- Прикаспийский	75,5	0,8	50	0,2	7,5	127,2
Айгурский	27,5	10,8	410	1,4	11	460,7

В Нижнекалаусском ландшафте нагрузка составляет 439. Полевые геосистемы в этом ландшафте имеют индекс 365, антропогенные – 13, пастбищные – 57,5, садово-огородные – 3,2. Природные геосистемы имеют индекс 0,3. В Бурукшунском ландшафте итоговый показатель составляет 522. Полевые геосистемы в этом ландшафте имеют индекс 450, антропогенные – 10, пастбищные – 57,5, садово-огородные – 3,2. Природные геосистемы имеют индекс 1,3.

Наименьший итоговый показатель антропогенной преобразованности имеет Чограйско-Прикаспийский ландшафт (127,7). В этом ландшафте наибольший показатель характерен для пастбищ – 75,5. Индекс антропогенной преобразованности полевых геосистем – 50, антропогенных – 7,5. Садово-огородные геосистемы почти отсутствуют и природные составляют всего 0,2.

Данные по антропогенной преобразованности изучаемых ландшафтов позволили рассчитать коэффициенты антропогенного нарушения и необратимых антропогенных процессов (табл. 3).

На базе $K_{ан}$ выделяется три группы ландшафтов по степени их антропогенной нарушенности (Шальнев, Диденко, 1998):

- слабонарушенные, где $K_{ан} = 0,1 - 0,3$;
- нарушенные, $K_{ан} = 0,4 - 0,6$;
- сильнонарушенные, $K_{ан} = 0,7 - 1$.

По степени необратимых антропогенных процессов ($K_{нап}$) выделяются три категории ландшафтов:

- слабонарушенные, где $K_{нап} = 0 - 0,29$. Здесь природные экосистемы могут еще восстанавливаться в близком к первоначальному варианту;

Таблица 3. КОЭФФИЦИЕНТ АНТРОПОГЕННОЙ НАРУШЕННОСТИ И НЕОБРАТИМЫХ АНТРОПОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Ландшафт	$K_{ан}$	$K_{нап}$
Западно-Маньчский	0,98	0,80
Бурукшунский	0,98	0,75
Нижнекалаусский	1	0,84
Чограйско-Прикаспийский	0,53	0,42
Айгурский	0,98	0,87

- критические, $K_{\text{нап}} = 0,3 - 0,79$;
- разрушенные, $K_{\text{нап}} = 0,8 - 1$.

Все пять ландшафтов относятся к категории сильнонарушенных с $K_{\text{ан}}$ более 0,9. По данным $K_{\text{нап}}$ к категории критических относятся Чограйско-Прикаспийский и Нижнекалаусский ландшафты. К разрушенным относятся Айгурский, Бурукшунский и Западно-Манычский.

Применение ГИС-технологий позволяет дополнить сведения об антропогенно-преобразованных землях и изменениях состояния природных комплексов в ландшафтах. Проводить такие исследования позволяет программа MapInfo. Для исследования дешифрировались снимки спутников за 1985 и 2015 годы. На территории района произошло резкое сокращение площади орошаемых земель в сравнении с 1985 годом. Общая площадь орошаемых земель в 2015 году составила всего 12,5 км². Они сохранились в районе Дивненского канала (с. Вознесенское, с. Воздвиженское) и Дундинского водохранилища (с. Малая Джалга), так как искусственное орошение в настоящее время считается затратным. Требуется принятие срочных мер по реконструкции оросительных каналов, так как район находится в засушливой климатической зоне.

Общая площадь населенных пунктов в 1985 г., по результатам оцифровки, составила 72,5 км². Самую большую площадь имеют районный центр – с. Дивное (15,8 км²), с. Рагули – 11,5 км², с. Манычское – 8,1 км². Анализ космических снимков позволил получить новые данные об увеличении площади сельских населенных пунктов к 2015 г. на 1,5 км² за счет земель сельскохозяйственного назначения в селе Дивном (на 0,7 км²), Малая Джалга (на 0,3 км²), Киевка (на 0,3 км²), и в поселке Водный (на 0,2 км²). В остальных населенных пунктах площади изменились незначительно.

К 2015 г. претерпели изменения также площади земель сельскохозяйственного назначения, населенных пунктов, специального назначения, государственного лесного и водного фондов. Все это повлияло на структуру угодий и их границы.

В Апанасенковском районе были распаханы целинные земли и к 2015 году произошло дальнейшее расширение площади пашен. С 1985–2015 гг. их площадь увеличилась на 243 км². Основные земли были распаханы вблизи рек (восточная часть района).

Пастбища – один из основных источников дешёвого и наиболее ценного зелёного корма для сельскохозяйственных животных. Однако к началу 1998 года поголовье овец в районе сократилось в три раза. Попытки снизить затраты на содержание овец привели к снижению уровня воспроизводства и продуктивности животных. В связи с этим целинные земли подверглись распашке и были отведены под посевы злаковых культур. К 2015 г. площадь пастбищ уменьшилась на 152 км² и составила 874 км².

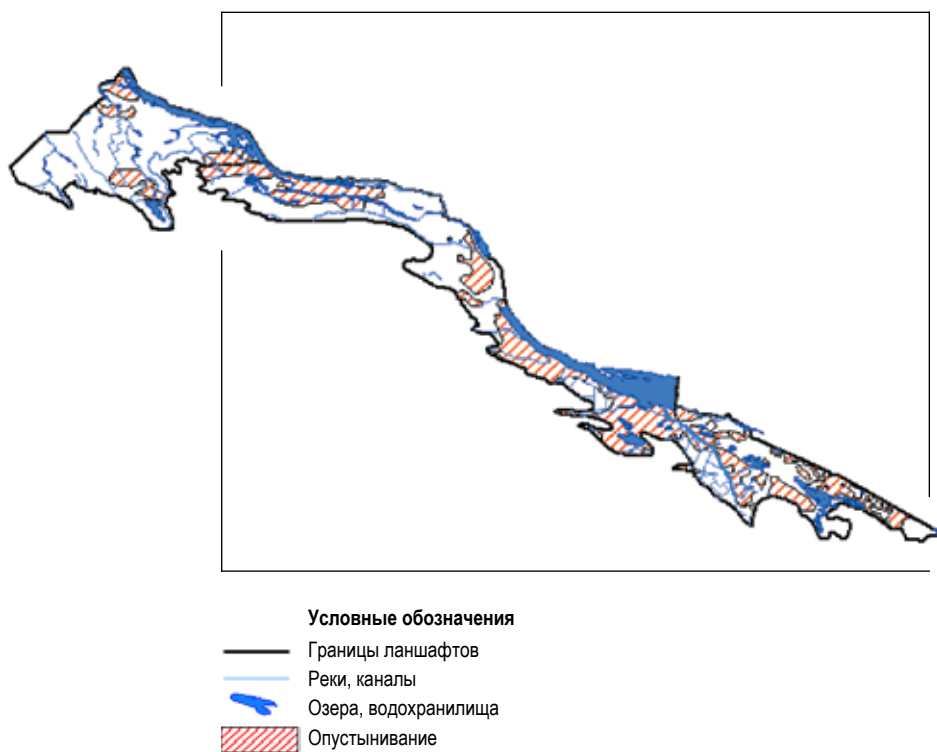


Рис. 1.

Процессы опустынивания в ландшафтах Кумо-Манычской впадины.

Хозяйственная деятельность активизировала процессы опустынивания. Для выявления процесса опустынивания была использована технология создания мультиканального изображения на основе космических снимков Landsat ETM+ с комбинацией каналов 7,4,2 и ГИС-технологий, заложенных в инструментарий ГИС-пакета ERDAS Imagine 8.7. Комбинация каналов 7,4,2 (7 – инфракрасный диапазон с длиной волны 2,09–2,35 мкм, 4 – ближний инфракрасный диапазон – 0,75–0,90 мкм, 2 – желтый и зеленый диапазоны спектра – 0,525–0,605 мкм) дает прекрасные результаты при анализе растительного покрова. При проведении процедуры неконтролируемой классификации были выделены участки с отсутствием растительного покрова (пашня и территория, подверженная процессам опустынивания), участки со здоровой растительностью и территория покрытая водой.

Классифицированное изображение в дальнейшем послужило для создания векторного слоя «Опустынивание», который позволил с использованием операции оверлея найти долю опустыненных земель в ландшафтах (рис. 1).

Главная проблема и опасность современной антропогенной преобразованности заключается в несоответствии безграничных потребностей человечества и ограниченных возможностей самой природы. Данные о современном состоянии территориальных комплексов, показатели нагрузок являются основой разработки необходимых мероприятий с целью уменьшения или предотвращения неблагоприятных процессов. Поэтому большое значение в развитии региона имеет территориальная парадигма. Ее суть состоит в том, что территория рассматривается как арена взаимодействия различных движущих сил – природных и общественных. В этом случае территория рассматривается и как ресурс, и как особым образом организованное пространство. Территориальность есть не что иное, как потенциальные возможности территории (Исаченко, 1992). В соответствии с генетической классификацией природные ресурсы делят на ресурсы природных компонентов и ресурсы природно-территориальных комплексов.

Для решения задач по повышению производительности и эффективности сельского хозяйства вводится понятие «природный потенциал территории» (Исаченко, 2000). В этот термин включена совокупность природных ресурсов и условий, необходимых для развития сельского хозяйства. Его можно определить как совокупность природных ресурсов, обеспечивающих потенциальные возможности формирования и функционирования различных видов хозяйственной деятельности на территории данного ПТК. Такое понимание природного потенциала предполагает расчет суммарного природного потенциала, включающего в себя частные потенциалы отдельных компонентов.

Оценка природного потенциала осуществляется с учетом специфики и потребностей природопользования на ландшафтной основе (компоненты ландшафта и территориальные структуры). Оценка каждого показателя должна базироваться на выявлении зависимости между значениями этого показателя и соответствующим ему состоянием сельскохозяйственной системы (Мухина, 1973). Наиболее существенное влияние на сельскохозяйственное производство оказывают климатический и почвенный потенциалы, степень расчлененности и разнообразие морфологической структуры ландшафтов.

Оценка рельефа местности проводилась по показателям крутизны склонов, оценки склонов по протяженности и густоте расчлененности рельефа. Оценка крутизны склонов ландшафтов Ставропольского края проводилась на основе морфометрических показателей рельефа [Каторгин, 2008].

Почвенные ресурсы изучались по литературным и картографическим источникам. Основное внимание уделялось содержанию гумуса, кислотно-щелочной реакции pH, механическому составу и содержанию солей в почвах использовались данные А.Н. Есаулко (2007).

Агроклиматический потенциал рассчитывался на основе данных о гидротермическом коэффициенте (ГТК) по методике Г.Т. Селянинова. Континентальность территории Апанасенковского района определили по данным С.А. Антонова (2009) (табл. 4).

Биоклиматический потенциал (БКП) рассматривается как возможная биологическая продуктивность земель по главным показателям климата – теплу и влаге. БКП позволяет не только качественно, но и количественно оценить биологическую продуктивность земель.

Оценку частных потенциалов предлагается проводить по 5-балльной системе. Для получения общей оценки ландшафта суммировались баллы частных потенциалов, которые отражают степень благоприятности ландшафта для сельскохозяйственного землепользования (табл. 4).

Для исследуемой территории максимальная густота расчленения рельефа (К) характерна для Бурукшунского ландшафта. В Айгурском и Нижнекалаусском ландшафтах густота расчленения составляет 33% от минимального расчленения в районе. Близкий показатель принадлежит Западно-Манычскому ландшафту – 23%. Сильно выделяется Чограйско-Прикаспийский ландшафт – всего 3%, что сказывается на итоговом показателе при проведении оценки природного потенциала ландшафтов Апанасенковского района.

Оценка почвенных ресурсов, в частности показатель pH изменяется в диапазоне от 1,5 до 2,9. Наибольший показатель pH принадлежит Бурукшунскому ландшафту. Высокие значения имеют Айгурский и Нижнекалаусский ландшафты – 2,5. Наименьший показатель кислотности почвы характерен для Западно-Манычского и Чограйско-Прикаспийского ландшафтов.

Оценка агроклиматического потенциала, включающая данные гидротермического коэффициента (ГТК) показывают максимальные значения по следующим ландшафтам в пределах Апанасенковского района – Айгурский, Нижнекалаусский и Бурукшунский ландшафты – по 0,95 (100%). Снижается данный коэффициент в Западно-Манычском ландшафте до 77 %, а минимальное значение характерно для Чограйско-Прикаспийского (69 %). Гидротермический коэффициент сильно влияет на биологическую эффективность климата, в связи, с чем снижение данного показателя почти в половину от максимального значения внутри ландшафтов района существенно влияет на итоговые значения суммарной оценки природного потенциала ландшафтов изучаемого района.

Природный потенциал ландшафтов Апанасенковского района различный, в связи, с чем и территории испытывают различные антропогенные нагрузки. Анализ данных полученных при проведении итоговой оценки при-

Таблица 4. ОЦЕНКА ПРИРОДНОГО ПОТЕНЦИАЛА ЛАНДШАФТОВ
АПАНАСЕНКОВСКОГО РАЙОНА

Ландшафты	Оценка крутизны склона			Оценка склонов по протяженности			Густота расчленения рельефа		Оценка почвенных ресурсов
	Крутизна склона, в градусах	Оценка склонов по крутизне	Балл	Протяженность, м	Склоны	Балл	Густота расчленения (К), км/км²	Балл	
Западно-Манычский	2–5	покатые	2	Более 500	Длинные	0	0,07	4	Супесчаный и тяжело-суглинистый
Чограйско-Прикаспийский	1–2	пологие	3	Более 500	Длинные	0	0,01	4	Супесчаный и тяжело-суглинистый
Бурукшунский	менее 1	слабо-пологие	4	200–500	Средней длины	1	0,3	3	Глинистый и песчаный
Нижнекалаусский	менее 1	слабо-пологие	4	200–500	Средней длины	1	0,1	3	Супесчаный и тяжело-суглинистый
Айгурский	менее 1	слабо-пологие	4	200–500	Средней длины	1	0,1	3	Супесчаный и тяжело-суглинистый

родного потенциала ландшафтов Апанасенковского района выявил наиболее высокий потенциал в Нижнекалаусском ландшафте – 23, очень высокий в ландшафтах – Бурукшунском и Айгурском. Степные ландшафты Апанасенковского района обладают относительно высоким природно-ресурсным потенциалом, в них преобладают полевые геосистемы. Эти ландшафты являются самыми нарушенными на данной территории.

Снижение итогового показателя характерно для двух ландшафтов – Западно-Манычского и Чограйско-Прикаспийского (83 и 78 %, соответственно). Эти ландшафты относятся к полупустынной провинции и отличаются наиболее засушливым климатом. В связи с этим и качество почв не отличается высокими показателями, почвы полупустынных ландшафтов отличаются кислой реакцией и являются сильнозасоленными. Эти почвы потенциально плодородны, но эффективное плодородие их низко. В основном их отво-

					Оценка агроклиматического потенциала					
Содержание гумуса	pH	Содержание солей	Балл	ГТК	Увлажнение	БКП	Балл	Группировка локальных ПТК по категориям	Итого	
Слабогумусированные	1,5	Сильно-засоленные	5	0,73	Засушливый	Повышенный	4	4	19	
Слабогумусированные	1,2	Сильно-засоленные	5	До 0,66	Очень засушливый	Повышенный	3	4	18	
Слабогумусированные	2,9	Средне-засоленные	5	0,9-0,95	Неустойчиво влажный	Повышенный	5	4	22	
Слабогумусированные	2,5	Средне-засоленные	6	0,9-0,95	Неустойчиво влажный	Средний	5	4	23	
Слабогумусированные	2,5	Средне-засоленные	6	0,9-0,95	Неустойчиво влажный	Средний	5	3	22	

дят под пастбища. В Западно-Манычском ландшафте преобладают полевые геосистемы, поэтому показатель антропогенной преобразованности здесь достаточно высокий. В Чограйско-Прикаспийском ландшафте доминируют пастбищные геосистемы, которые являются наиболее оптимальными для подобных территорий, что подтверждается низким показателем антропогенной преобразованности.

Выводы

Основными лимитирующими факторами при организации пространственной структуры агроландшафтов на территории Апанасенковского района являются почвенные, климатические ресурсы и особенности рельефа. Таким образом,

наблюдается прямая зависимость между природно-ресурсным потенциалом территории и ее антропогенной преобразованностью. Чем ниже природно-ресурсный потенциал и интенсивнее используется территория, тем выше показатель антропогенной преобразованности.

Сочетание в методике оценки природно-ресурсного потенциала и показателей антропогенной преобразованности позволяет выявить недостатки в использовании геосистем и разработать рекомендации для оптимизации. Зная реальное состояние системы можно предотвратить нарушение устойчивого функционирования. Данную методику целесообразно использовать для устойчивого, сбалансированного развития природно-антропогенных геосистем, обеспечивающих возможность существования природы и общества в состоянии равновесия, что позволит равнозначно учитывать экологические, экономические и социальные критерии и сформировать оптимально сбалансированный агроландшафт с заданными параметрами функционирования.

Библиографический список

1. Антонов С.А. Динамика агроклиматических ресурсов агроландшафтов Ставропольского края и направления оптимизации систем земледелия: дисс. канд. геогр. наук / С.А. Антонов. Ставрополь, 2009. 180 с.
2. Виноградов Б.В. Основы ландшафтной экологии. М.: ГЕОС, 1998. 418 с.
3. Есаулко, А.Н., Мониторинг плодородия почв Ставропольского края/ А.Н. Есаулко, А.И. Подколзин, М.С. Сигида // Материалы Третьей Международной научно-практической конференции «Эволюция и деградация почвенного покрова» (26–28 сентября 2007 г., Ставрополь). Ставрополь: СтГАУ, 2007. С. 31–35.
4. Исаченко А. Г. Ресурсный потенциал ландшафта и природно-ресурсное районирование // Известия РГО. 1992. Вып. 3. С. 94–115.
5. Исаченко А.Г. Экологический потенциал ландшафта, расселение, хозяйственная освоенность территории // География: на грани веков. Труды XI съезда РГО. СПб., 2000. С. 39–52.
6. Каторгин И.Ю. Анализ морфометрических показателей рельефа ландшафтов Ставропольского края (на примере крутизны склонов) //Вопросы географии и краеведения. – Ставрополь, 2008. – С. 22–28.
7. Мильков Ф.Н. Общее землеведение. М.: Высшая школа, 1990. 335 с.

8. Мухина Л.И. Принципы оценки природных комплексов при разных видах освоения. // Географические проблемы изучения, охраны и рационального использования природных условий и ресурсов Северного Кавказа. Ставрополь, 1973. С. 23–24.
9. Носов С. И., Кочуров Б. И. Оценка антропогенного изменения территории // География и природные ресурсы. 1985. №1. С. 115–119.
10. Селянинов Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии, 1928. Вып. 20. С. 164–177.
11. Шальнев В.А., Диденко П.А. Ландшафтно-экологический подход и ландшафтно-адаптивные системы сельхозугодий. В сб. Горные и склоновые земли России. Пути предотвращения деградации и восстановления их плодородия. Владикавказ, 1998. С. 29–31.

References

1. Antonov S.A. Dinamika agroklimaticheskikh resursov agrolandshaftov Stavropol'skogo kraya i napravleniya optimizatsii sistem zemledeliya (Dynamics of agro-climatic resources of agricultural landscapes of agricultural landscapes and directions of optimization of systems of agriculture): Diss. kand. geogr. nauk / S.A. Antonov. Stavropol'. 2009. 180 s.
2. Vinogradov B.V. Osnovy landshaftnoy ekologii (Fundamentals of landscape ecology). M.: GEOS, 1998. 418 s.
3. Yesaulko, A.N., Monitoring plodorodiya pochv Stavropol'skogo kraya (Monitoring of soil fertility of the Stavropol Territory)/ A.N. Yesaulko, A.I. Podkolzin, M.S. Sigida // Materialy Tret'yey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Evolutsiya i degradatsiya pochvennogo pokrova» (26–28 sentyabrya 2007 g., Stavropol') / StGAU. Stavropol', 2007. S. 31–35.
4. Isachenko A.G. Resursnyy potentsial landshafta i prirodno-resursnoye rayonirovaniye (The resource potential of landscape and natural-resource zoning) // Izvestiya RGO. 1992. Vyp. 3. S. 94–115.
5. Isachenko A.G. Ekologicheskii potentsial landshafta, rasseleniye, khozyay-stvennaya osvoyennost' territorii (Ecological potential of the landscape, settlement, economic development of the territory)// Geografiya: na grani vekov. Trudy XI s"yezda RGO. SPb., 2000. S. 39–52.
6. Katorgin I.YU. Analiz morfometricheskikh pokazateley rel'yefa landshaftov Stavropol'skogo kraya (na primere krutizny sklonov) (Analysis of morphometric indices of the landscape relief of the Stavropol Territory (for example, the steepness of the slopes))//Voprosy geografii i krayevedeniya. Stavropol', 2008. S. 22–28.
7. Mil'kov F.N. Obshcheye zemlevedeniye (General Geography). M.: Vysshaya shkola, 1990. 335 s.

8. Mukhina L.I. Printsipy otsenki prirodnnykh kompleksov pri raznykh vidakh osvoyeniya (Principles of assessment of natural complexes for various types of development) // Geograficheskiye problemy izucheniya, okhrany i ratsional'nogo ispol'zovaniya prirodnnykh usloviy i resursov Severnogo Kavkaza. Stavropol', 1973. S. 23–24.
9. Nosov S. I., Kochurov B. I. Otsenka antropogennogo izmeneniya territorii (Anthropogenic change assessment of the territory) // Geografiya i prirodnnyye resursy. 1985. № 1. S. 115–119.
10. Selyaninov G.T. O sel'skokhozyaystvennoy otsenke klimata (About agricultural climate assessment) // Trudy po sel'skokhozyaystvennoy meteorologii, 1928. Vyp. 20. S. 164–177.
11. Shal'nev V.A., Didenko P.A. Landshaftno-ekologicheskyy podkhod i landshaftno-adaptivnyye sistemy sel'khozugodiy (Landscape-ecological approach and landscape adaptive farmland systems). V sb. Gornyye i sklonovyye zemli Rossii. Puti predotvrashcheniya degradatsii i vosstanovleniya ikh plodorodiya. Vladikavkaz, 1998. S. 29–31.

УДК 338.48

**Кушнир К.В. [Kushnir K.V.],
Ивлиева О.В. [Ivliyeva O.V.]**

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТУРИСТСКО-
РЕКРЕАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА
КАК ФАКТОР ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО
РАЗВИТИЯ
(пример Азовского побережья России)**

**Efficiency of tourist and recreational complex as
a factor of territorial development
(in case of Russian Azov sea coast)**

В современных геополитических и экономических условиях туристско-рекреационный комплекс может выступить в качестве эффективной площадки по реализации туристско-рекреационного потенциала территории. В статье определена система показателей эффективности функционирования туристско-рекреационного комплекса, произведена оценка показателей уровня развития туризма и социально-экономического положения муниципальных районов Азовского побережья России. Использована методика многомерного сравнительного анализа, математические приёмы стандартизации показателей. Выявлены районы с высоким уровнем развития туризма и районы, требующие активизации туристской отрасли. Результаты проведенных исследований показали, что все районы Азовского побережья России имеют высокий и выше среднего уровни социально-экономического положения относительно средних показателей по исследуемому региону и располагают необходимыми социально-экономическими условиями для перспективного развития туристской отрасли. Используются ГИС-технологии для визуализации, полученных результатов. В заключении предложены виды туризма, которые целесообразно развивать по каждой группе районов.

In case of modern geopolitical and economic conditions the tourist and recreational complex can act as the effective platform in realization and advance of tourist and recreational capacity of territory. The article defines the criteria and assesses the indicators of the level of tourism development and social-economic well-being of the municipal areas of the Eastern Priazovye by technique of the multidimensional comparative analysis with mathematical methods of standardization indicators. It was identified the areas with a high level of tourism development and the areas that require the revitalization of the tourism industry. According to results, it can be argued that all areas of the Russian Azov Sea coast have high levels of social-economic well-being. In conclusion it was determinate that all municipal areas of the Russian Azov Sea coast have necessary social and economic conditions for development of tourist branch. In paper also used GIS-technologies for visualization of modern results. In conclusion were offered types of tourism which are expedient for developing on each group.

Ключевые слова: туристско-рекреационный комплекс, туристско-рекреационный потенциал, интегральные показатели, социально-экономическое положение, Азовское побережье России.

Key words: tourist and recreational complex, tourist and recreational potential, integrated indicators, social and economic wellbeing, Russian coast of Azov Sea.

Введение

К настоящему времени разработана и апробирована система методов и подходов по формированию, организации и оценке деятельнос-

ти туристско-рекреационных комплексов в России. Необходимость в создании таких методик возникла в связи с направленностью государства развивать внутренние направления нашей страны и ориентацией на региональный туризм. Несмотря на безусловный уникальный туристский потенциал нашей страны, наблюдаются значительные диспропорции в расположении туристско-рекреационных ресурсов по ее территории.

На территории Российской Федерации давно сложились регионы-лидеры по популярности среди внутренних и иностранных туристов, связано это главным образом с наличием туристских ресурсов и развиваемой туристской инфраструктурой. Например, Краснодарский край, и в частности Черноморское побережье, является одним из главных туристских регионов страны. Он принимает практически треть внутреннего турпотока РФ. Количество отдыхающих, посетивших Краснодарский край в 2015 году – 14,8 млн человек. В структуре доходов ВРП региона доходы от предприятий санаторно-курортного и туристского комплекса составляют не менее 13% (по данным Краснодарстата за 2016 г. – до 20%), так как он взаимосвязан с более чем 20 смежными отраслями народного хозяйства [10].

Вместе с тем, в нашей стране расположены территории со слабо освоенным туристско-рекреационным потенциалом, для которых требуются новые подходы и методики в оценке эффективности реализации их ресурсов и потенциала в целом.

Целью работы

является представление туристско-рекреационного комплекса в России, как проекта по эффективному использованию туристского потенциала, и в тоже время как одного из факторов повышения социально-экономического положения муниципальных субъектов.

Пространственные рамки

исследования определяются 13-ю муниципальными районами, выходящими на побережье Азовского моря в России.

Временные рамки исследования.

Изучением российского побережья Азовского моря авторы занимаются с 2013 года. Научный задел по теме исследований лег в основу данной работы [3–5,8]. Все анализируемые статистические данные использованы за 2016 год, поскольку только с 2016 года муниципальными районами (в том числе в Республике Крым) собран весь спектр данных по используемым авторами показателям для оценки туристско-рекреационного потенциала.

Научным сообществом сформированы различные подходы к определению туристско-рекреационного комплекса (ТРК). Все формулировки этого понятия можно разделить по определенным признакам, на который они ори-

ентированы, например инфраструктурный, территориальный или отраслевой. Так, А.Д. Чудновский [19] определяет туристско-рекреационный комплекс по инфраструктурному признаку как совокупность средств размещения, транспортных средств, объектов общественного питания, развлекательного, познавательного, делового, оздоровительного, спортивного и иного назначения, организаций осуществляющих экскурсионные услуги и услуги гидов переводчиков. Е.А. Котляров [6], руководствуясь территориальным признаком, дал следующее определение ТРК – часть общего хозяйственного комплекса территорий разного уровня, сочетание рекреационных учреждений и сопутствующих предприятий инфраструктуры. Отраслевой признак выражен в определении Г.М. Малышевой [11], которая в ТРК видит новые форматы кооперирования рекреационных и сопутствующих отраслей.

В широком смысле, **туристско-рекреационный комплекс (ТРК)**, по мнению авторов, это результат реализации туристско-рекреационного потенциала территории сочетающий инфраструктурную и ресурсную составляющие.

Возможность реализации проектов туристско-рекреационного освоения территорий в рамках туристско-рекреационного комплекса определяется наличием туристско-рекреационного потенциала. Обобщая определения С.А. Севастьяновой, Д.С. Ушакова, Дж. Крипендорфа и др. ученых **туристско-рекреационный потенциал** следует интерпретировать как совокупность природных, историко-культурных ресурсов территории и социально-экономических условий в которых они могут быть реализованы.

Материалы и методы исследования

Исследуя современную систему методов и подходов к оценке туристско-рекреационного комплекса, можно констатировать, что к настоящему времени нет единых общепринятых измерительных единиц, которые бы могли комплексно всесторонне оценить туристско-рекреационный потенциал территории. Единственным авторитетным рейтингом, по мнению специалистов туристской индустрии, считается созданный Центром по глобальной конкурентоспособности и эффективности «Индекс конкурентоспособности туризма» [7]. Он оперирует 75-ю показателями, объединенными в 14 групп, разделенных по различным аспектам развития туризма. Такой подход способен всесторонне оценить и туристско-рекреационный потенциал, но закономерной сложностью тут является невозможность его применения на муниципальном уровне.

Широко применим опыт интегральных оценок [1,2,7]. Полученные по разным блокам классификации, они дают возможность проведения дальнейших операций для получения более сложных показателей. Так, при суммировании оценок блоков природного, историко-культурного потенциалов, социально-экономических условий представляется возможным сформировать комплексный показатель туристско-рекреационного потенциала регионов.

С целью оценки туристско-рекреационного потенциала и деятельности туристско-рекреационного комплекса на побережье Азовского моря авторами разработана система критериев, позволяющая получить интегральный показатель туристско-рекреационного потенциала в муниципальных районах исследуемого региона. Комплекс показателей ориентирован на официальные данные Федеральной Государственной статистики (РостовСтат, КраснодарСтат и КрымСтат) [16–18] и при этом максимально охватывает все аспекты функционирования туристской отрасли и социально-экономические условия развития районов. Блоки показателей G1–G5 определяют современное состояние индустрии туризма, оперируя основными критериями: туристским потоком, средствами размещения, туристскими объектами (природные объекты, учреждения культурно-досуговой сферы, объекты общественного питания, спортивные объекты, количество туристских маршрутов, туристские компании), транспортным обеспечением. В социально-экономическом аспекте их дополняют показатели блоков G6–G12, которые позволяют получить представление о социально-экономическом состоянии районов, опираясь на разработанную систему показателей в [1], при этом учитывая муниципальный уровень сбора статистических данных, оперируют доступными в [16–18] показателями (табл. 1).

Таблица 1. СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТУРИСТСКО-РЕКРЕАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА В РАЙОНАХ АЗОВСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ РОССИИ [составлено по 1, 2, 7, 9, 11–13]

Группа	Перечень показателей
G 1 Население	1. Плотность населения, чел. на 1 км ²
G 2 Туристский трафик (поток)	2. Показатель туристского потока, чел.
G 3 Коллективные средства размещения	3. Показатели плотности КСР, мест на 1000 кв. км. 4. Показатели обеспеченности КСР, мест на 1000 жителей
G 4 Туристско-рекреационные объекты	5. Показатель учреждений культурно-досугового типа, ед. 6. Показатель природного потенциала (кол-во природных объектов и ООПТ), ед. 7. Показатель спортивных объектов, ед. 8. Показатель сферы общественного питания, ед. 9. Показатель разнообразия экскурсионных маршрутов, ед. 10. Показатель туристских организаций (ТА, ТО, ТИЦ)
G 5 Транспортное обеспечение	11. Плотность автодорог, км на 1000 км ² 12. Разнообразие видов транспорта, балл
G 6 Инвестиции	13. Инвестиции в основной капитал, млн руб.

Группа	Перечень показателей
G 7 Демографические показатели	14. Численность всего населения на 1.01.16 г. 15. Общий коэффициент рождаемости, промилле. 16. Коэффициент естественного прироста, промилле. 17. Общий коэффициент смертности, промилле
G 8 Благоустройство	18. Протяженность автодорог общего пользования местного значения, находящихся в собственности муниципальных образований на конец года, км. 19. Общее протяжение освещенных частей улиц, проездов, набережных и т.п., км. 20. Ввод в действие общей площади жилых домов, кв. м общей площади 21. Число семей, получивших жильё и улучшивших жилищные условия, единиц
G 9 Труд	22. Среднесписочная численность работников организаций, чел. 23. Численность работников музеев, человек. 24. Численность специалистов культурно-досуговой деятельности в учреждениях культурно-досугового типа, человек
G 10 Экономика	25. Валовые сборы сельскохозяйственных культур, центнер. 26. Индекс производства продукции животноводства (в сопоставимых ценах; в процентах к предыдущему году), процент. 27. Наличие сельскохозяйственной техники в сельхоз организациях, тракторы. 28. Индекс производства продукции сельского хозяйства (в сопоставимых ценах; в процентах к предыдущему году), процент. 29. Число рынков на 1-й квартал 2016, единиц. 30. Финансовый результат прибыльных организаций, тыс. руб. 31. Дебиторская задолженность, тыс. руб. 32. Кредиторская задолженность, тыс. руб. 33. Объем инвестиций в основной капитал (за исключением бюджетных средств), млн руб. 34. Наличие основных фондов на конец года по полной учетной стоимости по некоммерческим организациям, тыс. руб. 35. Отгружено товаров собственного производства, выполнено работ и услуг собственными силами (без субъектов малого предпринимательства), тыс. рублей. 36. Оборот розничной торговли (без субъектов малого предпринимательства), тыс. руб.
G11 Уровень жизни	37. Среднемесячная начисленная заработная плата январь-декабрь, руб. 38. Фонд зарплатной платы по всем видам э.д. (январь-июнь 2017), тысяча рублей. 39. Обеспеченность врачами на 10 тыс. населения, чел.
G12 Экологические показатели	40. Выброшено в атмосферу загрязняющих веществ, отходящих от стационарных источников – всего, тыс. тонн. 41. Количество объектов, имеющих стационарные источники загрязнения атмосферного воздуха, единица. 42. Текущие (эксплуатационные) затраты на охрану окружающей среды, включая оплату услуг природоохранного назначения, тыс. руб.

Таким образом, операционно-территориальные единицы – муниципальные районы Азовского побережья России (13) были охарактеризованы качественными и количественными показателями, которые для объективного сравнения были переведены в относительные величины – стандартизированы (нормированы).

Н.В. Ворошилов, Е.С. Губанова [1] предложили современную методику расчёта интегральных показателей.

Все показатели были рассчитаны по формулам 1 (для прямых) и 2 (для обратных показателей):

$$K_i = X_i / X_{ср i} \quad (1),$$

$$K_i = X_{ср i} / X_i \quad (2),$$

где K_i – стандартизированный коэффициент, который рассчитанный по формуле 1 для прямых показателей, и по формуле 2 – для обратных;

X_i – значение i -го показателя в муниципальном районе,

$X_{ср i}$ – среднее значение i -го показателя по всем муниципальным районам.

Обратные показатели 40 и 41 в группе G12 «Экологические показатели», 17 в группе G7 «Демографические показатели» и 31, 32 в группе G 10 Экономика.

Расчет интегрального показателя туристско-рекреационного потенциала производился по формуле:

$$I_{\text{общ. TRP}} = (G1+G2+G3+G4+G5+G6+G7+G8+G9+G10+G11+ G12)/13,$$

где $I_{\text{общ. TRP}}$ – интегральный показатель туристско-рекреационного потенциала; показатели групп G1–G11, 13 – общее количество муниципальных районов в исследуемом регионе.

Типологизация была проведена по средневзвешенному показателю. По мнению авторов, это оптимальный вариант при оценке потенциала отдельно взятой территории, поскольку туристско-рекреационные ресурсы регионов России отличаются по количественному и качественному составу, что не позволяет сравнивать их в рамках единой группировки (табл. 2). Все субъекты на основе сравнения полученных показателей были разбиты на четыре группы.

Таблица 2. ТИПОЛОГИЗАЦИЯ (ГРУППИРОВКА) РАЙОНОВ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ ТРП [СОСТАВЛЕНО АВТОРАМИ]

Уровень	Диапазон Iобщ. (стандартизация по формулам 1 и 2)
Высокий	$I \geq 2,6$
Выше среднего	$2,0 \leq I \leq 2,5$
Средний	$1,5 \leq I < 2,0$
Низкий	$I < 1,5$

Результаты и обсуждение

С помощью ГИС-технологий (программного обеспечения ArcGIS) результаты проведенной комплексной оценки туристско-рекреационного потенциала (ТРП) территории российского побережья Азовского моря визуализированы на карте-схеме рисунка 1, представлены проведенным туристско-рекреационным районированием.

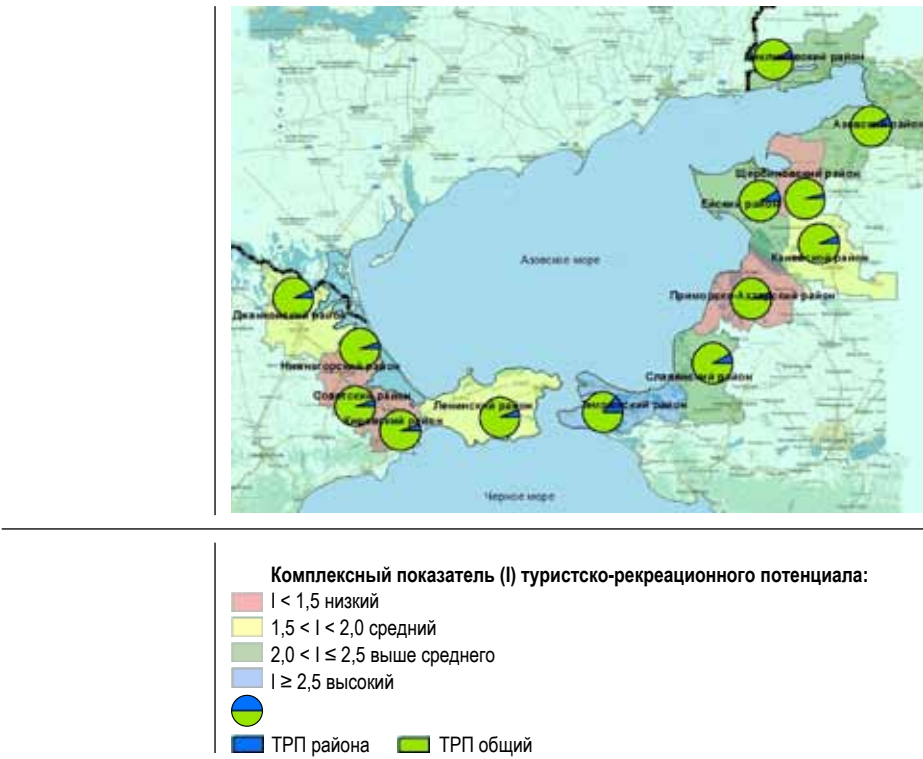


Рисунок 1. Карта-схема туристско-рекреационного потенциала муниципальных районов Азовского побережья России.

Цветовая палитра районов представляет группы с уровнем ТРП, диаграммы акцентируют внимание на долевое соотношение ТРП каждого муниципального района в общем ТРП в исследуемом регионе.

Первая – группа – районы-лидеры, в нее вошел Темрюкский район с наивысшим интегральным показателем – 4,47. Туристско-рекреационный потенциал Темрюкского района составил 17 % от общего по всему Азовскому побережью России. Туристско-рекреационные условия здесь позволяют развивать многие виды туризма (пляжный, спортивный, культурно-познавательный, лечебно-оздоровительный, экологический, сельский, этнографический и др.).

Ко второй группе относятся районы с потенциалом выше среднего, в нашем случае это – Неклиновский (2,14), Азовский (2,18), Ейский (2,5) и Славянский (2,23) районы. На их долю в общем объеме ТРП приходится по 8–10 %. В виду своего расположения здесь наиболее эффективно развивается пляжный, охотничье-рыболовный, экологический, культурно-познавательный, религиозный, спортивный и другие виды туризма.

Третья группа районов со средним уровнем ТРП – Каневской (1,80), Ленинский (1,84), Джанкойский районы (1,86) составляет по 5–7 % в общем объеме ТРП. Интегральные показатели, а вместе с тем и качественные характеристики собранных показателей доказывают возможность развития не менее широкого спектра видов туризма.

В группу с низким потенциалом вошли Щербиновский (1,08), Приморско-Ахтарский (1,49), Кировский (1,42), Советский (1,44), Нижнегорский (1,45). Как видно по значению интегрального показателя эти районы весьма незначительно отстают от районов третьей группы со средним уровнем ТРП и составляют чуть больше 5 % ТРП побережья. Стоит отметить, что из проведенного анализа не следует, что в районах четвертой группы развитие туризма невозможно. Такие районы, как, например, Приморско-Ахтарский, обладающий уникальным природным потенциалом и Кировский – историко-культурным, позволяют развивать туризм при поддержке программ государственно-частного партнерства. Советский, Нижнегорский и Щербиновский районы являются районами сельскохозяйственной направленности, при этом располагают потенциалом для развития экологического, охотничье-рыболовного, орнитологического и других видов туризма.

Таким образом, практически все районы российского побережья Азовского моря имеют разнообразные туристско-рекреационные ресурсы и необходимые социально-экономические условия для развития различных видов туризма и отдыха.

Кроме того, в работе стоит задача доказать положительное воздействие развития туризма на социально-экономическое благосостояние муниципальных районов. Для этого группы показателей (табл. 1) разбиты на два блока:

- блок №1 группы показателей G1–G6 были задействованы для оценки уровня развития туризма;
- блок №2 – диапазон показателей G7–G12 – для оценки социально-экономического благополучия.

Расчет был произведен согласно подходу Н.В. Ворошилова, Е.С. Губановой [1], использована типологизация предложенная авторами (табл. 3) [1].

Таблица 3. ТИПОЛОГИЗАЦИЯ (ГРУППИРОВКА) РАЙОНОВ ПО УРОВНЮ РАЗВИТИЯ ТУРИЗМА [1, с. 330]

Уровень	Диапазон I общ. (стандартизация по формулам 1 и 2)
Высокий	$I \geq 1,15$
Выше среднего	$1,05 \leq I < 1,15$
Средний	$0,95 \leq I < 1,05$
Ниже среднего	$0,85 \leq I < 0,95$
Низкий	$I < 0,85$

Результаты, представленные на рисунке 2 подтверждают синергетический эффект развития туризма.

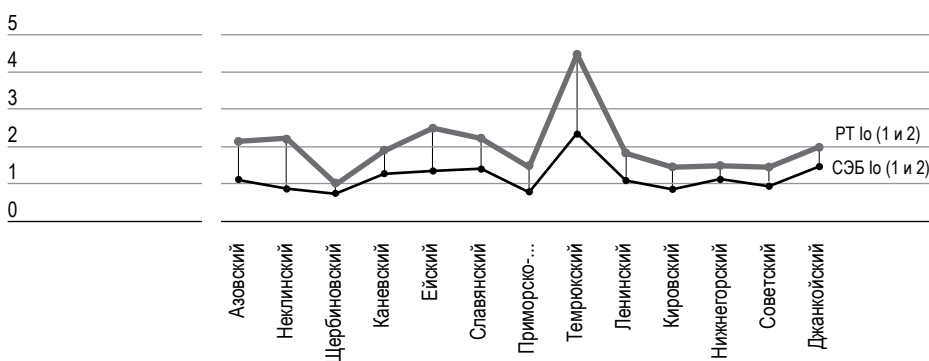


Рисунок 2. Кривые уровней развития туризма (РТ) и социально-экономического благополучия (СЭБ).

Выводы

Туристская отрасль одна из немногих экономических отраслей способная создавать мультипликационный эффект. Кривые уровня развития туризма и социально-экономического благополучия проходят в тандеме по всем муниципальным районам побережья Азовского моря России. Расположение кривой СЭБ выявляет наличие социально-экономических резервов для дальнейшего функционирования и развития туристской отрасли в исследуемом регионе. Наибольший отрыв зафиксирован в Темрюкском районе, где выявлен наиболее благоприятный социально-экономический климат для развития туризма, что в свою очередь подтверждается наиболее высоким показателем туристско-рекреационного потенциала.

В целях разработки и определения дальнейших перспектив развития и совершенствования туристско-рекреационного комплекса Азовского побережья необходимо устранение выявленных низких показателей уровня развития туризма, например в Приморско-Ахтарском, Щербиновском, Славянском и Каневском районах.

В связи с чем возникает необходимость проведения комплекса мероприятий по:

- мониторингу состояния туристской отрасли, и в частности коллективных средств размещения (КСР). Оценка и контроль деятельности средств размещения необходимо провести в Приморско-Ахтарском районе поскольку район обладает достаточным туристско-рекреационным потенциалом, но вошел в группу с низким уровнем развития туризма из-за показателей плотности и обеспеченности КСР за счет преобладающего количества индивидуальных средств размещения [4, с. 530–533];
- продвижению туристско-рекреационного потенциала районов с высоким уровнем развития туризма – Темрюкского, Ейского и Азовского. Для реализации этой цели необходимо скооперировать работу туристских информационных центров (ТИЦ), поставить конкретные задачи по повышению уровня туристской информатизации; для туристских операторов, формирующих региональные программы и

турпродукты, сделать заказ на разработку конкретных туристских маршрутов, максимально раскрывающих туристский потенциал района или территории;

- разработке форсайт-проектов взаимодействия социально-экономической и туристской систем в муниципальных районах Восточного Приазовья на уровне государственно-частного партнерства.

Библиографический список

1. Ворошилов, Н.В. Оценка уровня социально-экономического развития регионов России / Н.В. Ворошилов, Е.С. Губанова // Экономика и предпринимательство. 2013. № 12 (Ч. 3). 325–332 с.
2. Гирина А.Н. Методика оценки социально-экономического развития региона // Вестник ОГУ. № 8(157). 2013. Оренбург. 82–86 с.
3. Ивлиева О.В., Кушнир К.В. Современное состояние гостиничной сферы побережья Азовского моря России // Географический вестник Пермского государственного национального исследовательского университета. №2 (43) 2017. Пермь, 116–125 с.
4. Ивлиева О.В., Кушнир К.В. Природный и историко-культурный туристско-рекреационный потенциал российского побережья Азовского моря // Вестник Национальной академии туризма. №2(42). 2017. Санкт-Петербург, 38–42 с.
5. Ивлиева О.В., Кушнир К.В. Оценка влияния социально-экономических факторов на развитие туристско-рекреационного комплекса Приазовья // Журнал «Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2017. Т. 1. №2. 425–432 с.
6. Котляров Е.А. География отдыха и туризма. М., 1978. 184 с.
7. Кружалин К.В. Экономико-географическая оценка рекреационного потенциала России для развития международного туризма. М., 2002. 76 с.
8. Кушнир К.В. Специфика природного и экскурсионного туризма на российском побережье Азовского моря и примеры формирования локального турпродукта // Сборник Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы образовательного туризма». Сочи, 2017. 43 с.
9. Махар Л.Ю. Территориальные туристско-рекреационные системы: монография. Смоленск: Универсум, 2008. 212 с.

10. Максимов Д.В., Беликов М.Ю., Миненкова В.В. Статистика и динамика развития туристско-рекреационной системы региона: Краснодарский край: монография. МОО «Ассоциация выпускников географических факультетов». Краснодар, 2016. 7–36 с.
11. Малышева Г.М. Размещение туристских ресурсов и стратегия управления их развитием. Москва: Изд-во рос. экон. акад., 1995. 54 с.
12. Невейкина Н.В. Индикаторы социально-экономического развития региона/журнал Региональная экономика: теория и практика №23(302). 2013, 16–21 с.
13. Портал ОМСУ – Портал мониторинга деятельности органов местного самоуправления Ростовской области // http://www.ifrigate.ru/project_more.html?vid=system&id=360.
14. Постановление администрации Неклиновского района // Об утверждении отчета о реализации муниципальной программы Неклиновского района «Экономическое развитие и инновационная экономика» за 2016 год // http://nekl.donland.ru/Data/Sites/36/media/doc/adm/2017/post_226.pdf.
15. Сафарян А.А. Подходы к оценке туристского потенциала территории// Географический Вестник. 2015. №(32).
16. Федеральный орган государственной статистики РостовСтат // <http://rostov.gks.ru/> (дата обращения 22.11.17).
17. Федеральный орган государственной статистики КраснодарСтат // <http://www.gks.ru/dbscripts/munst/munst03/DBInet.cgi#1> (дата обращения 6.09.17).
18. Федеральный орган государственной статистики Крымстат // <http://www.gks.ru/dbscripts/munst/> (дата обращения 6.09, 22.11.17).
19. Чудновский А.Д. Теория и методология социально-экономических исследований в туристской индустрии: учебное пособие / А.Д. Чудновский, М.А. Москва, 2005. 9–22 с.

References

1. Voroshilov, N.V. Otsenka of the level of social and economic development of regions of Russia / (Assessment of social and economic development of Russian regions) Economy and business. 2013. No. 12 (P. 3). 325–332 p.
2. Girin A.N. Metodika of assessment of sotsialnok-economic development of the region // the Bulletin of regional public institution (Technique of region assessment of social and economic development) No. 8(157). 2013. Orenburg. 82–86 p.
3. Ivliyeva O.V., Kushnir K.V. Current state of the hotel sphere of the coast of the Sea of Azov of Russia // Geographical Bulletin of the Perm state national research university, (Current state of the hotel

- industry in the Russian Azov sea coast). No. 2 (43) 2017, Perm, 116–125 p.
4. Ivliyeva O.V., Kushnir K.V. Natural and historical and cultural tourist and recreational capacity of the Russian coast of the Sea of Azov. Bulletin of National Academy of tourism. (Natural, historical and cultural tourist recreational capacity of the Russian Azov sea coast) No. 2(42). 2017. St. Petersburg, 38–42 p.
 5. Ivliyeva O.V., Kushnir K.V. Assessment of influence of socio-economic factors on development of a tourist and recreational complex of Priazovye // Magazine "Ecology. Economy. Informatics. Series: System analysis and modeling of economic and ecological systems. (Assessment of influence of social and economic factors development of tourist and recreational complex Priazovye). 2017. T. 1. № 2. 425–432 p.
 6. Kotlyarov E.A. Geography of rest and tourism. (Geography of tourism). Москва, 1978. 184 pages.
 7. Kruzhalin K.V. Economical and geographical assessment of recreational capacity of Russia for development of the international tourism (Economical and geographical assessment of recreational capacity of development international tourism in Russia). Москва, 2002.
 8. Kushnir K.V. Specifics of natural and excursion tourism on the Russian coast of the Sea of Azov and examples of formation of a local tourist's product // Collection of the All-Russian scientific and practical conference «Current problems of educational tourism» (Specifics of natural and excursion tourism on the Russian Azov sea coast and examples of local tourist's product formation). 2017. Sochi, page 43.
 9. Majar L.Y. Territorial tourist and recreational systems. Monograph. Smolensk: Universum / (Territorial tourist and recreational systems). 2008. 212 p.
 10. Maximov D.V., Belikov M.Y, Minenkova V.V. Monograph. Statistics and dynamics of development of tourist and recreational system of the region: Krasnodar Krai. MOO "Association of Graduates of Geographical Faculties" (Statistics and dynamics of tourist and recreational system development of Krasnodarskiy Kray). Krasnodar. 2016. 7–36 p.
 11. Malysheva G.M. Placement of tourist resources and strategy of management of their development (Tourist resources placement and managing strategy of its development). Moscow: Publishing house of dews.academician, 1995, 54 p.
 12. Neveykina N.V. Indicators of social and economic development region / magazine Regional economy: theory and practice (Indicators of social and economic regional development). No 23(302). 2013. 16–21 p.
 13. OMSU portal – Portal of monitoring of activity of local governments of the Rostov region (Monitoring portal of local governments activity

- in the Rostov region) // http://www.ifrigate.ru/project_more.html?vid=isystem&id=360.
14. The resolution of administration of Neklinovsky district // About approval of the report on implementation of the municipal program of Neklinovsky district "Economic development and innovative economy" for 2016 (About approval of the implementation report of the municipal program in Neklinovsky district "Economic development and innovative economy" 2016) // http://nekl.donland.ru/Data/Sites/36/media/doc/adm/2017/post_226.pdf.
 15. Safaryan A.A. Approaches to assessment of tourist capacity of the territory // Geographical Messenger (Approaches to tourist capacity assessment) 2015. No. (32).
 16. Federal portal of the state statistics Rostovstat (Federal state statistics Rostovstat) // <http://rostov.gks.ru/> (using date 22.11.17).
 17. Federal portal of the state statistics Krasnodarstat (Federal state statistics Krasnodarstat) // <http://www.gks.ru/dbscripts/munst/munst03/DBInet.cgi#1> (using date 06.09.17).
 18. Federal portal of the state statistics Krymstat (Federal state statistics Krymstat) // <http://www.gks.ru/dbsc> (using date 09.09.17).
 19. Chudnovsky A.D. The theory and methodology of social and economic researches in the tourism industry: manual / (The theory and methodology of social and economic researches in the tourism industry) 2005. Moscow, 9–22 p.

УДК 914/919

Плачинта И.Г. [Plachinta I.G.]

РАЗРАБОТКА ПРИЕМА АНАЛИЗА ВЛИЯНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ФАКТОРА НА МИГРАЦИЮ (на примере Акмолинской области)

Development of the analysis method of the influence of the economic factor on migration (on the example of Akmola region)

Данная статья посвящена изучению связи между социально-экономической эффективностью развития региона и миграционной активностью населения. Целью работы является разработка метода изучения влияния экономического фактора на миграцию, посредством выражения первого в виде математической модели. Для этого разработаны приемы гравитационного моделирования, шкалирования и критериального оценивания. В качестве объекта исследования взят регион – Акмолинская область, где наблюдается устойчивая тенденция оттока населения, что связывается с медленным экономическим ростом. Прием гравитационного моделирования направлен не на прогнозирование миграции, а на проектирование ее рисунка при существующей совокупности социально-экономических показателей. В ходе исследования были обработаны статистические данные с 2000 года. По результатам исследования получена гравитационная модель, которая полностью отражает существующую миграционную ситуацию по области, а также позволяет выявить районы, где необходимо изучить внутрирайонную миграцию на предмет наличия центростремительного движения населения. В заключении статьи представлен вывод и указаны перспективные направления дальнейших исследований влияния экономического фактора на миграцию с помощью гравитационных моделей.

This article is devoted to the study of the links between the socio-economic efficiency of the development of the region and the migration activity of the population. The goal of the work is to develop a method for studying the influence of the economic factor on migration, by the form of a mathematical model. For this, there were used conventional methods of gravity modeling, scaling and criterial estimation. The purpose of the study is to identify the link between migration and socio-economic efficiency of the region through the use of gravity modeling. Akmola region, the region – where there was a steady trend of outflow of population was taken as the object of research. The method of the gravity modeling directed not on forecasting of migration, but on the formation of its pattern with the existing set of socio-economic indicators. As part of the study, statistical data were processed since 2000. According to the results of the study, the obtained gravity model completely reflected the existing migration situation in the regions, and also allowed to identify administrative subjects, where it is necessary to study intra-district migration for the presence of centripetal movements of the population. At the end of the article, the conclusion and perspective directions of further studies of the influence of the economic factor using gravity models are indicated.

Ключевые слова: социально-экономическая эффективность, миграция, геоинформационные системы, гравитационное моделирование.

Key words: social and economic efficiency, migration, geographic information systems, gravity modelling.

Введение

Современная миграция представляет собой достаточно уникальное социально-экономическое явление, возникающее в территориально-общественных системах (ТОС) любого уровня. Основной причи-

ной миграции, как правило, служит экономический фактор. Так, в региональной ТОС внутренняя миграция может представлять собой реакцию населения на разный по динамике уровень экономического развития отдельных ее частей. В конечном результате это приводит к перемещению населения между районами региона. С практической точки зрения интересен вопрос о существовании определенных критериев или статистических границ, когда миграция населения начинает вспыхивать или гаснуть. Решение данного вопроса необходимо проводить посредством такого интегрального показателя, который объединяет в себе основные экономические параметры.

В общественной географии за рубежом существует подобное интегральное понятие – социально-экономическая эффективность. Интегральность понятия выражается мнением её основоположника В. Парето, отмечавшего, что социально-экономическая эффективность это «не соотношение, а состояние социально-экономической системы» [1, с. 5]. Социально-экономическая эффективность будет максимальной при полном использовании всех ресурсов. При этом экономические показатели уровня развития ТОС являются выражением существующей эффективности экономики. Таким образом, понятие социально-экономической эффективности предстает универсальным средством для анализа уровня развития региона и обобщения количественных характеристик экономики, в том числе в увязке с миграцией.

Идеи социально-экономической эффективности получили развитие в работах экономистов и географов. Экономист Д.С. Синк сформулировал категории социально-экономической эффективности и выразил ее роль как компонента системы управления. Данные тезисы получили дальнейшее развитие в работах С.Н. Растворцевой и применены к региональному производственному сектору [2]. На уровне государства вопросы экономической эффективности рассматривались на примере Греции в работе G.E. Halkos и N.G. Tzeremes [3].

Экономический подход к понятию эффективности сводится к рассмотрению исключительно производства как целостного технологического процесса. Однако экономико-географический подход в рассмотрении социально-экономической эффективности региона должен выходить за пределы одного производства до уровня пространства всей территориальной общественной системы. Подобный подход позволит сопоставлять динамику социально-экономической эффективности с любыми другими экономическими и социальными явлениями (в частности, с миграцией), но на основе математической модели или расчетов, чего экономистами ранее не предлагалось.

Географический аспект реализации исследования социально-экономической эффективности и ее связи с миграцией предлагается на примере Ак-

молинской области. Причины выбора именно этого региона обусловлены следующим:

- на территории области расположен столичный «анклав» — зона передового экономического развития Казахстана;
- экономика большинства административных районов связана с преимущественным развитием первичного сектора, который на протяжении последних десятилетий находился в состоянии рецессии, с отдельными периодами «экономического оживления».
- с 2000 по 2015 г. в Акмолинской области отмечался значительный межрегиональный отток населения в Астану.

Прямое соседство двух регионов с разными тенденциями в экономике (прогрессивная в Астане и рецессивная в Акмолинской области) даёт возможность проверить наличие связи между социально-экономической эффективностью экономики и миграцией.

Материалы и методы исследования

В рамках исследования предлагается к рассмотрению собственный подход, или метод исследования миграции, на основе изучения комплексных показателей социально-экономической эффективности. Набор показателей может быть различен. Приведем набор факторов, представленных в работах А.А. Нестерова, которым были выделены базовые и основные факторы, использованные при изучении регионов европейской части России.

В качестве базовых факторов он выделил следующие:

- демографические условия (наличие регионов с дефицитом трудовых ресурсов);
- трудовые условия (уровень занятости и безработица);
- экономические условия (прожиточный минимум и средний доход);
- жилищные условия;
- инвестиционные условия (уровень инвестиций и валовой доход);
- условия здравоохранения (уровень развития медицины в регионе, эпидемиологическая обстановка).

Из вышеприведенных факторов в качестве основных им были выделены:

- уровень инвестиций;
- уровень дохода (начисленная зарплата);
- уровень занятости;
- уровень обеспеченности жилищными помещениями на душу населения;
- уровень смертности [4].

Выбор конкретных показателей зависит от наличия соответствующих сведений в статистических сборниках. В данном случае были выбраны показатели промышленного производства, строительства, объема инвестиций, уровня заработных плат. Выявление связи выбранных показателей с миграцией на основе метода корреляции является затруднительным, так как,

- во-первых, необходимо определиться с «весом» каждого показателя,
- во-вторых, динамика экономики и миграции уже изначально демонстрирует разные тренды.

Так, объем миграции к 2015 году снижался – при постоянных отрицательных значениях сальдо миграции, а экономические показатели от года к году отражали разнонаправленные тенденции: то рост, то снижение.

Следовательно, выявление связи между миграцией и социально-экономической эффективностью посредством корреляции будет недостаточным. Необходимо перейти от простых значений статистики к интегральным или обобщающим, в том числе посредством показателя социально-экономической эффективности. При этом необходим переход от единичных значений одного района (как в случае корреляции) к виртуальному пространству с совокупностью значений (на уровне числовой модели). Последнее вполне реализуемо посредством инструментов ГИС, в которых картографическое изображение может отражать подобное пространство (TIN-поверхность). В качестве центрального показателя в TIN-поверхности можно избрать гравитационный индекс.

В качестве основы для развития идей о гравитационной составляющей социально-экономической эффективности в миграции была рассмотрена ситуация с наличием внутри одного региона районов депрессивных и районов с динамичным развитием. Экономика таких регионов может демонстрировать положительные тенденции и быть даже диверсифицирована. Однако внутри региона наблюдается устойчивая дифференциация на районы передового и инертного развития. Население, при наличии кризисных явлений или низкого уровня развития экономики, может реагировать оттоком в более благополучные районы [5]. В этом случае динамика миграции может быть прямо пропорциональна изменению социально-экономических показателей. Но следует

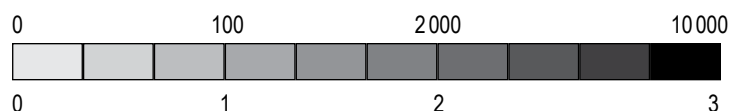


Рис. 1. Основа приема шкалирования.

отметить, что в отдельные годы депрессивные и развивающиеся районы могут демонстрировать положительную динамику по ряду экономических показателей, что, конечно, нарушает вышеуказанную пропорциональность, поэтому необходимо создать такую модель, которая учитывает изменения данных показателей за несколько лет.

Социально-экономические показатели, выраженные через интегральный параметр – гравитационный индекс, отражают в себе социально-экономическую эффективность, что можно условно назвать «реализованным потенциалом». В этом случае регион, состоящий из районов, представляется уже как совокупность точек с определенными значениями «реализованного потенциала», тогда миграция является следствием их разности. Чем больше разница потенциалов, тем больше вероятность возникновения потока мигрантов (в том числе и трудовых), что проверяется статистическими показателями. Таким образом, с помощью гравитационных индексов строится гравитационная модель в виде TIN-поверхности.

Гравитационный индекс представляет собой обобщенный показатель, высчитанный с помощью критериального оценивания. Под оценивание попадают экономические показатели района, а критериями выступают как средние показатели по области и стране, так и абсолютные максимальные значения, характерные для признанных центров миграции. Все данные критерии выражены с помощью приема шкалирования. На рисунке 1 показана схема разработки данного приема.

Согласно рисунку 1 в качестве показателя «1» подразумевается средне-региональное, «2» – среднее по стране, «3» – абсолютный экономический показатель на национальном уровне. Значения над шкалой показывают, что показатели «1», «2», «3» расположены непропорционально по возрастанию. Соответственно, сами значения «1», «2», «3» представляют собой обобщенные показатели в форме баллов. Кроме этого, на рисунке 1 представлены промежуточные значения, в количестве трех или четырех интервалов, показатели которых изменяются пропорционально. Так, если между «0–1» значение меняется от 0 до 100, то каждое промежуточное приравнивается 33,3 и 66,7 со-

ответственно с присвоением 0,33 и 0,67 балла по каждой подгруппе показателей. Кроме четырех экономических показателей (валовое промышленное производство, объем строительных работ, объем инвестиций, средняя заработная плата), необходимо учитывать фактор «демографической массы». Перевод абсолютной численности населения можно произвести также с помощью приема шкалирования. При этом в качестве опорных показателей рассматриваются пороговые значения, принятые в Казахстане, малого (10 000 жителей), среднего (100 000 жителей), крупного (1 млн. жителей) города. Таким образом, гравитационный индекс представляется как сумма баллов по пяти показателям.

Пространственно-математическая обработка данных начинается с определения пространственных опорных точек отсчета обобщенных показателей. В качестве таких точек предлагаются административные центры и города, так как именно они в большинстве случаев являются носителями экономического потенциала определенного района. Для каждой опорной точки высчитывается гравитационный индекс. Заключительным является расчет гравитационной модели и ее картографическая реализация. Расчет гравитационной модели [6] предлагается проводить по следующей формуле (1):

$$V_j = P_j + \sum_{i=1}^{n-1} V_j^i = P_j + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{P_j^i}{r_{ij}}, \quad (1)$$

где V – гравитационный потенциал,
 P – значение гравитационного индекса для j – искомого населенного пункта относительно совокупности остальных пунктов – i , расположенных на расстоянии – r .

Картографическая реализация гравитационной модели была реализована посредством ГИС «ArcGIS» через инструменты интерполяции значений и создания TIN-поверхности.

Результаты исследования и их обсуждение

Гравитационная модель была апробирована на примере Ақмолинской области, в которой сочетаются центростремительное и центробежное движение населения. Главной задачей использования гравитационной модели является выявление влияния экономического фактора на миграцию. Так как гравитационная модель реализована на основе использования статистических сведений, то появляется возможность выявления «экономических рамок», при которых происходит ускорение или замедление мигра-

ции. Реализация данной задачи была выполнена через анализ миграции в области и полученной гравитационной модели.

В ходе изучения миграционных процессов была составлена классификация районов Акмолинской области в соответствии со степенью влияния миграции на общий прирост населения.

Выделены 4 группы районов (рисунок 2):

- группа 1 – районы, в которых миграция играет подавляющую роль в формировании положительного общего прироста;
- группа 2 – районы, в которых миграция играет второстепенную положительную роль в формировании общего прироста;
- группа 3 – районы, в которых миграция играет второстепенную отрицательную роль в формировании общего прироста;
- группа 4 – районы, в которых миграция играет первостепенную роль, но формирует отрицательные значения общего прироста.

В результате были выявлены следующие центры миграции [7]:

- республиканского значения: Целиноградский район, в пределах которого располагается пригородная зона столицы;
- областного и регионального значения: г. Кокшетау;
- межрайонного значения: Бурабайский район;
- внутрирайонного значения: г. Атбасар и г. Щучинск.

Гравитационная модель построена на основе статистических сведений по вышеуказанным четырем экономическим показателям и «демографической массе» [8]. Данные показатели отражают динамику промышленного развития и косвенно демонстрируют районы, благоприятные для миграции, в том числе технических кадров. В качестве периода изучения были избран отрезок с 2000 по 2015 г. Значения показателей обобщены в виде баллов посредством приема шкалирования и показаны в таблице 1.

При добавлении к результатам данной таблицы значения баллов по «демографической массе» и проведении расчётов по формуле (1), получена следующая гравитационная модель, созданная в программе ArcGIS (рисунок 3).

Полученная гравитационная модель отражает следующие факты:

- наличие центра миграции в Астане и в её пригородной зоне;
- положительное влияние экономического фактора на развитие городов Щучинск и Кокшетау;

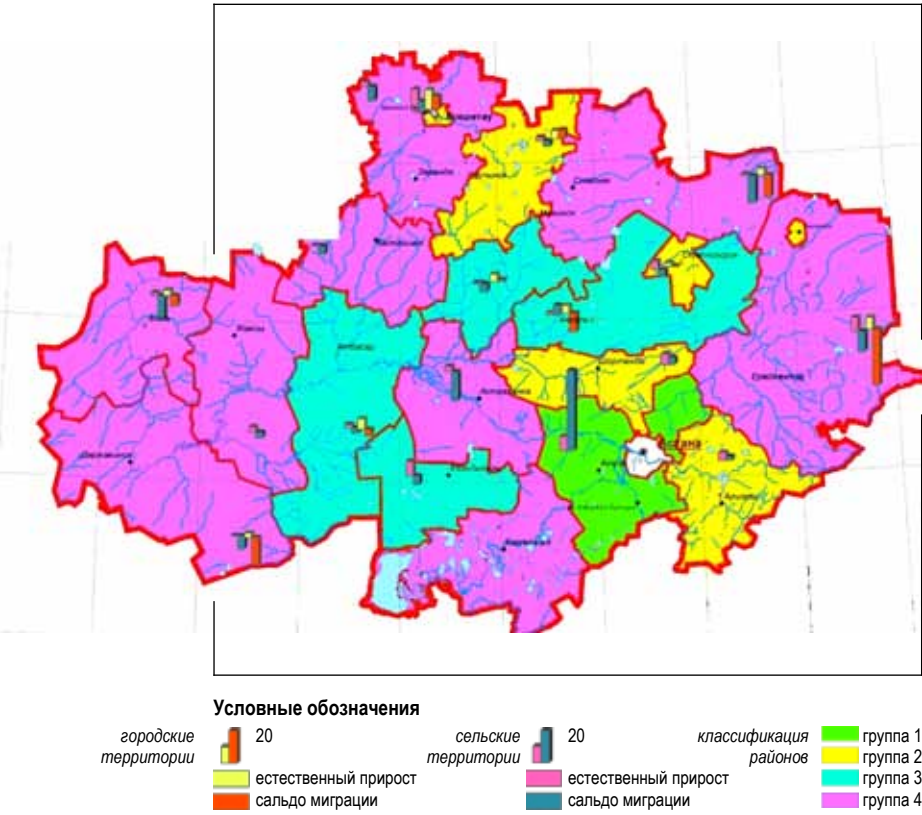


Рис. 2. Структура общего воспроизводства в разрезе районов.

Таблица 1. РЕЗУЛЬТАТЫ КРИТЕРИАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

	Промышленность	Уровень зар. плат	Инвестиции	Строительство
Кокшетау	2,25	1,5	2,5	2,25
Степногорск	1,33	1,25	1,33	1,33
Аккольский	1,33	1	0,5	1,33
Зерендинский	0,75	1,25	1,33	0,75
Бурабайский	1,33	1	1,33	1,67
Енбекшилдерский	1	1,25	1,33	1
Буландинский	0,75	1	0,5	0,75
Целиноградский	2,25	1	1,67	2,25
Сандыктауский	0,25	1	0,5	0,25

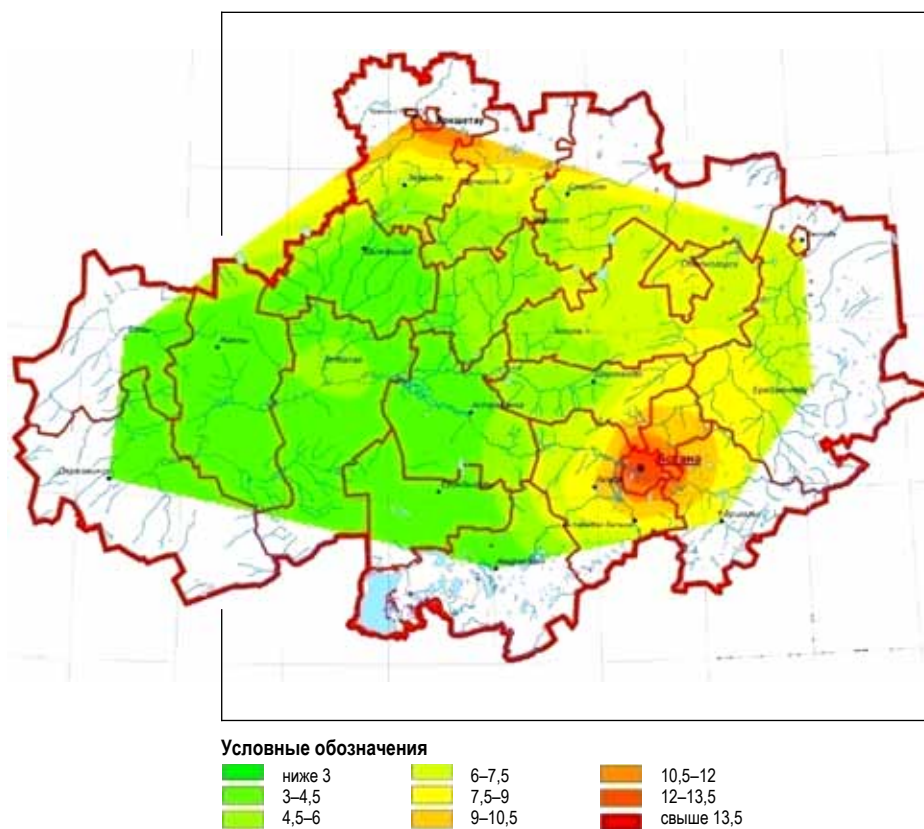


Рис. 3. Гравитационная модель миграции.

- наличие незначительных полей притяжения населения вокруг г. Степногорск и г. Атбасар;
- роль транспортных магистралей в формировании пригородной зоны столицы, что особенно заметно по вытянутой форме желтых полей в северо-восточном, западном, юго-восточном направлениях.

Сопоставляя факты анализа миграции и гравитационной модели, находим, что центры притяжения совпадают с данными официальной статистики. Особенно важным является выявление центров внутрирайонной миграции в районах группы 3 (г. Атбасар), где сальдо миграции отрицательное. В этом случае слабое центростремительное движение в Атбасарском районе вычисляется только при сопоставлении сальдо миграции района с аналогичными сведениями по сельским и городским территориям. Данный факт полностью отражен в гравитационной модели.

Выводы

Полученные результаты влияния экономического фактора на миграцию посредством гравитационной модели показывают возможность математического определения условий для формирования миграционных потоков в ТОС, особенно на меж- и внутрирайонном уровнях. С практической стороны гравитационную модель можно рассматривать с двух позиций:

- как рисунок миграции в регионе с выделением центров притяжения;
- как средство познания «результативности экономического потенциала» районов, на основании чего можно формулировать оценку развития миграции.

На примере Акмолинской области прием гравитационного моделирования показал положительный результат, так как фактически гравитационная модель отразила в себе существующие центры миграции.

Несмотря на положительные результаты проведенной работы, можно сделать следующие выводы:

- метод гравитационного моделирования необходимо применить на примере других областей, макрорегионов страны и сопредельных регионов Российской Федерации и Республики Казахстан. Дальнейшее применение данного метода и верификация полученных результатов позволят выявить его достоверность;
- на данном этапе гравитационная модель представляет собой средство анализа экономического развития территории, а в перспективе – даёт понимание причин экономической миграции внутри региона на уровне статистических показателей.

В рамках данного исследования развитие идеи о гравитационной модели будет реализовано посредством расширения географического охвата для анализа, а также изменения подхода к шкалированию данных. Так при разработке гравитационной модели на экономический район появляется возможность оценки на уровне макрорегиона («взгляд извне») и на уровне конкретной области («взгляд изнутри»). Поэтому следующим шагом в нашей работе будет разработка гравитационной модели для Северного Казахстана.

Библиографический список

1. Парето В. Компендиум по общей социологии / пер. с итал. А.А. Зотова. М.: ГУ ВШЭ, 2007. 511 с.
2. Растворцева С.Н. Социально-экономическая эффективность регионального развития. М.: Экон-Информ, 2011. 131 с.
3. Tzeremes N.G. The effect of human capital on countries' economic efficiency // *Economics Letters*. 2014. №124. P. 127–131.
4. Нестеров А.А. Обзор факторов, определяющих межрегиональную и региональную миграцию в Российскую Федерацию // *Российское предпринимательство*. 2015. №5–2. С. 183–187.
5. George J. Boryas. Economic of migration // *International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences*. Cambridge: 2000. Section №3–4, article №38. P. 21.
6. Фалейчик Л.М., Горина К.В. Использование ГИС-инструментария в анализе демографических показателей системы расселения Забайкальского края // *Вестник ЗабГУ*. 2014. №03 (106). С.45–56.
7. Плачинта И.Г. Анализ роли миграции в формировании общего воспроизводства населения Акимолинской области // *Актуальные проблемы науки и образования в области естественных и сельскохозяйственных наук: материалы V Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию СКГУ им. М. Козыбаева*. Т.1. Петропавловск, 2017. С.140–144
8. Акимолинская область в 2015 году: Статистический сборник. Кокшетау, 2016. 237 с.

References

1. Pareto V. Kompendium po obshchei sotsiologii (Compendium on General Sociology) / Per. s ital. A.A. Zotova. M.: GU VSHE, 2007. 511 p.
2. Rastvortseva S.N. Sotsial'no-ekonomicheskaya effektivnost' regional'nogo razvitiya (Socio-economic effectiveness of regional development). M.: Ekon-Inform, 2011. 131 p
3. Tzeremes N.G. The effect of human capital on countries' economic efficiency. // *Economics Letters*. 2014. №124. P. 127–131.
4. Nesterov A.A. Obzor faktorov, opredelyayushchih mezhregional'nyu i regional'nyu migratsiyu v Rossijskuyu Federatsiyu (A review of the factors determining interregional and regional migration to the Russian Federation) // *Rossijskoe predprinimatel'stvo*. 2015. №5–2. P. 183–187.
5. George J. Boryas. Economic of migration // *International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences*. Cambridge: 2000. Section №3–4, article №38. P. 21.
6. Falejchik L.M., Gorina K.V. Ispolzovanie GIS-instrumentariya

- v analize demograficheskikh pokazatelej sistemy rasseleniya Zabaikal'skogo kraia (The use of GIS tools in the analysis of demographic indicators of the Transbaikalian settlement system) // Vestnik ZabGU. 2014. №03 (106). P. 45–56.
7. Plachinta I.G. Analiz roli migratsii v formirovanii obshchego vosproizvodstva naseleniya Akmolinskoi oblasti (Analysis of the role of migration in the formation of the general reproduction of the population of the Akmola region). //Aktual'nye problemy nauki i obrazovaniya v oblasti estestvennyh i sel'skohozyajstvennyh nauk: materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 80-letiyu SKGU im M.Kozybaeva. T. 1. Petropavlovsk, 2017. P. 140–144.
 8. Akmolinskaya oblast' v 2015 godu: Statisticheskii sbornik (Akmola region in 2015: statistical compilation). Kokshetau, 2016. 237 p.

УДК 873.33.31.19

Разумов В.В. [Razumov V.V.]
Беккиев М.Ю. [Беккиев М.Ю.]
Разумова Н.В. [Razumova N.V.]
Шагин С.И. [Shagin S.I.]

МАСШТАБЫ И ОПАСНОСТЬ НАВОДНЕНИЙ НА СЕВЕРНОМ КАВКАЗЕ

Scales and danger of floods in the North Caucasus

Рассмотрены результаты систематизации и анализа различных источников, содержащих информацию о масштабах распространения и опасности проявления наводнений на Северном Кавказе. Показано, что активизация этих процессов на территории изучаемого региона происходит в основном за счет весенних половодий и летне-весенних паводков. Дана характеристика произошедших наводнений и последствий их проявления на территории субъектов РФ в пределах изучаемого региона. Проанализированы, произошедшие за последние 25 лет на территории региона, чрезвычайные ситуации (ЧС), обусловленные наводнениями. Показано, что ежегодно в регионе происходит около 2 ЧС, обусловленных наводнениями. Наибольшее количество гидрологических ЧС происходит в Карачаево-Черкесской Республике (23,9% от всех ЧС в регионе, обусловленных наводнениями), Кабардино-Балкарской Республике (21,7%) и Республике Дагестан (17,4%). Наименьшее – в Республике Ингушетия и Ставропольском крае (по 6,5%). Чаще всего эти чрезвычайные ситуации происходят на территории региона в июне (около 40% от всех ЧС гидрологического характера) и мае (26,0%). На летние месяцы приходится 67,4% всех ЧС в регионе, обусловленных наводнениями.

Results of systematization and the analysis of various sources containing information on scales of distribution and danger of manifestation of floods in the North Caucasus are considered. It is shown that activation of these processes in the territory of the studied region happens generally at the expense of spring high waters and summer and spring floods. The characteristic of the occurred floods and consequences of their manifestation in the territory of territorial subjects of the Russian Federation within the studied region is given. Are analysed, the occurred for the last 25 years in the territory of the region, emergency situations caused by floods. It is shown that annually in the region there are about 2 emergencies caused by floods. The greatest number of hydrological emergencies occurs in the Karachay-Cherkess Republic (23,9% of all emergencies in the region caused by floods), Kabardino-Balkar Republic (21,7%) and the Republic of Dagestan (17,4%). The smallest – in the Republic of Ingushetia and Stavropol Krai (on 6,5%). Most often these emergency situations happen on the territory of the region in June (about 40% of all emergencies of hydrological character) and May (26,0%). For summer months 67,4% of all emergencies in the region caused by floods are necessary.

Ключевые слова: Северный Кавказ, наводнения, половодья, подтопления, максимальный уровень воды, опасные районы, чрезвычайная ситуация.

Key words: North Caucasus, floods, high waters, floodings, maximum level of water, dangerous areas, emergency situation.

Введение

Наводнение – значительное затопление местности в результате подъема уровня воды в водоеме во время весеннего половодья или паводка, при ледовом заторе, зажоре, вследствие ветрового нагона воды в устье реки, а также при прорыве озер, гидротехнических сооружений или попуска воды из них. Паводок – сравнительно кратковременное поднятие

уровня воды в реке, возникающее в результате быстрого таяния снега, ледников, обильных дождей, попусков воды из водохранилищ. Половодье – ежегодно повторяющееся обычно в один и тот же сезон года относительно длительное и значительное увеличение водности реки, вызывающее подъем ее уровня [17, 27].

Многочисленные негативные последствия сильных наводнений проявляются в виде прямого и косвенного ущерба населению и экономике затопленных районов. Основную часть прямого ущерба составляют непосредственные потери от наводнений: погибшие и раненые среди населения, разрушенные и поврежденные жилые, административные, хозяйственные и другие объекты и сооружения, уничтоженный урожай сельскохозяйственных культур, снижение качества почв. К косвенному ущербу относятся, в частности, замедление темпов развития экономики пострадавших районов, ухудшение условий жизни населения, затраты на ликвидацию последствий стихийного бедствия.

По данным [25], общая площадь паводкоопасных районов на территории Российской Федерации достигает 400 тыс. кв. километров, из которых ежегодно затопляются до 50 тыс. кв. километров. Затоплению подвержены отдельные территории 746 городов, в том числе более 40 крупных, тысячи населенных пунктов с населением около 4,6 млн человек, хозяйственные объекты и более 7 млн. гектаров сельскохозяйственных угодий. По глубине затопления прибрежных территорий и повторяемости наводнений выделены наиболее опасные районы страны, где наводнения могут повторяться раз в 2–3 года, а максимальная глубина затопления может превышать 3,3 м. К ним относятся бассейны Верхней и Средней Оки, Кубани, Тобола, Среднего и Нижнего Енисея с притоками, отдельные участки Средней Лены и ее притоков – Алдана, Витима, Олекмы, а также реки юга Приморского края [17]. Наибольшим размахом характеризуются наводнения в Северо-Кавказском, Южном и Дальневосточном регионах страны, они повторяются здесь особенно часто, охватывают большие территории и приносят огромные разрушения.

Материалы и методы исследования

Выполнены сбор, систематизация и анализ обширной информации о *весенних половодьях и летне-весенних паводках* на реках Северного Кавказа, представленной в материалах официальной государственной отчетности о состоянии и об охране окружающей природной среды, водных ресурсов, состоянии защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и др. по субъектам РФ в пределах Северного Кавказа. Кроме того были привлечены данные имеющихся литературных источников по теме исследования.

Целью настоящего исследования является изучение масштабов распространения и опасности проявления наводнений на территории Северного Кавказа (Северо-Кавказского федерального округа).

Учитывая масштабность проблемы, в данной работе решаются следующие основные задачи:

- изучение районов распространения весенних половодий и летне-весенних паводков в Северо-Кавказском регионе и зонирование его территории по степени опасности наводнений и масштабу возникающих при этом чрезвычайных ситуаций (ЧС);
- характеристика произошедших наводнений на территории субъектов РФ в пределах региона;
- анализ произошедших на территории региона чрезвычайных ситуаций, обусловленных наводнениями и оценка социально-экономических аспектов их последствий.

Результаты исследования и их обсуждение

Реки Северного Кавказа отличаются друг от друга различными условиями формирования стока воды. По условиям формирования стока и, следовательно, по причинам возникновения наводнений реки региона подразделяются на два типа [13, 16, 18]. Первый тип – реки с максимальным стоком от таяния горных снегов и ледников. К этому типу относится часть рек Ставропольского края, а также реки всех республик Северного Кавказа. Второй тип – реки с максимальным стоком, обусловленным выпадением интенсивных осадков (дождей). К этому типу относятся, в основном, равнинные реки Ставропольского края.

Причины наводнений на территории региона чрезвычайно разнообразны (весеннее половодье, летне-весенние паводки, заторно-зажорные и нагонные явления, завальные наводнения, прорывные и транзитные паводки). Наиболее опасные и разрушительные наводнения и обусловленные ими ЧС на Северном Кавказе возникают в результате *весенних половодий и летне-весенних паводков*, которые и будут предметом нашего изучения.

Степень опасности наводнений и масштаб возникающих ЧС принято определять, в первую очередь, в зависимости от того, насколько максимальный уровень воды в реках во время затопления превышает исходный уровень. С максимальным уровнем связана площадь затопления в пойме реки. На территории изучаемого региона выделено 4 зоны с разной степенью опасности наводнений (рисунок) [20].

Зона чрезвычайно опасных наводнений (максимальные уровни воды более чем на 3,2 метра превышают уровни начала затопления прибрежных территорий) представлена одним районом в бассейне р. Кубань (большая часть Карачаево-Черкесской Республики и западная часть Ставропольского края). Масштаб чрезвычайных ситуаций в этой зоне может достигать федерального уровня.

Зона весьма опасных (2,1–3,2 м) и опасных (1,5–2,0 м) наводнений представлена одним районом в среднем (северная часть Чеченской Республики) и нижнем (Республика Дагестан) течении р. Терек (от г. Моздок до впадения в Каспийское море). Масштаб чрезвычайных ситуаций в этой зоне может достигать регионального и межрегионального уровня.

Зона умеренно опасных наводнений (0,8–1,4 м) представлена тремя районами:

- 1 – бассейн р. Сулак (Республика Дагестан);
- 2 – бассейн р. Сунжа (в основном вся территория Республики Ингушетия и восточная часть Республики Северная Осетия – Алания);
- 3 – бассейны рек Малка, Баксан, Чегем, Черек – в среднем и нижнем течении (предгорная и равнинная части Кабардино-Балкарской Республики); бассейн р. Кума в среднем и нижнем течении (в основном район Кавказский Минеральных Вод). Масштаб чрезвычайных ситуаций здесь не превышает муниципального уровня.

Зона мало опасных наводнений (с глубиной затопления менее 0,8 м) занимает большую часть изучаемого Северо-Кавказского региона. Масштаб чрезвычайных ситуаций не превышает локального уровня.

Необходимо отметить, что приведенное зонирование отражает лишь преобладающий тип наводнений, что совершенно не исключает возникновения в том или ином районе и более опасного наводнения.

В пределах Северного Кавказа опасность наводнений существует для всей территории, однако наибольшей угрозе наводнений естественного происхождения подвержена самая густонаселенная часть региона – предгорная и равнинная. Всего воздействию наводнений в регионе подвержено более 70 районов, около 500 населенных пунктов, в которых проживает до миллиона человек, а также обширные площади лесов и сельскохозяйственных земель [20].

Приведем краткую характеристику степени опасности и масштабов распространения *весенних половодий и летне-весенних паводков* на территории субъектов РФ в пределах Северного Кавказа.

Весенне-летнее половодье на территории Республики Дагестан проходит в основном на равнинных участках рек Терек, Сулак, Аксай и влияет на территории Кизлярского, Бабаюртовского, Хасавюртовского и Кизилюртовского районов. По данным [5], площадь затопления, в результате наводнений (паводков), на территории республики превышает 5 тыс. кв. км, что составляет около 10% территории республики. Основная угроза при паводках и половодьях исходит от р. Терек. Из крупнейших паводков, произошедших за последние 100 лет на этой реке, можно выделить паводок 1914 г. с расширением дельты реки с 300 до 600 тыс. га, катастрофические паводки с водностью от



Опасность наводнений				
Тип процесса по уровню опасности	Масштаб чрезвычайной ситуации	Показатели опасности		
		максимальный уровень подъема воды, м	площадь затопления поймы реки, %	повторяемость превышения максимального уровня воды 1 раз в N лет
малоопасный	локальный	менее 0,8	менее 40	2–10
умеренно опасный	муниципальный / межмуниципальный	0,8–1,5	40–60	10–20
опасный / очень опасный	региональный / межрегиональный	1,5–3,2	60–90	20–100
чрезвычайно опасный	федеральный	более 3,2	более 90	100–1000

Рисунок. **Опасность наводнений на Северном Кавказе (М 1: 3 000 000) [20].**

1400 до 2000 куб. м/с в 1931, 1936, 1939, 1942, 1944–1946, 1958, 1963, 1967, 1970, 1988, 1992, 2002, 2005 гг. [3]. По данным [23], в зону затопления паводками 1% обеспеченности р. Терек и ее притоков попадает 16 населенных пунктов республики.

Только в низовьях реки Терек (на территории, непосредственно прилегающей к основному руслу) в зоне риска затопления от ежегодных паводков находится 165 тыс. га земель, на которых расположено 9 населенных пунктов с общей численностью населения 5,5 тысяч человек [1]. В результате прорывов ограждающих валов во время паводков, в зону затопления и подтопления р. Терек также попадают сельскохозяйственные угодья, объекты эконо-

мики и населенные пункты Бабаюртовского и Кизлярского районов с численностью населения 114,0 тыс. чел., а также зимние пастбища 60 хозяйств 8-ми горных районов республики [1, 5]. Так, например, в 2002 г. в результате прорыва защитных валов в низовьях дельты Терека было затоплено более 40 тыс. га сельскохозяйственных земель на левобережье магистрального рукава [4]. В Кизлярском и Бабаюртовском районах выявлено более 20 прорывоопасных участков на водооградительных дамбах р. Терек [5].

Совокупный прогнозируемый ущерб от разлива реки Терек может превышать 23,0 млрд руб. с учетом жилых и общественных строений, мостов автомобильного и железнодорожного сообщения, автомобильных и железных дорог федерального и республиканского значения. Так, например, прошедшие в 2002 и 2005 гг. в бассейне реки Терек катастрофические паводки, вызвали затопление около 70 тыс. га земель, 5 населенных пунктов (в период паводка 2002 года стояла реальная опасность затопления города Кизляра). Общий ущерб от наводнений превысил 3,5 млрд рублей [1]. За период с 2005 по 2015 годы на территории республики произошло 7 чрезвычайных ситуаций, вызванных паводками и подъемами уровня воды в реках.

Для Республики Дагестан паводкоопасной является и река Кума, в своем нижнем течении (160 км), протекающая на границе с Калмыкией по искусственному руслу – Кумскому коллектору. Вследствие, недостаточной пропускной способности коллектора и аварийного состояния водопропускной трубы под железной дорогой «Астрахань–Кизляр» происходит затопление больших территорий в устьевой части на правом берегу реки. В устьевой части ниже железной дороги (ж/д) «Кизляр–Астрахань» систематически затопляются до 20,0 тыс. га сенокосов и пастбищ и подтапливается 2 км железной дороги. Только на участке от ж/д и до границы со Ставропольским краем затопляются до 15,0 тыс. га сельхозугодий [24].

Паводкоопасными являются и реки Сулак и Аварское Койсу, воды которых формируются за счет таяния снегов, ледников и одновременного выпадения дождей, в основном, в июне-июле, реже в августе. В питании реки Андийское Койсу, участвуют дождевые осадки, подземные и талые (за счет таяния снегов и ледников) воды. В теплую часть года на р. Аксай иногда проходят катастрофические паводки, вызывающие разрушения головных сооружений каналов. Данные [22] показывают, что суммарный среднемноголетний ущерб от затопления объектов народного хозяйства в бассейне реки Сулак возможен в размере 0,94 млрд руб. в ценах 2000 г. После строительства водохранилищ в бассейне реки Сулак ущербы от пропуска катастрофических паводков значительно уменьшились. Однако, иногда возможны залповые сбросы до 900 куб. м/сек, которые сопровождаются резкими колебаниями уровня на нижнем участке реки, создавая угрозу подмыва и затопления селений: Султан-Янгийорт, Нечаевка, Чонтаул, Кироваул, Львовское, а также сельскохозяйственных угодий хозяйств отгонного животноводства Хунзахского, Акушинского и др.

районов. Паводковая опасность в низовьях реки Сулак возрастает в период прохождения паводков на нерегулируемых реках Акташ и Аксай. Так, например, во время паводка, который прошел по р. Акташ 21 июня 1993 г. произошел подмыв целого ряда мостовых, водопропускных и берегоукрепительных сооружений, железнодорожный мост в районе ст. Карланюрт был полностью разрушен [3]. При прохождении паводка 1% обеспеченности возможно переполнение Аксайского противопаводкового водохранилища с размывом дамб. При этом могут быть затоплены селения Герменчик, Бабаюрт, Тукита, Камышкунтан, Нарышкунтан, многочисленные объекты отгонного животноводства, Теречный магистральный канал (канал им. Дзержинского), автодорога «Хасавюрт – Кизляр», главный Юзбаш-Сулакский коллектор и трасса новой железнодорожной ветки «Чирюрт – Кизляр» [3].

При вынужденных залповых пропусках воды с Миатлинского и Чирюртовского водохранилищ (в пиковые режимы работы Чиркейской ГЭС) происходят резкие колебания уровня воды в нижнем течении р. Сулак, создавая угрозу подмыва и затопления селений Нечаевка, Чонтаул, Кироваул, хозяйств отгонного животноводства и сельхозугодий. Так, например, 4 мая 2010 г. в результате сильных ливневых дождей произошло резкое увеличение уровня воды в Геджухском водохранилище на территории Дербентского района, в результате чего произошел неконтролируемый аварийный сброс воды, что привело к затоплению 210 домостроений в пос. Мамедкала Дербентского района, в которых проживало более 900 человек [5].

По данным Госкомитета по гидрометеорологии и мониторингу природной среды Республики Ингушетия, весенне-летнее половодье на реках республики начинается в конце апреля и заканчивается в конце сентября. Выпадение интенсивных ливневых дождей и одновременное таяние снегов и ледников в горах в мае-июне могут привести к резким кратковременным подъемам уровня воды в реках Асса и Сунжа. При весенне-летних паводках на р. Сунжа, в равнинной части республики подтапливаются ст. Орджоникидзевская, ст. Троицкая, с. Барсуки, г. Карабулак. Интенсивное выпадение дождей в горной и предгорной частях республики сопровождается повышением уровня воды до опасных отметок в р. Асса, что приводит к периодическому затоплению жилых домов в с. Мужичи, с. Галашки, ст. Нестеровской [6]. Ежегодно в паводковый период происходит разрушение берегов рек Асса и Сунжа в непосредственной близости от жилых строений с. Галашки, с. Мужичи, с. Барсуки, ст. Орджоникидзевская, ст. Троицкая. По данным [22], в зону затопления паводками 1% обеспеченности р. Терек и ее притоков попадает 19 населенных пунктов республики. Общая площадь зон паводкового воздействия на реках республики составляет 60 кв. км [6].

В Кабардино-Балкарии гидрографическая сеть паводкового воздействия представлена рекой Терек и ее притоками различных порядков. Паводкоопасной является практически вся территория бассейна р. Терек, то есть

около 83% площади республики [20]. По данным [7], общая протяжённость зон паводкового воздействия на реках КБР составляет 620 километров, из них 130 км в равнинной, 310 км в предгорной и 180 км в горной части республики.

По особенностям формирования и протекания паводков и их негативным последствиям, территория республики, подверженная этим процессам, условно может быть разделена на 2 зоны [19].

Горные и предгорные районы относятся к зоне, где, кроме собственно паводков, высока вероятность прохождения в летний период по руслам основных рек, так называемых селеподобных паводков с существенной твердой составляющей. В большинстве случаев они являются результатом совместного действия талых вод и проливных дождей, выпадающих в пределах зоны, и сопровождаются стремительным подъемом уровня воды в достаточно узких речных долинах. При этом, вследствие значительных деформаций русел и разрушения берегов, страдают прибрежные участки населенных пунктов, дороги, мосты, линии связи и электропередач, гидротехнические сооружения. К этой зоне относятся населенные пункты с населением около 180 тыс. человек, и, в том числе, предгорная часть городов Нальчик и Тырныауз.

Равнинные районы республики входят в зону, где наводнения могут быть вызваны как паводками местного происхождения (бурное таяние снега, проливные дожди), так и паводками, сформировавшимися в зоне гор и предгорий. В случае селеподобных паводков, равнинных участков достигает только водная составляющая потоков. Кроме негативных последствий, перечисленных выше, в этой зоне имеет место затопление прилегающих к рекам территорий. Значительный ущерб при этом наносится населенным пунктам и сельскохозяйственным угодьям и объектам. В эту зону паводкового воздействия входит территория площадью 10,3 тыс. кв. км, с населением более 500 тыс. человек, включая города Прохладный, Майский, Терек, равнинную часть г. Нальчик [7, 23].

Наибольший урон населению и экономике наносят паводки редкой повторяемости с максимальным расходом. Имеются расчетные данные [11], что при паводках 1–5% обеспеченности площадь возможного затопления в равнинной части республики может превысить 15 тыс. га. Экономический ущерб при этом, может достигнуть 1 млрд руб. Так, например, в результате наводнения 2002 г. в республике пострадало 73 населенных пункта, было разрушено 552 и повреждено 3276 жилых домов, 80 мостов, 340 км автомобильных дорог, нарушено газоснабжение 12 населенных пунктов, пострадало 5 селепропускных лотков, 75 км берегоукрепительных сооружений, 156 км водоводов, 66 водозаборов, на значительной территории уничтожены сельскохозяйственные посевы ливневыми паводками были затоплены восемь скотомогильников с погибшими от сибирской язвы животными [20].

В Карачаево-Черкесской Республике, по данным Главного управления МЧС РФ по Карачаево-Черкесской Республике [10], в зону возможного под-

топления (в результате наложения интенсивного таяния снега на выпадение обильных осадков в виде дождя) с наибольшей вероятностью могут попасть: аулы Инжич-Чукун (62 дома), Кубина (136 домов), Псыж (74 дома) Абазинского района; аулы Апсуа (35 домов), Баралки (37 домов), Старо-Кувинск (70 домов), х. Дубянк (17 домов) Адыге-Хабльского района; села Красный Октябрь (179 домов), Нижняя Ермоловка (12 домов), Маруха (182 дома), Хасаут-Греческое (17 домов), станицы Зеленчукская (446 домов), Исправная (107 домов), Кардоникская (98 домов), Сторожевая (35 домов), хутора Ново-Исправненский (40 домов), Фроловский (43 дома) Зеленчукского района; аулы Верхняя Теберда (71 дом), Верхняя Маара (67 домов), Джингирик (21 дом), Карт-Джурт (12 домов), Нижний Карачай (25 домов), Нижняя Теберда (53 дома), Хумара (42 дома) Карачаевского района; аулы Икон-Халк (350 домов), Эркин-Халк (60 домов), Эркин-Юрт (260 домов) Ногайского района; аул Кызыл-Покун (10 домов), села Курджиново (205 домов), Псемен (88 домов), Рожкао (20 домов), Уруп (13 домов), станица Преградная (242 дома) Урупского района; аулы Али-Бердуковский (20 домов), Бесленей (6 домов), Инжичишко (2 дома), Псауче-Дахе (40 домов), Хабез (5 домов) Хабезского района; города Карачаевск (49 домов), Черкесск (620 домов) и Теберда (49 домов).

В Республике Северная Осетия-Алания (РСО-Алания) сезон паводков и половодий наступает в июне-августе в результате таяния снегов и ледников в высокогорной части республики и выпадения большого количества осадков. Районы паводкового воздействия представлены реками Терек, Ардон, Фиагдон и их притоками всех порядков. Так, например, в долине реки Ардон с 1849 по 2011 годы произошло 103 катастрофических паводка [9].

По данным Главного управления МЧС РФ по Республике Северная Осетия – Алания [14], общая протяженность зон опасного паводкового воздействия на реках Северной Осетии составляет 570 км, из них 53 км в равнинной, 330 км в предгорьях и 195 км в горной частях республики. Площадь территории республики, подверженной периодическому затоплению (Алагирский, Ардонский, Пригородный, Кировский, Правобережный, Моздокский и Дигорский районы), составляет 70,7 кв. км, повторяемость негативных гидрологических событий происходит с периодичностью 4–5 лет, средний объем экономического ущерба от негативного влияния паводков – 1,2 млрд руб., количество пострадавшего населения составляет около 32 тыс. человек. При наихудшем сценарии прохождения паводков, в зоне затопления может оказаться до 23 населенных пунктов в 7 муниципальных районах и 3 населенных пунктах городского округа Владикавказ с общим количеством домов 752. В зону затопления паводками 1% обеспеченности только р. Терек и ее притоков попадает 21 населенный пункт республики [23].

В Алагирском районе существует угроза подтопления южной и юго-западной частей села Суадаг (р. Суадагдон), подмыва домовладений и опор моста в центральной части села с. Хаталдон (р. Хеталдон), подтопления от вод р.

Цраудон юго-восточной части г. Алагир. В Ардонском районе наиболее проблемным участком является состояние дамбы на реке Терек по защите сел Коста и Ногкау. В Дигорском районе существует опасность подтоплений юго-восточной части с. Дур-Дур (р. Дур-Дур), сел Кора-Урсдон и Карман-Синдикау (р. Урсдон), левобережного скважинного водозабора г. Дигора. В Кировском районе возможно подтопление сел Дарг-Кох и Карджин (р. Камбилеевка). В Моздокском районе при высоких расходах р. Терек существует реальная угроза разрушения дамбы по защите с. Раздольное и затопления молочно-товарной фермы, молзавода, мясоперерабатывающего цеха, прудовых хозяйств колхоза «Украина». В Правобережном районе существует опасность прорыва дамбы щебзавода СКЖД. Ежегодно под угрозой разрушения паводками находятся водозаборы городов Алагир, Ардон, Дигора, сооружения магистральных газопроводов, ЛЭП 35–110 кВ, жилые здания и производственные сооружения Садонского СЦК, объекты Зарамагской ГЭС, жилые строения ряда населенных пунктов. В случае разрушения берегозащитной дамбы в районе Бесланского карьера возможно затопление 35–40% территории г. Беслан [14].

По данным [26], в результате наводнения 2002 г. в Северной Осетии было обесточено 46 населенных пунктов. В п. Каланинский Моздокского района вода затопила более 150 саманных домов. Дорога до Фаснала Ирафского района РСО – Алания и за ним размылась на протяжении 1,5 км. Были размыты водопроводные коммуникации в селах Дзинага и Фаснал. Почти неделю на дороге «Чикола – Мацута» обрушивались селевые потоки. Были смыты многие участки крупнейших автодорог региона, включая дорогу «Транскам». Река Ардон своими потоками снесла мосты в селах Зинцар, Унал, Мизур, Садон, Суадаг, Дзуарикау. Не остались в стороне такие горные села, как Даргавс, Кармадон, Балта, Горная Саниба, Кобан и др. Дождевые потоки затопили подвалы многих домов во Владикавказе, Ногире и др. Вышли из строя более 12 км дорог, более 150 электроопор, многокилометровые газовые трубы. 5% посевных площадей РСО-Алания было уничтожено наводнением. Ущерб по республике оценивался более чем в 0,5 млрд. рублей.

В Чеченской Республике общая площадь потенциально затапливаемых территорий составляет 1520 кв. км. Максимально подвержен затоплению бассейн реки Терек (919 кв. км), далее идут Сунжа и Аргун (191 и 145 кв. км соответственно), Шаро-Аргун – 65 кв. км, Белка – 49 кв. км, Яман-Су – 44 кв. км, Хулхулау – 43 кв. км, Ярык-Су – 24 кв. км, Басс – 20 кв. км. Минимальная потенциально затапливаемая площадь характерна для бассейна реки Аксай (19 кв. км) [2].

По данным Главного управления МЧС РФ по Чеченской Республике [8], при наихудшем развитии паводковой ситуации, в зону затопления может попасть до 34 населенных пунктов в 10 муниципальных районах и г. Грозный с населением до 26 тыс. чел., 2 объекта экономики, 17 социально значимых объекта, 1 участок железной дороги, 19 участков местных авто-

мобильных дорог общей протяженностью 28 км, 7 мостов. На территории Чеченской Республики существует 22 наиболее вероятных затапливаемых населенных пунктов: с. Харьковское (21 дом) и ст. Старощедринская (12 домов) Шелковского района; села Гвардейское (66 домов), Бено-Юрт (34 дома) и Знаменское (56 домов) Надтеречного района; г. Гудермес (11 домов), села Брагуны (440 домов) и Хангиш-Юрт (15 домов) Гудермесского района; села Старые Атаги (54 дома), Чечен-Аул (47 домов) и Виноградное (28 домов) Грозненского района; поселки Калинино и Войково (1518 домов) города Грозного; села Серноводск (276 домов) и Асиновское (705 домов) Сунженского района; села Ачхой-Мартан (25 домов), Шаами-Юрт (16 домов) и Катар-Юрт (6 домов) Ачхой-Мартановского района; село Цоци-Юрт (12 домов) Курчалоевского района; г. Урус-Мартан (8 домов) и с. Гехи-Чу (5 домов) Урус-Мартановского района; с. Агишты (5 домов) Шалинского района. При неблагоприятном развитии паводковой обстановки возможно повреждение железнодорожного моста через р. Аргун в г. Аргун, а также подтопление и размыв железнодорожного полотна (12 км) на участке г. Гудермес – ст. Червленная-Узловая.

Реки Ставропольского края в основном имеют спокойный характер. Но, иногда, в периоды весеннего половодья или интенсивных дождевых паводков, могут носить разрушительный характер. Формирование водного стока бассейнов основных рек края происходит в основном в горных районах, где велико количество осадков, а часть площади горных районов края занимают ледники, что обуславливает ежегодное прохождение весеннего половодья и летних паводков [24]. На реках Кубань, Кума и Подкумок сток вод половодья формируется в горах Кавказа. За счет таяния высокогорных снегов волна половодья на этих реках всегда более заметна и, если на равнинных реках половодье длится в среднем 2 месяца и заканчивается в конце апреля, то на реках, берущих начало в горах, продолжительность половодья составляет 5–6 месяцев и заканчивается в июле-августе. Как правило, наводнения на этих реках происходят в результате выпадения интенсивных дождей в период половодья (май-июнь). Реже бывают ЧС от затопления в результате дождевых паводков на равнинных реках края (Калаус, Суркуль, Егорлык, Томузловка, Мокрая Буйвола, Мокрый Карамык и др.) [20].

По данным [12], затоплению паводковыми водами в крае подвержено 577,5 кв. км земель, 8 городов, 2 поселка городского типа, 44 сельских населенных пункта. Только в пределах бассейна р. Кума, в зоне вероятного затопления паводковыми водами, находятся 26 населенных пунктов края, включая города Пятигорск, Кисловодск, Георгиевск, Минеральные Воды, Зеленокумск с общей численностью населения в зоне затоплений 25,9 тыс. человек. Общая площадь сельхозугодий, попадающих в зону затопления 1% обеспеченности, составляет 57,75 тыс. га. В целом, количество жителей края, проживающих на территориях, подверженных негативному воздействию вод, со-

ставляет около 240 тыс. человек. Ежегодный ущерб от наводнений в крае при прохождении рядовых паводков составляет около 300 млн рублей, в паводки редкой повторяемости – до 1,2 млрд рублей [24].

Гидрологические чрезвычайные ситуации на территории Ставропольского края происходят в среднем 3–4 раза в 10 лет. В период половодий (май–июнь), на горных реках Кубань, Кума, Подкумок и др., в основном, затопливаются территории Кочубеевского, Предгорного, Советского, Георгиевского, Минераловодского районов [15]. Восточные и северные районы Ставропольского края бедны водными ресурсами.

При прохождении паводков редкой повторяемости на реках Кума и Подкумок в зоне затопления могут оказаться следующие населенные пункты [24]:

- на р. Кума – ст. Бекешевская (43 дома), ст. Суворовская (120 домов) Предгорного района; ст. Александрийская (200 домов), ст. Подгорная (400 домов), с. Новозаведенное (13 домов) Георгиевского района; с. Орбельяновка (23 дома), с. Прикумское (260 домов), с. Еруслановка (22 дома), п. Евдокимовский (14 домов), п. Первомайский (462 дома), с. Левокумка (847 домов), г. Минеральные Воды (177 домов) Минераловодского района; с. Солдато-Александровское (66 домов), с. Отказное (59 домов), г. Зеленокумск (512 домов), с. Нины (483 дома) Советского района; с. Стародубское (74 домов), с. Архангельское (1756 домов), с. Орловка (50 домов), с. Покойное (105 домов), п. Катасон (23 дома) Буденновского района;
- на р. Подкумок – г. Пятигорск (90 домов), г. Кисловодск (20 домов) Предгорного района; г. Георгиевск (667 домов), ст. Лысогорская (200 домов), ст. Незлобная (50 домов) Георгиевского района.

В ряду многих наводнений на реках Ставропольского края, вызванных интенсивным таянием снега и обильными дождями, особенно сильным по площади затопленной территории и масштабам разрушений было наводнение в июне 2002 г. В крае было подтоплено около 15,5 тысяч жилых домов, 78 объектов жилищно-коммунального хозяйства. Разрушено 22 км водопроводов, 6 водозаборов, 455 трансформаторных подстанций, более 22 км тепловых сетей, около 60 км линий электропередач. Повреждено более 40 объектов здравоохранения, 40 зданий школ, 38 детских садов, 13 водозаборов, 105 мостов (2 железнодорожных, 46 автомобильных, 57 пешеходных), около 160 км газопроводов, 114 км автомобильных дорог, заилено более 3300 питьевых колодцев. Нарушено газоснабжение 46 населенных пунктов. В результате наводнения были затоплены земли таких благодатных районов, как

Минераловодский, Георгиевский, Кочубеевский, Советский, Предгорный. Ливневыми паводками были затоплены семь скотомогильников с погибшими от сибирской язвы животными. Четыре таких скотомогильника были затоплены в Минераловодском районе у сел Ульяновское, Первомайское, Ленинское и Канглы, а три скотомогильника были затоплены в Кочубеевском районе – возле станицы Барсуковская, у хуторов Новокубанский и Ульяновский [15]. Прошедший аномальный паводок на реках Кума, Подкумок, Бугунта (в районе Кавказских Минеральных Вод), вызвал катастрофическое затопление селитебных зон в гг. Минеральные Воды, Пятигорск, Ессентуки, Кисловодск и привел к значительным разрушениям и человеческим жертвам. В Пятигорске затопленными (водами р. Подкумок) оказались более 1500 домов. В Ессентуках под водой оказался весь одноэтажный центр города. В Кисловодске рухнул мост через р. Подкумок. Размытым оказалось железнодорожное полотно на 3 участках. В зоне затопления оказалась свалка бытовых отходов г. Минеральные Воды, расположенная на первой надпойменной террасе р. Кумы, а также биомы, склады ядохимикатов и минеральных удобрений и другие объекты [24]. По данным администрации Ставропольского края общий ущерб от наводнения 2002 года составил около 2,5 млрд руб. [15].

Проведенные нами сбор, обработка и анализ, имеющихся в архивах МЧС РФ, статистических данных о произошедших (за последние 25 лет) на территории Северо-Кавказского региона чрезвычайных ситуациях гидрологического характера [21], показали, что ежегодно в регионе происходит в среднем около 2 ЧС, обусловленных наводнениями. Наибольшее количество гидрологических ЧС происходит в Карачаево-Черкесской Республике (23,9% от всех ЧС в регионе, обусловленных наводнениями), Кабардино-Балкарской Республике (21,7%) и Республике Дагестан (17,4%). Наименьшее – в Республике Ингушетия и Ставропольском крае (по 6,5%). Чаще всего эти чрезвычайные ситуации происходят на территории региона в июне (около 40% от всех ЧС гидрологического характера) и мае (26,0%). На летние месяцы приходится 67,4% всех ЧС в регионе, обусловленных наводнениями. Следует отметить, что наводнения в Ставропольском крае, Карачаево-Черкесской и Кабардино-Балкарской республиках нередко имеют катастрофический характер, что приводит к ЧС вплоть до федерального уровня. Экономический ущерб от каждой из таких ЧС исчисляется миллиардами рублей.

Выводы

Проведенная оценка масштабов и опасности произошедших наводнений на территории Северного Кавказа позволила определить наиболее гидролого-опасные районы региона, зонировать его территорию по масштабу и степени опасности возникающих гидрологических чрезвычайных ситуаций и оценить социально-экономические аспекты их последствий.

**Библиографический
список**

1. Аксянов Т.М. Паводочная опасность в низовьях реки Терек и пути ее преодоления на территории Дагестана // Проблемы снижения природных опасностей и рисков. Материалы Международной научно-практической конференции «ГЕОРИСК – 2012». В двух томах. Т. 2. М.: РУДН, 2012. С. 139–144.
2. Бекмурзаева Л.Р. Геоэкологическая оценка опасных природных процессов в ландшафтах Чеченской Республики методами ГИС-технологий: автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геор. наук. М., 2011. 24 с.
3. Водные ресурсы Дагестана: состояние и проблемы / отв. ред. И.М. Сайпулаев, Э.М. Эльдаров. Махачкала, 1996. 180 с.
4. Горелиц О.В., Землянов И.В., Павловский А.Е., Сапожникова А.А., Поставик П.В., Яготинцев В.Н. Катастрофические паводки 2002 и 2005 гг. в дельте Терека // Экстремальные гидрологические события в Арало-Каспийском регионе. Труды международной научной конференции Москва, 19–20 октября 2006 г. М., 2006. С. 144–148.
5. Государственные доклады «О состоянии защиты населения и территорий Республики Дагестан от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2008–2014 гг.». Махачкала: Главное управление МЧС РФ по Республике Дагестан, 2009–2015.
6. Государственные доклады «О состоянии защиты населения и территорий Республики Ингушетия от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера за 2008–2014 гг.». Магас: Главное управление МЧС РФ по Республике Ингушетия, 2008–2014.
7. Государственные доклады «О состоянии защиты населения и территорий Кабардино-Балкарской Республики от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2008–2014 гг.». Нальчик: Главное управление МЧС РФ по Кабардино-Балкарской Республике, 2009–2015.
8. Государственные доклады «О состоянии защиты населения и территории Чеченской Республики от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2008–2014 гг.». Грозный: Главное управление МЧС РФ по Чеченской Республике, 2009–2015.
9. Дзодзикова М.Э. Радиометрические измерения русловых отложений // Вестник Владикавказского научного центра. Т. 15. 2015. №2. С. 47–57.
10. Доклады «О состоянии защиты населения и территорий Карачаево-Черкесской Республики от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера за 2008–2014 гг.». Черкесск: Главное управление МЧС РФ по Карачаево-Черкесской Республике, 2009–2015.
11. Защита от затопления и подтопления городов, населенных пунктов, объектов народного хозяйства и ценных земель в бассейне р. Терек на территории пяти республик Российской Федерации – Дагестана, Ингушетии, Кабардино-Балкарии, Северной Осетии, Чечни (первоочередные противопаводковые мероприятия). Федеральная целевая программа. М.: Роскомвод, 1995. 63 с.
12. Краевая целевая программа «Экология и природные ресурсы Ставропольского края на 2012–2015 годы. Утверждена постановлением Правительства Ставропольского края от 20 июля 2011 г. №268-п. Ставрополь, 2011. 27 с.
13. Кузин П.С. Классификация рек и гидрологическое районирование. Л.: ГМИ, 1960. 455 с.

14. Материалы для ежегодного государственного доклада «О состоянии защиты населения и территории Республики Северная Осетия – Алания от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2008–2014 гг.». Владикавказ: Главное управление МЧС РФ по Республике Северная Осетия – Алания, 2008–2014.
15. Материалы для подготовки ежегодного государственного доклада «О состоянии защиты населения и территории Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» по Ставропольскому краю за 2008–2014 гг.». Ставрополь: Главное управление МЧС РФ по Ставропольскому краю, 2009–2015.
16. Нежиховский Р.А. Наводнения на реках и озерах. Л., 1988. 184 с.
17. Природные опасности России. Гидрометеорологические опасности / под ред. Г.С. Голицина, А.А. Васильева. М.: Издательская фирма «КРУК», 2001. 296 с.
18. Пяковский. Наводнения. Л.: ГМИ, 1982. 372 с.
19. Разумов В.В., Перекрест В.В., Стрешнева Н.П., Кюль Е.В. Атлас природных опасностей и стихийных бедствий Кабардино-Балкарской Республики. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2000. 66 с.
20. Разумов В.В., Аджиев А.Х., Разумова Н.В. и др. Опасные природные процессы Северного Кавказа / под ред. проф. В.В. Разумова. М.: Изд-во «Феория», 2013. 320 с.
21. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2017621315 «База данных чрезвычайных ситуаций (обусловленных наводнениями), произошедших на территории регионов Российской Федерации / Разумов В.В., Аджиев А.Х., Разумова Н.В. и др. Дата государственной регистрации в Реестре баз данных 15 ноября 2017 г.
22. Схема комплексного использования и охраны водных объектов рек бассейна Каспийского моря на юг от бассейна Терека до государственной границы РФ. Книга 2. Оценка экологического состояния и ключевые проблемы речного бассейна. М.: НТЦ «РегионГидроПроект», 2014. 161 с.
23. Схема комплексного использования и охраны водных объектов рек бассейна реки Терек (Российская часть бассейна). Приложение 4. Пояснительная записка к Книге 2 проекта СКИОВО «Оценка экологического состояния и ключевые проблемы речного бассейна». М.: НТЦ «РегионГидроПроект», 2014. 53 с.
24. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна рек Каспийского моря междуречья Терек – Волга. Книга 2. Оценка экологического состояния и ключевые проблемы речного бассейна. М.: НТЦ «РегионГидроПроект», 2013. 68 с.
25. Федеральная целевая программа «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012 – 2020 годах». Постановление Правительства РФ от 19 апреля 2012 г. №350. М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2012. 31 с.
26. Хулелидзе К.К. Анализ опасных природных процессов на территории Северной Осетии // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2010. Вып. 1. С. 48–49.
27. Четырехязычный энциклопедический словарь терминов по физической географии. М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1980. 704 с.

References

1. Aksjanov T.M. Pavodochnaja opasnost' v nizov'jah reki Terek i puti ee preodolenija na territorii Dagestana (Flood danger in the lower reaches of the Terek River and ways to overcome it in the territory of Dagestan) // Problemy snizhenija prirodnyh opasnostej i riskov. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «GEORISK – 2012». V dvuh tomah. T. 2. M.: RUDN, 2012. C. 139–144.
2. Bekmurzaeva L.R. Geojekologicheskaja ocenka opasnyh prirodnyh processov v landshaftah Chechenskoj Respubliki metodami GIS-tehnologii (Geoecological assessment of hazardous natural processes in the landscapes of the Chechen Republic using GIS technologies) // Avtoref. dis. na soisk. uch. step. kand. geor. nauk. M., 2011. 24 s.
3. Vodnye resursy Dagestana: sostojanie i problem (Water resources of Dagestan: state and problems) / Otv. red. I.M. Sajpulaev, Je.M. Jel'darov. Mahachkala, 1996. 180 s.
4. Gorelic O.V., Zemljanov I.V., Pavlovskij A.E., Sapozhnikova A.A., Postavik P.V., Jagotincev V.N. Katastroficheskie pavodki 2002 i 2005 gg. v del'te Tereka (Catastrophic floods in 2002 and 2005 in the Terek delta) // Jekstremal'nye gidrologicheskie sobytija v Aralo-Kaspijskom regione. Trudy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii Moskva, 19–20 oktjabrja 2006 g. M., 2006. C. 144–148.
5. Gosudarstvennye doklady «O sostojanii zashhity naselenija i territorij Respubliki Dagestan ot chrezvychajnyh situacij prirodnogo i tehnogenogo haraktera v 2008–2014 gg.» (The state reports «About a condition of protection of the population and territories of the Republic of Dagestan from emergency situations of natural and technogenic character in 2008–2014»). Mahachkala: Glavnoe upravlenie MChS RF po Respublike Dagestan, 2009–2015.
6. Gosudarstvennye doklady «O sostojanii zashhity naselenija i territorij Respubliki Ingushetija ot chrezvychajnyh situacij prirodnogo i tehnogenogo haraktera za 2008–2014 gg.» (The state reports «About a condition of protection of the population and territories of the Republic of Ingushetia from emergency situations of natural and technogenic character for 2008–2014»). Magas: Glavnoe upravlenie MChS RF po Respublike Ingushetija, 2008–2014.
7. Gosudarstvennye doklady «O sostojanii zashhity naselenija i territorij Kabardino-Balkarskoj Respubliki ot chrezvychajnyh situacij prirodnogo i tehnogenogo haraktera v 2008–2014 gg.» (The state reports «About a condition of protection of the population and territories of Kabardino-Balkar Republic from emergency situations of natural and technogenic character in 2008–2014»). Nal'chik: Glavnoe upravlenie MChS RF po Kabardino-Balkarskoj Respublike, 2009–2015.
8. Gosudarstvennye doklady «O sostojanii zashhity naselenija i territorii Chechenskoj Respubliki ot chrezvychajnyh situacij prirodnogo i tehnogenogo haraktera v 2008–2014 gg.» (The state reports «About a condition of protection of the population and the territory of the Chechen Republic from emergency situations of natural and technogenic character in 2008–2014»). Groznyj: Glavnoe upravlenie MChS RF po Chechenskoj Respublike, 2009–2015.
9. Dzodzikova M.Je. Radiometricheskie izmerenija ruslovyh otlozhenij (Radiometric measurements of channel deposits // Bulletin of the Vladikavkaz scientific center) // Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo centra. T. 15. 2015. №2. C. 47–57.

10. Doklady «O sostojanii zashhity naselenija i territorij Karachaevo-Cherkesskoj Respubliki ot chrezvychajnyh situacij prirodnogo i tehnogenogo haraktera za 2008–2014 gg.» (Reports «About a condition of protection of the population and territories of the Karachay-Cherkess Republic from emergency situations of natural and technogenic character for 2008–2014»). Cherkessk: Glavnoe upravlenie MChS RF po Karachaevo-Cherkesskoj Respublike, 2009–2015.
11. Zashhita ot zatopenija i podtoplenija gorodov, naselennyh punktov, objektov narodnogo hozjajstva i cennyh zemel' v bassejne r. Terek na territorii pjati respublik Rossijskoj Federacii – Dagestana, Ingushetii, Kabardino-Balkarii, Severnoj Osetii, Chechni (pervoocherednye protivopavodkovye meroprijatija). Federal'naja celevaja programma (Protection against Flooding and Flooding of the Cities, Settlements, Objects of the National Economy and Valuable Lands in the Basin of the Terek River in the territory of Five Republics of the Russian Federation – Dagestan, Ingushetia, Kabardino-Balkaria, North Ossetia, Chechnya (Priority Antiflood Actions). Federal target program). M.: Roskomvod, 1995. 63 s.
12. Kraevaja celevaja programma «Jekologija i prirodnye resursy Stavropol'skogo kraja na 2012–2015 gody. (The regional target program «Ecology and natural resources of Stavropol Krai for 2012–2015.) Utverzhdena postanovleniem Pravitel'stva Stavropol'skogo kraja ot 20 ijulja 2011 g. №268-p. Stavropol', 2011. 27 s.
13. Kuzin P.S. Klassifikacija rek i gidrologicheskoe rajonirovanie (Classification of the rivers and hydrological division into districts). L.: GMI, 1960. 455 s.
14. Materialy dlja ezhegodnogo gosudarstvennogo doklada «O sostojanii zashhity naselenija i territorii Respubliki Severnaja Osetija-Alanija ot chrezvychajnyh situacij prirodnogo i tehnogenogo haraktera v 2008–2014 gg.» (Materials for the annual state report «About a condition of protection of the population and the territory of the Republic Northern Ossetia-Alania from emergency situations of natural and technogenic character in 2008–2014»). Vladikavkaz: Glavnoe upravlenie MChS RF po Respublike Severnaja Osetija-Alanija, 2008–2014.
15. Materialy dlja podgotovki ezhegodnogo gosudarstvennogo doklada «O sostojanii zashhity naselenija i territorii Rossijskoj Federacii ot chrezvychajnyh situacij prirodnogo i tehnogenogo haraktera» po Stavropol'skomu kraju za 2008–2014 gg.» (Materials for preparation of the annual state report «About a condition of protection of the population and the territory of the Russian Federation from emergency situations of natural and technogenic character» across Stavropol Krai for 2008–2014»). Stavropol': Glavnoe upravlenie MChS RF po Stavropol'skomu kraju, 2009–2015.
16. Nezhihovskij R.A. Navodnenija na rekah i ozerah (Floods on the rivers and lakes). L., 1988. 184 s.
17. Prirodnye opasnosti Rossii. Gidrometeorologicheskie opasnosti (Natural dangers of Russia. Hydrometeorological dangers) / pod red. G.S. Golicina, A.A. Vasil'eva. M.: Izdatel'skaja firma «KRUK», 2001. 296 s.
18. Pjaskovskij. Navodnenija (Floods). L.: GMI, 1982. 372 s.
19. Razumov V.V., Perekrest V.V., Streshneva N.P., Kyul E.V. Atlas prirodnyh opasnostej i stihijnyh bedstvij Kabardino-Balkarskoj respublik (Atlas of natural dangers and natural disasters of Kabardino-Balkar Republic). Sankt-Peterburg: Gidrometeoizdat, 2000. 66 s.
20. Razumov V.V., Adzhiev A.H., Razumova N.V. i dr. Opasnye prirodnye processy Severnogo Kavkaza (Natural hazards of the North Caucasus) / pod red. prof. Razumova V.V. M.: Izd-vo «Feorija», 2013. 320 s.

21. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh №2017621315 «Baza dannyh chrezvychajnyh situacij (obuslovlennyh navodnenijami), proizoshedshih na territorii regionov Rossijskoj Federacii (The certificate on the state registration of the database No. 2017621315 "The database of the emergency situations (caused by floods), which have happened on the territory of regions of the Russian Federation) / Razumov V.V., Adzhiev A.H., Razumova N.V. i dr. Data gosudarstvennoj registracii v Reestre baz dannyh 15 nojabrja 2017 g.
22. Shema kompleksnogo ispol'zovanija i ohrany vodnyh ob#ektov rek bassejna Kaspijskogo morja na jug ot bassejna Tereka do gosudarstvennoj granicy RF (The scheme of complex use and protection of water objects of the rivers of the basin of the Caspian Sea to the south from the basin of Terek to frontier of the Russian Federation) Kniga 2. Ocenka jekologicheskogo sostojanija i ključevye problemy rechnogo bassejna. M.: NTC «RegionGidroProekt», 2014. 161 s.
23. Shema kompleksnogo ispol'zovanija i ohrany vodnyh ob#ektov rek bassejna reki Terek (Rossijskaja chast' bassejna) (Scheme of complex use and protection of water objects of the rivers of a river basin Terek (Russian part of the pool). Prilozhenie 4. Pojasnitel'naja zapiska k Knige 2 proekta SKIOVO «Ocenka jekologicheskogo sostojanija i ključevye problemy rechnogo bassejna». M.: NTC «RegionGidroProekt», 2014. 53 s.
24. Shema kompleksnogo ispol'zovanija i ohrany vodnyh ob#ektov bassejna rek Kaspijskogo morja mezhdurech'ja Terek – Volga (The scheme of complex use and protection of water objects of the basin of the rivers of the Caspian Sea of Entre Rios Terek – Volga) . Kniga 2. Ocenka jekologicheskogo sostojanija i ključevye problemy rechnogo bassejna. M.: NTC «RegionGidroProekt», 2013. 68 c.
25. Federal'naja celevaja programma «Razvitie vodohozjajstvennogo kompleksa Rossijskoj Federacii v 2012–2020 godah» (Federal target program «Development of a Water Management Complex of the Russian Federation in 2012–2020»). Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 19 aprelja 2012 g. №350. M.: Ministerstvo prirodnyh resursov i jekologii Rossijskoj Federacii, 2012. 31 s.
26. Hulelidze K.K. Analiz opasnyh prirodnyh processov na territorii Severnoj Osetii (Hulelidze K.K. The analysis of natural hazards in the territory of North Ossetia). Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoj zashhity. 2010. Vyp. 1. C. 48–49.
27. Chetyrehjazychnyj jenciklopedičeskij slovar' terminov po fizicheskoj geografii (The four-lingual encyclopedic dictionary of terms on physical geography). M.: Izd-vo «Sovetskaja jenciklopedija», 1980. 704 s.

УДК 911.3

**Тикунова И.Н. [Tikunova I.N.],
Судакова А.Е. [Sudakova A.E.]**

ТУРИСТСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ СТРАН ШЕЛКОВОГО ПУТИ

The tourist potential of the Silk road countries

С начала XXI века появилось много амбиционных проектов, направленных на возрождение трансконтинентального исторического маршрута Шелкового пути. В рамках этих проектов большое внимание уделяется развитию туризма, как одного из эффективных механизмов укрепления сотрудничества стран. Программа ЮНВТО «Шелковый путь» объединила 33 страны. С одной стороны, это пёстрое пространство, богатое туристическими дестинациями и туристическими продуктами, с уникальной историей, разнообразием природных условий и культурных традиций. С другой стороны, это территории кардинально отличающиеся по уровню социально-экономического развития, который влияет на состояние туристической индустрии. Выделены два ядра роста – Европа и Япония, а также активно развивающиеся страны Юго-Восточной Азии. В мозаичное пространство между этими полюсами входят как довольно стабильные в экономическом плане страны, так и неблагополучные. Для оценки туристического потенциала определен комплекс показателей и произведен расчет интегральных характеристик, которые позволили выделить 6 групп стран. Проведен их анализ и выявлены закономерности в их формировании.

Since the beginning of the 21st century there are many ambitious projects aimed at the revival of the historical transcontinental route of the Silk road. In these projects, much attention is paid to the development of tourism as one of the most effective mechanisms for strengthening cooperation between the countries. The UNWTO "Silk road" brought together 33 countries. On the one hand, is a colorful space, is rich in tourist destinations and tourism products, with a unique history, diversity of natural conditions and cultural traditions. On the other hand, this territory is radically different in terms of socio-economic development, which affects the state of the tourism industry. Allocated two nuclear of growth – Europe and Japan and rapidly developing countries of South-East Asia. In the mosaic space between these poles come as quite stable in economic terms, the country and the disadvantaged. To evaluate the tourist potential is defined by a set of indicators and the calculation of the integral characteristics, which enabled to distinguish 6 groups of countries. Their analysis is carried out and the regularities in their formation.

Ключевые слова: Шелковый путь, туристический потенциал, классификация стран.

Key words: silk road, tourism potential, classification of countries.

Введение

Шелковый путь представляет собой величайшее наследие человеческой истории. Это была первая трансконтинентальная система торговых маршрутов, соединившая такие разные культуры, как древние цивилизации Востока, Запада и обеспечившая беспрецедентный для того времени культурный обмен между великими древними цивилизациями – Китайской, Индийской, Персидской, Греческой, Римской и Египетской. Долгие века по Шелковому пути перемещались не только разнообразные товары, предметы роскоши и золото, но и традиции, научные и религиозные знания, идеи, технологии и инновации.

С начала XXI века отмечается небывалый рост интереса к региону некогда утратившего свое значение Шелкового пути. Все чаще стали появляться амбициозные проекты, направленные на возрождение этого исторического маршрута. Китайская инициатива в настоящий момент подвела черту под идеями разных стран, объединив их и создав проект «Один пояс – один путь», призванный восстановить и увеличить значение трансконтинентальных путей и связей между Востоком и Западом. Предполагается, что Новый Шелковый путь будет не только системой современной транспортной инфраструктуры, но и широким поясом экономического сотрудничества. Идеи инициативы «Один пояс – один путь» базируются на возможности глубокой кооперации участвующих стран, взаимном их обогащении и процветании, на чувствах уважения и ответственности друг перед другом [Ахметшин, 2002].

Одним из самых эффективных механизмов развития солидарности и сотрудничества стран является развитие международного туризма [Tikunov et al, 2017]. Сегодня Шелковый путь – это пестрое пространство, богатое туристскими дестинациями и туристскими продуктами, основанными на уникальной истории, разнообразии природных условий и культурных традициях народов этой территории. Кроме того, развитие транспортных коридоров, предполагаемое в проекте «Один пояс – один путь», только поспособствует ускоренному развитию туризма в странах Шелкового пути, а туристская индустрия, в свою очередь, упростит установление культурных контактов участников. Концепция туризма по Шелковому пути была впервые затронута на Генеральной Ассамблее ЮНВТО (Всемирной Туристической Организации) в Индонезии в 1993 году. В связи с возродившимся интересом к Шелковому пути – ростом культурного обмена, торговли и туризма – ЮНВТО решили восстановить древний путь как туристический концепт, соединив Восток и Запад. Работая вместе с ЮНЕСКО, программа ЮНВТО объединила 33 страны, предлагая туристический концепт, сфокусированный на культурном и природном наследии, а также на разнообразии транспортных средств (морские и континентальные маршруты).

В настоящий момент программа «Шелковый путь» выработала несколько блоков основных задач, которые включают в себя создание маршрута с максимально «проницаемыми» границами, всеохватывающий статус туризма в регионе, взаимовыгодное сотрудничество участников, видение туризма как агента, укрепляющего мир и культурное взаимопонимание и сохраняющего культурное и природное наследие.

Из более мелких задач, на которые подразделяются основные цели, можно выделить такие, как создание узнаваемого бренда Шелкового пути, формирование высококачественной инфраструктуры, поддержку туристского сектора со стороны государств, а также тесное сотрудничество между странами, создание современных систем управления культурным наследием, забота об окружающей среде и продвижение межкультурного диалога.

Материалы и методы исследования

Шелковый путь исторически объединяет две великие цивилизации прошлого – Запад и Восток, проходя по территории стран, кардинально отличающихся по уровню социально-экономического развития. Такое положение дел значительно затрудняет процесс принятия соглашений странами-участницами программы ЮНВТО «Шелковый путь» по вопросам сотрудничества в области туризма и выстраивания единой транспортной сети и единого стандарта в сфере обслуживания. Вместе с этим, именно культурное разнообразие стран вдоль Шелкового пути делает этот туристский маршрут столь привлекательным для туристов.

Различия между странами-участницами в первую очередь основываются на уровне их социально-экономического развития, который является прямым результатом длительного исторического пути и разнообразия природных и социальных условий в странах Европы, Центральной и Восточной Азии. Шелковый путь объединяет как страны-гиганты (Россия, Китай), так и страны-карлики (Сан-Марино, Армения), как флагманов экономического развития (Япония, Италия, Израиль), так и отстающих (Таджикистан, Бангладеш), страны с развитым сектором туризма (Италия, Греция, Турция, Хорватия) и политически нестабильные, в некоторых отношениях опасные для туристов страны (КНДР, Сирия, Саудовская Аравия).

Кроме того, в таких больших странах, как Россия и Китай в отношении Шелкового пути целесообразно говорить лишь о некоторых регионах, а не обо всей территории в целом. В России северная ветвь Шелкового пути в основном касалась южной части Западной и Восточной Сибири, Южного Урала, низовий Волги, Кавказа и побережья Черного моря и соответствующие регионы страны. Кроме того, хотя и пути древнего Шелкового пути не затрагивали столичные регионы, в случае туристского развития Москву и Санкт-Петербург также стоит причислить к перспективным в отношении развития туризма, связанного с этим торговым маршрутом. В Китае к Шелковому пути относятся такие провинции как Шэньси, Ганьсу, Синьцзян-Уйгурский АР, Цинхай и Нинся, которые имеют на территории КНР свои особенности экономического развития.

Как уже отмечалось выше все 33 страны-участницы проекта «Шелковый путь» значительно отличаются по уровню социально-экономического развития. Так, по показателю ВВП на душу населения (по ППС) среди этих стран можно выделить несколько групп. К самым развитым странам, закономерно, можно отнести страны Южной Европы, Японию и Республику Корею, а также некоторые страны Юго-Западной Азии. К группе средне развитых стран относятся страны Восточной Европы, относительно богатые или малонаселенные страны Центральной Азии, а также Китай, Россия и Индонезия. В группу слаборазвитых попадают небольшие страны Закавказья (кроме Азербайджана), Центральной Азии, а также страны, страдающие от затяж-



Рис. 1. Различия социально-экономического развития стран Шелкового пути.

ных кризисов и военных конфликтов (Сирия, Украина). К этой же группе относится такая закрытая страна, как КНДР (рис. 1).

Необходимо отметить, что в регионах Шелкового пути находятся динамично развивающиеся страны, которые занимают все большую долю мирового рынка во многих сферах экономики, в том числе и в туризме. Это, в первую очередь, Китай и Индонезия. Так, ВВП на душу населения по ППС в Китае стабильно растет с 2006 года в среднем на 10% ежегодно (хотя рост замедляется). То же наблюдается в Индонезии со стабильным средним ростом этого показателя на 5% ежегодно.

Эти страны вместе с развитыми странами Европы, а также вместе с относительно стабильными странами Центральной Азии и Россией могут создать сильную экономическую базу для развития взаимного сотрудничества.

Напротив, страны слаборазвитые создают препятствия к дальнейшему развитию. Особенно это касается стран закрытых, со сложной визовой политикой, а также стран, где присутствуют горячие точки и непростая политическая ситуация. Это усложняется положением данных стран как транзитных между участниками, которые имеют наибольший потенциал.

Кроме того, что касается социально-экономического развития регионов России и Китая, прилегающих к Шелковому пути, необходимо отметить, что эти области и провинции сравнительно недостаточно развиты внутри этих стран. Так, перспективный район в отношении развития туризма Шелкового пути в России – Республика Алтай – занимает только 73 место (182 тыс. р./чел.) в стране по показателю ВРП на душу населения, Астраханская область – 45 место (284 тыс. р./чел.), Краснодарский край – 29 место (325 тыс.), республики Кавказа – 70-е – 80-е места в стране. В Китае провинция Шэньси занимает только 15 место (50 тыс. юаней на человека), Ганьсу – 30 место (26 тыс.), а Синьцзян-Уйгурский АР – 16 место (40 тыс.) [Нац. стат.].

Также относительно сильно различаются страны-участницы и по Индексу Развития человеческого потенциала. Большинство стран относится к высокому и очень высокому уровню ИЧР. В число этих стран входят все страны Европы, Восточной и Юго-Восточной Азии (кроме Индонезии), а также Саудовская Аравия, Казахстан, Монголия и Россия. В группу стран со средним показателем попали в основном страны Центральной Азии. Пакистан представляет собой страну с низким ИЧР.

Немаловажное значение имеет инвестиционная привлекательность стран Шелкового пути. Условия развития китайской инициативы Нового Шелкового пути, необходимость реконструкции и модернизации требует значительного числа вложений. Поэтому инвестиционный климат имеет непосредственное значение для развития туризма, особенно трансграничного туризма в этих странах.

Из стран-участниц проекта ЮНВТО в мировом рейтинге выделяются Китай (2 место, 1,82), Япония (6 место, 1,73), Италия (16 место, 1,48), Республика Корея (17 место, 1,47). При этом Китай уже около десятилетия находится в числе лидеров в международном рейтинге, что говорит об устойчивом интересе инвесторов к китайскому рынку. Инвесторы видят долгосрочную выгоду в растущем среднем классе Китая. В 2015 г. поток иностранных инвестиций в Китай увеличился на 29% и составил около 300 млрд долл. США (при этом 54% пришлось на Гонконг). Источниками этих инвестиций по большей части являлись Япония, Сингапур и Южная Корея. Между тем, наиболее крупной сделкой за 2015 г. оказалось вложение властей ОАЭ в гостиничный сектор Китая в размере 1,2 млрд долл. США [FDI, 2016].

Устойчивыми остаются позиции Японии, Италии и Южной Кореи, и, в целом, снова растет интерес инвесторов к рынкам развитых, а не развивающихся стран. Так, Япония с 2014 года поднялась в рейтинге на 13 позиций, и ее потенциал продолжает расти.

Несмотря на то, что Южная Корея сместилась вниз на одну позицию в рейтинге инвестиционной привлекательности, поток инвестиций в эту страну продолжает расти: в 2015 г. он составил 20,4 млрд. долл. США, что на 11% превысило уровень предыдущего года. Растет доля инвесторов среди стран

Ближнего Востока (6,9% от общего потока, рост на 526%), также растет доля инвестиций из Китая [FDI, 2016].

В целом, интерес инвесторов растет к рынкам быстро развивающихся стран Азии. Не снижается также и инвестиционная активность в Европейском Союзе, несмотря на политические и экономические проблемы последних лет. Однако в остальных странах Евразийского материка инвестиционный потенциал остается низким и даже сокращается, и это снижение заметно больше всего в странах Восточной Европы.

Еще один социально-экономический показатель, который значительно влияет на привлекательность страны именно для сферы туризма и комфортность пребывания туристов в стране – это уровень безопасности. Лидерами по набору показателей, связанных с безопасностью, среди стран-участниц являются Япония (8,64), Китай (8,61), Хорватия (8,57), а также Саудовская Аравия, Грузия, Азербайджан и Армения. В группе наиболее отстающих стран в плане безопасности для туристов оказались Пакистан, Египет, Россия, Турция и Бангладеш. Целый ряд стран не получил никакой оценки (Ирак, КНДР, Сирия, Туркменистан, Узбекистан и Украина) в связи с закрытостью полноценной и достоверной информации об этих странах или нестабильностью политической обстановки [Rankings..., 2017].

Результаты исследования и их обсуждение

Таким образом, по уровню социально-экономического развития среди стран-участниц программы ЮНВТО «Шелковый путь» можно выделить несколько групп. Это, прежде всего, два полюса высокого и относительно высокого уровня развития и потенциального роста: Южная Европа (Италия, Греция, Сан-Марино) и Юго-Восточная и Восточная Азия (Китай, Япония, Индонезия, Южная Корея), которые являются, по сути, конечными пунктами древнего торгового маршрута и представителями практически противоположных в культурном и экономическом смысле цивилизациями. К этой группе можно отнести Саудовскую Аравию и Израиль, где единственным препятствием для активного туризма являются особенности культуры и политики.

Между этими регионами, фактически на протяжении Великого Шелкового пути и планируемых инфраструктурных путей Нового Шелкового пути находятся очень разнородные как по уровню развития, так и по культурным аспектам страны. Здесь выделяется группа относительно слаборазвитых стран Центральной и Средней Азии и Закавказья (Таджикистан, Киргизия, Узбекистан, Пакистан, Грузия, Армения), а также Бангладеш, где невысоким экономическим показателям часто сопутствуют низкие показатели безопасности и устойчивости, а также либо неблагоприятная репутация на туристском рынке, либо, в целом, слабая осведомленность туристов об этих странах.

В другую группу можно включить такие страны Центральной, Восточной и Юго-Западной Азии, как Туркменистан, Иран, Ирак, Азербайджан, Монголия и Турция. Эти страны имеют средние среди стран-участниц и достаточно стабильные показатели экономического развития, вместе с тем в каждой из стран существует набор серьезных социальных или экономических проблем, несколько препятствующих развитию туризма (слабые показатели безопасности, закрытость, недавняя политическая или экономическая нестабильность и др.).

Еще к одной группе можно отнести страны Восточной Европы (Хорватия, Болгария), а также Россию и Казахстан. Эти страны имеют сравнительно высокие социально-экономические показатели и в основном не страдают от политических проблем. Россия и Казахстан также отличаются близостью как к культуре Запада, так и к культуре Востока и, кроме этого, высоким потенциалом к развитию транзитных путей по их территории.

Отдельной «проблемной» группой является группа стран, где политическая ситуация крайне нестабильна на данный момент и, вследствие этого, понижены социально-экономические показатели и низки позиции в рейтинге безопасных туристических направлений. К этим странам относятся Сирия, Ирак, Украина и КНДР.

В 2015 г. лидерами среди стран-участниц программы «Шелковый путь» по комплексной оценке конкурентоспособности в туризме стали Италия (4,98), Япония (4,95) и Китай (4,54), заняв соответственно 8, 9 и 17 места среди стран мира. Довольно сильные позиции также занимают Корея, Греция, Хорватия, Россия, Турция, Болгария и Индонезия, входя в первые 50 стран рейтинга и имея оценку выше 4 баллов. В группу наиболее отстающих попали Бангладеш (2,9), Пакистан (2,92), Таджикистан (3,03) и Киргизия (3,08), заняв из 141 страны соответственно 127, 125, 119 и 116 места [The Travel..., 2015].

Вследствие недостаточности данных, ряд стран не получил никакого места в рейтинге – Иран, Сан-Марино, Ирак, Туркменистан, Сирия, Украина и Узбекистан.

Для многих стран-участниц программы «Шелковый путь» туризм играет значительную роль в национальной экономике, принося заметную долю ВВП, особенно с учетом мультипликативного эффекта. Так, в ВВП Грузии совокупный вклад туризма составляет почти 28%, в Хорватии – 25%, в Греции – 17%, в Азербайджане, Армении, Болгарии, Италии, Албании и Саудовской Аравии более 10%. Наименьшую роль туризм играет в экономике таких стран, как Россия (1,3%), Узбекистан (3,1%), Киргизия (4%) и Бангладеш (4,3%). В части этих стран доля туризма понижена из-за кризисов этой отрасли вследствие политической нестабильности или других причин, в других туризм мог бы играть большую роль, но его доля снижена вследствие недостаточной развитости инфраструктуры или недостаточного внимания властей (Россия, Узбекистан) [Tourism..., 2016].

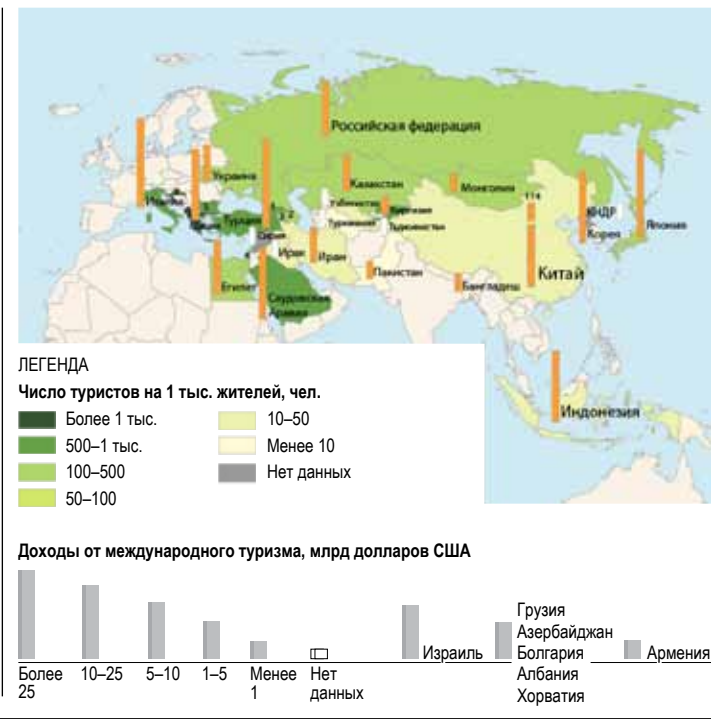


Рис. 2. Развитие международного туризма в странах Шелкового пути.

Вслед за различиями в целом социально-экономического развития стран-участниц, сильно различается и развитие туристской отрасли внутри их экономик (рис.2).

Лучше всего развита туристическая отрасль в странах Европы (Италия, Греция и др.), которые, несмотря на насыщенность рынка в этом регионе, продолжают показывать устойчивый рост. Этот регион имеет высокие позиции по всем показателям, кроме конкурентоспособности цены. На таком же уровне развития находится Япония и Южная Корея.

Высокий потенциал к развитию туризма имеет Россия и, отчасти, Казахстан. Здесь особенно высоко оценивается как природные, так и культурно-исторические рекреационные ресурсы стран, а также потенциал к развитию новых видов туризма. Тем не менее, основные проблемы состоят в неразвитости инфраструктуры и недостаточном уровне безопасности. Кроме того, в России отмечается сравнительно низкая приоритизация туристской отрасли властями, что, однако, в последние годы изменяется в лучшую сторону.

В Азиатском регионе наиболее активно развивается Юго-Восточная Азия, в основном за счет быстрого роста туризма в Китае, как въездного, так

и выездного. Также развивается туризм Индонезии. Развитие туризма в этих странах базируется на богатом культурно-историческом наследии и уникальных природных ландшафтах, а в Китае еще и на благоприятной среде для ведения бизнеса и высокой инвестиционной привлекательности. Основными проблемами этих стран является недостаточно развитая инфраструктура, не отвечающая быстрому росту отрасли, а также слабое внимание туризма к вопросам устойчивости окружающей среды [Asia..., 2016].

Туризм на Ближнем Востоке развит сравнительно неплохо. Основные проблемы отрасли в этом регионе состоят в политической нестабильности, закрытости стран для международного туризма, большом количестве туристских формальностей, а также в недостаточно развитой туристской инфраструктуре. Средние позиции занимают также страны Закавказья (Армения, Азербайджан, Грузия). Здесь также основная проблема заключается в слабо развитой инфраструктуре, а также в неблагоприятном климате для бизнеса и низкой привлекательности для инвестиций.

Слабо развит туризм и в странах Средней Азии вследствие закрытости некоторых стран (Туркменистан), недостаточности инфраструктурного обеспечения, возможной политической нестабильности, а также недостаточной известности этих стран для массового туризма и, в целом, слабого социально-экономического развития. В странах Южной Азии (Бангладеш, Пакистан) данная отрасль развита очень слабо вследствие большого количества проблем и, в целом, слабой развитости экономики этих стран.

Следует отметить, что в странах Закавказья и, особенно, в странах Средней Азии существуют примеры трансграничного туризма, который, в основном, является наследником различных всесоюзных маршрутов. Данный факт может благоприятно сказаться на развитии в этих странах туризма в рамках проекта «Шелковый путь».

В том, что касается, транспортной инфраструктуры и индустрии гостеприимства, наиболее развита и насыщена эта часть хозяйства в европейских странах, а также в Японии и Южной Корее (отдельные проблемы устаревания фондов и неполной конкурентоспособности существуют в странах Восточной Европы).

Инфраструктура Азиатского региона пока развита недостаточно, особенно транспортная, чтобы удовлетворить быстрорастущий спрос. Тем не менее, создаются и претворяются в жизнь новые проекты по созданию крупных транспортных коридоров, увеличиваются инвестиции, выделенные на развитие гостиничного сектора. Многие из проектов затрагивают собой территорию России, Казахстана и Монголии. Кроме того, уже на настоящий момент существует ряд транспортных коридоров, соединяющих эти страны с Китаем и Европой. Занимает промежуточное положение по показателям и требует дальнейшего развития для повышения эффективности инфраструктура стран Закавказья и Ближнего Востока.

Особенно проблемной частью маршрута Шелкового пути, как и в социально-экономическом плане, является регион Средней Азии, где одинаково недостаточно развита как индустрия гостеприимства, так и транспортная система. Тем не менее, планируется транспортный коридор, призванный присоединить транспортные системы их стран с одной стороны к территории КНР, с другой – к странам Европы.

Эффективное управление теми рекреационными ресурсами, в первую очередь культурно-историческим наследием Шелкового пути, которыми обладают страны-участники проекта, позволит получить максимальную отдачу от туризма и использовать все положительные аспекты, вносимые данной отраслью в экономическую и социальную сферы экономики. На основе этих ресурсов может появиться возможность мощного развития туристской отрасли в странах-участницах. Даже в тех странах, где не наблюдается прямой связи с наследием Шелкового пути, умелое управление маркетингом и брендами может дать достойные результаты. Здесь хорошим примером может послужить Хорватия, развивающая наследие Шелкового пути через кампанию «Родина Марко Поло», привлекая внимание к истории, архитектуре, искусству и природе страны.

Тем не менее, на данный момент страны-участники проекта «Шелковый путь» имеют различный потенциал к развитию туризма по тематическому маршруту. В работе для определения потенциала использованы показатели, которые включают в себя, в первую очередь, количество объектов ЮНЕСКО, которые были признаны данной организацией напрямую относящимися к Шелковому пути, а также количество городов и руин городищ, стоявших на древнем пути. Данные объекты являются основой развития в этом регионе культурно-исторического туризма, связанного именно с функционированием древнего торгового пути [Сафарян, 2015].

Использованы также показатели развития инфраструктуры (емкость номерного фонда, плотность автомобильной и железнодорожной сети, пассажирооборот авиации), которые являются второй ступенью для развития туризма в регионе.

Кроме этого, учитывалась комфортность пребывания и путешествия по стране, включающая в себя ощущение безопасности (использовался международный рейтинг безопасности, а также уровень обслуживания, комфортности общения с местным населением, обычно коррелирующий с общим социально-экономическим развитием государства (использовался ИРЧП). Часто слабое развитие государства не является непреодолимым препятствием для туристов, к тому же туристические зоны могут качественно отличаться от остальной территории страны (примером может послужить особое положение туристических зон в Египте, которые к тому же имеют особый визовый режим).

Доступность государств, их визовая политика также является довольно значимым фактором для туризма, особенно транснационального, тем не

менее, для многих туристов визы привычны, и воспринимаются как очередная туристская формальность. Кроме того, полный отказ от виз невозможен во избежание неконтролируемой миграции и других негативных социальных последствий. Тем не менее, слишком высокие визовые преграды отрицательно сказываются на туристских потоках и снижают туристский потенциал страны.

С ростом осознанности и интереса туристов (особенно европейцев) к ответственному отношению стран и предприятий туристской сферы к охране окружающей среды и снижению возможного урона от экономической деятельности, рейтинг по эффективности экологического менеджмента также имеет немаловажное значение, хотя и не первоочередное [Рейтинг..., 2016].

Дополнительно учитывалось наличие или отсутствие туристского бренда (эмблемы, слогана и общей концепции), уровень присутствия в сети-Интернет (наличие официального туристского сайта, наполненность портала информацией, количество языков отображения) и степень участия в проекте «Шелковый путь» (наличие статей, связанных с развитием этого вида туризма, отдельных туров, участие в специализированных конференциях). Оценка данных показателей наиболее субъективна.

Для оценки туристического потенциала по комплексу выше рассмотренных показателей произведен расчет интегральных характеристик на основе абсолютных показателей, для чего использовался алгоритм [Тикунов, 1997], который позволил разделить анализируемые страны на 6 групп (рис. 3).

Ключевой страной, имеющей самую высокую оценку, оказался Китай, имеющий наибольшее количество достопримечательностей и городов, связанных с Шелковым путем. Кроме того, это государство очень активно наращивает объемы туристской и транспортной инфраструктуры. Именно Китай явился одним из инициаторов создания программы, большую важность имеет для развития туризма по этому пути и китайская инициатива «Один пояс – один путь». Очень активно Китай участвует в различных туристических конференциях, обмене опытом и определении стратегий Шелкового пути.

Во вторую группу входят, в первую очередь, высокоразвитые страны Италия и Япония, которые при этом имеют и хорошо развитую туристскую сферу, а также непосредственно (хоть и меньше, чем некоторые другие страны) связаны с наследием Шелкового пути. Далее следуют Казахстан, Россия и Иран – крупные, достаточно стабильные государства, занимающие промежуточное положение между полюсами роста – Европой с одной стороны и Китаем и Японией с другой. Казахстан и Россия обладают богатым культурно-историческим наследием, а также эти страны уже к настоящему моменту достаточно известны мировому туристу. Кроме того, в эту группу попали небольшие европейские страны: Албания, Греция и Сан-Марино.

Основная проблема данных государств заключается в отставании уровня развития инфраструктуры. Тем не менее, именно в этих странах уже су-



Рис. 3. Туристский потенциал стран Шелкового пути, 2017 г.

ществуют крупные транспортные коридоры, связывающие Восток с Западом, в отличие от других стран Средней Азии.

Иран также имеет достаточно богатое культурно-историческое наследие, связанное с Шелковым путем, и среди стран Ближнего Востока является довольно стабильным и открытым (68 стран могут получать недельную визу прямо в аэропортах, действуют электронные визы) государством, со сравнительно хорошо развитой туристской отраслью. Государство проводит активную политику по восстановлению былой привлекательности для туристов (до ирано-иракской войны). Кроме того, Иран также считается транзитной страной, только в этом случае по направлению Север – Юг.

Следующая группа среднего туристского потенциала включает в себя страны, которые традиционно считаются популярными туристическими направлениями – это: Турция, Израиль, Индонезия и Хорватия. Все эти страны имеют или пропагандируют свою связь с Шелковым путем, а также обладают достаточно хорошо развитой туристской инфраструктурой. К числу этих

стран можно условно причислить маленькую и стремительно набирающую туристскую популярность Южную Корею.

В этой же группе находится Узбекистан, имеющий богатейшее культурно-историческое наследие и активно участвующий в развитии проекта «Шелковый путь». В этой стране уделяется большое внимание развитию туристского потенциала и тематического маршрута, страны уже в настоящее время участвуют в транснациональных турах. Тем не менее, они имеют серьезные проблемы с туристской и транспортной инфраструктурой, а также с безопасностью.

В следующую группу с менее развитым туристским потенциалом входят небольшие страны (Грузия, Армения, Киргизия, Азербайджан), туристические страны, не очень связанные непосредственно с Великим Шелковым путем (Египет, Болгария) и обладающие не таким большим культурно-историческим наследием, как Узбекистан и Киргизия, страны Средней Азии – Таджикистан и Монголия. Все эти страны менее, чем другие, продвигают туризм по Шелковому пути или вообще слабо участвуют в развитии проекта или имеют недостаточно развитую экономику, в том числе сферу туризма. Киргизия, наряду с Китаем и Казахстаном, подал инициативу, в результате которой коридор Шелкового пути был внесен в список всемирного наследия ЮНЕСКО, но имеет слишком слабое развитие инфраструктуры.

Также и Саудовская Аравия, которая является достаточно развитой страной, обладающей культурно-историческим наследием, но, тем не менее, слишком закрытой и строгой для полноценного развития туризма. Тем не менее, правительством предпринимаются определенные шаги (многие инициативы блокируются отрицательно настроенной к повышению открытости частью общества).

В группу стран с низким потенциалом входят слаборазвитые страны: Бангладеш и Ирак. В обеих странах критическим остается уровень безопасности, а также слаборазвитой экономикой. В Ираке еще важную роль в занижении показателей играет память о военных действиях. В эту же группу входит крайне закрытая страна КНДР, в первую очередь из-за затрудненного доступа туристов на территорию.

В группе с очень низким потенциалом в основном находятся страны с критическим уровнем безопасности, это в основном страны, участвующие в открытых конфликтах, на территории которых ведутся или велись в недавнем прошлом боевые действия (Сирия) и страны со слаборазвитой экономикой (Пакистан, Туркменистан), в Туркменистане еще играет роль закрытость страны. Эти страны обладают и объектами ЮНЕСКО, связанными с Шелковым путем, и древними городами. Довольно активно страны участвуют в развитии проекта. Тем не менее, на их территории критически слабо развита инфраструктура, в Пакистане также один из самых низких среди стран-участниц показатель ИРЧП, проигрывают они и по уровню безопасности.

Для успешного развития туристской отрасли, необходимо эффективное управление ресурсами, грамотное продвижение национального туристского продукта, активное сотрудничество всех стран-участниц. Так, многими экспертами признается недостаточная реализация Россией ее большого (во многих видах туризма) туристского потенциала.

Проект путешествия массового туриста по Шелковому пути еще далек от претворения в жизнь в полном объеме. Тем не менее, совместная работа стран-участниц над проектом потенциально может привести если не к полному успеху, то, как минимум, к улучшению экономической ситуации и межгосударственных отношений на всем протяжении Шелкового пути в его новом, современном обличье.

Выводы

В результате данной работы были сделаны следующие выводы:

1. Шелковый путь в современных условиях, несомненно, завоевывает все большим вниманием со стороны правительств государств и представителей крупного бизнеса, а также и со стороны обычных людей. Крупные организации предпринимают определенные шаги к развитию различной деятельности в данном направлении, особенно важную роль здесь играют ЮНЕСКО и ЮНВТО.
2. Социально-экономическое развитие стран-участниц проекта ЮНВТО «Шелковый путь», которое заметно влияет на характер туризма в этих государствах, различается от региона к региону. В целом, можно выделить два ядра роста: Европейский регион с одной стороны и Япония, а также активно развивающиеся страны Юго-Восточной Азии с другой. Между этими полюсами лежит достаточно мозаичное пространство, где присутствуют, как довольно стабильные в плане экономики страны, так и достаточно неблагополучные. Примерно такое же распределение стран заметно и в уровне развития туристской индустрии. Несмотря на наличие в некоторых странах обширного набора различных видов рекреационных ресурсов, недостаточно развитая хозяйственная сфера является преградой для полноценного развития туризма. Развитие туристской и транспортной инфраструктуры неодинаково по странам, и во многом коррелирует с уровнем социально-экономического развития.
3. Потенциал тематического туризма по Шелковому пути, в первую очередь, базируется на объектах культурно-исторического наследия и древние города, некогда стоявшие на

данном торговом маршруте. Наибольшая часть этих объектов находится в Китае и других странах Азии. При этом необходимо отметить, что большая доля таких достопримечательностей приходится на не вполне благополучные страны, где туристская индустрия развита слабо.

4. В контексте усилий по развитию туризма по Шелковому пути особенно перспективны два новых вида туризма: трансграничного и транснационального. Трансграничный туризм в некоторых случаях служит основой для развития отсталых районов территории стран, а также для снижения барьерной функции границ между государствами. Транснациональный – для появления и углубления взаимодействий, интеграционных процессов между странами, для снижения политического напряжения. Примеры крупных туров, распространяющихся на три и более страны, существуют уже в настоящее время. Приводит к сотрудничеству и выполнение задач стран по сохранению культурно-исторического наследия, находящегося на смежных территориях.
5. Одна из основных задач ЮНВТО в проекте «Шелковый путь» – это снижение ограничительного воздействия туристских формальностей, в первую очередь визового режима, и в перспективе – создании единой туристской визы для всех стран-участниц. К сожалению, визовая политика большого количества стран, участвующих в проекте, является устаревшей и препятствующей развитию туризма. Тем не менее, в последние годы странами Шелкового пути очень многое сделано для облегчения туристских формальностей.
6. Проблемным является тот факт, что путь проходит через достаточно конфликтные регионы мира. Вместе с определенными плюсами разнообразия в регионе Ближнего Востока и Средней Азии различных культур, присутствуют и высокие риски конфликтов, что приводит к снижению безопасности и, как следствие, активности туризма. Кроме того, здесь высока концентрация стран, на территории которых происходят открытые военные действия, что, помимо прочего, нередко приводит к безвозвратной потере культурно-исторического наследия не только отдельной страны, но и всего мира. Тем не менее, туризм зачастую положительно влияет на отношения между странами, ускоряет разрешение несерьезных конфликтов, приводит к взаимодействию и принятию совместных плодотворных решений. Однако

наличие открытых, «горячих» конфликтов приводит к почти полному прекращению туристской деятельности.

7. Туризм имеет значение и для экономики многих стран Шелкового пути, занимая в ВВП ряда государств достаточно высокие доли. Благодаря высокой мультипликативности, эта отрасль оказывает влияние на большое количество различных отраслей хозяйства (строительство, транспорт, городская инфраструктура и др.). Кроме того, это мощный фактор привлечения инвестиций и крупных ТНК. Туризм может также послужить отправной точкой диверсификации хозяйства страны или его ускоренного развития, что особенно важно для моноспециализированных стран (Саудовская Аравия, отчасти Иран, Туркменистан) и слабо развитых государств (Киргизия, Монголия, Бангладеш, Пакистан).
8. По результатам оценки туристского потенциала стран-участниц ключевой страной проекта оказался Китай, а в число стран с высоким потенциалом попали развитые страны Южной Европы, Япония, Россия, Казахстан и Иран. В последних трех странах свою роль сыграла относительная стабильность этих государств, развитость хозяйства и туризма, наличие культурно-исторического наследия, а также транзитное экономико-географическое положение. Страны, более богатые на объекты ЮНЕСКО, связанные с Шелковым путем, попали в группы стран со средним или ниже среднего потенциалом, вследствие недостаточного уровня безопасности или развитости инфраструктуры. Тем не менее, обладая высоким потенциалом, важно грамотно реализовать имеющиеся возможности для наиболее эффективной работы индустрии туризма и максимальной от нее отдачи. В целом, тематический туризм по Шелковому пути имеет большие перспективы в условиях современных тенденций как мирового туристского рынка, так и мировой экономики в целом, а также в условиях все повышающегося внимания к этому великому наследию прошлого. Странам-участницам проекта ЮНВТО «Шелковый путь» важно реализовывать и увеличивать их туристский потенциал.

Благодарности

Исследование проводится в рамках проекта РФФИ № 17-55-53109.

Библиографический список

1. Ахметшин Н.Х. Тайны Шелкового пути: записки историка и путешественника. М.: Вече, 2002. 415 с.
2. Рейтинг стран мира по уровню экологической эффективности // Центр экологической политики и права при Йельском университете. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gtmarket.ru/news/2016/01/29/7292> (Дата обращения: 25.04.17).
3. Сафарян А.А. Подходы к оценке туристского потенциала территории // Географический вестник. 2015. №1 (32). (Дата обращения: 15.03.2017).
4. Тикунов В.С. Классификации в географии: ренессанс или увядание? (Опыт формальных классификаций). М.; Смоленск: Изд-во СГУ, 1997, 367 с.
5. Asia Tourism Trends // UNWTO, GTERC, 2016. 22 p.
6. FDI on the rebound? / FDI Confidence Index. NY: A.T. Kearny, 2016. 32 p.
7. Rankings of Safest Countries For Travel // Safe Destinations. Официальный портал. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://safedestinations.com/safest-countries-for-travel/> (Дата обращения: 15.03.2017).
8. Tikunov V.S., Belozerov V.S., Antipov S.O., Weihong Cui , Purevjav Dorjjugder Geoinformation Technologies in the Promotion of Tourist Destinations in the Zone of the Great Silk Road. – Geography, Environment, Sustainability, 2017, v.10, No 1, pp. 44–52.
9. The Travel & Tourism Competitiveness Report // WEF. – Geneva: WEF, 2015. – 519 p.
10. Tourism Highlights // UNWTO, 2016. – 16 p.

Сайты национальной статистики:

11. Официальный статистический сайт Азербайджана. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stat.gov.az>
12. Официальный статистический сайт Албании. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.instat.gov.al>
13. Официальный статистический сайт Армении. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.armstat.am>
14. Официальный статистический сайт Бангладеш. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bbs.gov.bd>
15. Официальный статистический сайт Болгарии – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nsi.bg>
16. Официальный статистический сайт Греции. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.statistics.gr>
17. Официальный статистический сайт Грузии. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geostat.ge>
18. Официальный статистический сайт Египта. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sis.gov.eg>
19. Официальный статистический сайт Израиля. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cbs.gov.il>
20. Официальный статистический сайт Индонезии. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bps.go.id>
21. Официальный статистический сайт Ирана. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.amar.org.ir>
22. Официальный статистический сайт Италии. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.istat.it>

23. Официальный статистический сайт Казахстана. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ghdx.healthdata.org/organizations/agency-republic-kazakhstan-statistics>.
24. Официальный статистический сборник КНР. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2015/indexeh.htm>.
25. Официальный статистический сайт Южной Кореи. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kostat.go.kr>.
26. Официальный статистический сайт Киргизии. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stat.kg>.
27. Официальный статистический сайт Монголии. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.en.nso.mn>.
28. Официальный статистический сайт Пакистана. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pbs.gov.pk>.
29. Официальный статистический сайт России. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gks.ru>.
30. Официальный сайт Федерального агентства по туризму России – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.russiatourism.ru>.
31. Официальный статистический сайт Саудовской Аравии. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.stats.gov.sa>.
32. Официальный статистический сайт Таджикистана. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stat.tj>.
33. Официальный статистический сайт Туркменистана. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stat.gov.tm>.
34. Официальный статистический сайт Турции. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.turkstat.gov.tr/Start.do>.
35. Официальный статистический сайт Узбекистана. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.stat.uz>.
36. Официальный статистический сайт Украины. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ukrstat.org>.
37. Официальный статистический сайт Хорватии. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.dzs.hr/default_e.htm.
38. Официальный статистический сайт Японии. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stat.go.jp>.

References

1. Akhmetshin N.X. Tainy Shelkovogo puti: zapiski istorika i puteshestvennika (Secrets of the Silk road: notes of a historian and the traveler). M.: Veche, 2002. 415 p.
2. Asia Tourism Trends // UNWTO, GTERC, 2016. 22 p.
3. FDI on the rebound? / FDI Confidence Index. NY: A. T. Kearny, 2016. – 32 p.
4. Rejting stran mira po urovniu ekologicheskoy effektivnosti (Rankings of Safest Countries For Travel) // Safe Destinations. The official portal. – [Electronic resource.] – Mode of access: <https://safedestinations.com/safest-countries-for-travel/> (accessed: 15.03 2017).
5. Safarian, A. A., Podhody k otsenke turistscheskogo potentsiala territorij (Approaches to the assessment of the tourism potential of the territory) // Geographical Bulletin. 2015. №1 (32).
6. Tikunov V. S. Klassifikacii v geografii: renessans ili uviadanie (Opyt formalnuch

- klassifikacij) (Classifications in geography: Renaissance or fading? (The experience of formal classifications)). Moscow; Smolensk, Izd-vo SGU, 1997, 367 p.
7. Tikunov V. S., Belozеров V. S., Antipov S. O., Weihong Cui, Purevjav Dorjjugder Geoinformation Technologies in the Promotion of Tourist Destinations in the Zone of the Great Silk Road. Geography, Environment, Sustainability, 2017, v. 10, № 1, pp. 44–52.
 8. The Travel & Tourism Competitiveness Report // WEF. Geneva: WEF, 2015. 519 p.
 9. The ranking of countries in terms of environmental performance // Centre for environmental policy and law at Yale University. [Electronic resource] Access mode: <http://gtmarket.ru/news/2016/01/29/7292> (Date accessed: 25.04.17).
 10. Tourism Highlights // UNWTO, 2016. 16 p.

Websites national statistics

11. Oficialnij statisticheskij sajt Azerbajdžana [The official statistical website of Azerbaijan]. – [Electronic resource.] – Mode of access: <http://www.stat.gov.az>.
12. Oficialnij statisticheskij sajt Albanii [The official statistics site of Albania]. – [Electronic resource.] – Mode of access: <http://www.instat.gov.al>.
13. Oficialnij statisticheskij sajt Armenii [The official statistical website of Armenia]. – [Electronic resource.] – Mode of access: <http://www.armstat.am>.
14. Oficialnij statisticheskij websajt Bangladeš [The official statistical website of Bangladesh]. – [Electronic resource.] – Mode of access: <http://www.bbs.gov.bd>.
15. Oficialnij statisticheskij websajt Bolgarii [The official statistical website of Bulgaria]. [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.nsi.bg>.
16. Oficialnij statisticheskij sajt Grecii [The official statistical site of Greece]. – [Electronic resource.] – Mode of access: <http://www.statistics.gr>.
17. Oficialnij statisticheskij websajt Gruzii [The official statistical website of Georgia]. [Electronic resource.] – Mode of access: <http://www.geostat.ge>.
18. Oficialnij statisticheskij websajt Egipta [The official statistical website of Egypt]. – [Electronic resource.] – Access mode: <http://www.sis.gov.eg/>.
19. Oficialnij statisticheskij websajt Izrailja [The official statistical website of Israel]. – [Electronic resource.] – Mode of access: <http://www.cbs.gov.il>.
20. Oficialnij statisticheskij websajt Indonezii [The official statistical website of Indonesia]. – [Electronic resource.] – Mode of access: <https://www.bps.go.id>.
21. Oficialnij statisticheskij sajt Irana [The official statistical site of Iran]. – [Electronic resource.] – Access mode: <https://www.amar.org.ir>.
22. Oficialnij statisticheskij websajt Italii [The official statistical website of Italy]. – [Electronic resource.] – Mode of access: <https://www.istat.it>
23. Oficialnij statisticheskij websajt Kazahstana [The official statistical website of Kazakhstan]. – [Electronic resource.] – Mode of access: <http://ghdx.healthdata.org/organizations/agency-republic-kazakhstan-statistics>
24. Oficialnaja statističeskaja publikacija KNR [The official statistical publication of the PRC]. – [Electronic resource.] – Mode of access: <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2015/indexeh.htm>
25. Oficialnij statisticheskij websajt Južnoj Korei [The official statistical website of South Korea]. – [Electronic resource.] – Mode of access: <http://kostat.go.kr>
26. Oficialnij statisticheskij websajt Kirgizii [The official statistical website of Kyrgyzstan]. – [Electronic resource.] – Mode of access: <http://www.stat.kg>
27. Oficialnij statisticheskij websajt Mongolii [The official statistical website of Mongolia]. [Electronic resource.] – Mode of access: <http://www.en.nso.mn>.

28. Oficialnij statističeskij websajt Pakistana [The official statistical website of Pakistan]. [Electronic resource.] – Mode of access: <http://www.pbs.gov.pk>.
29. Oficialnij statističeskij sajt Rossii [The official statistical site of Russia]. [Electronic resource.] Access mode: <http://www.gks.ru>.
30. Oficialnij websajt Federalnogo Agentstva po tyrizmu Rossii [The official website of the Federal tourism Agency of Russia] [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.russiatourism.ru>.
31. Oficialnij statističeskij websajt Saudovskoj Aravii [The official statistical website of Saudi Arabia]. – [Electronic resource.] – Mode of access: <https://www.stats.gov.sa>.
32. Oficialnij statističeskij sajt Tadžikistana [The official statistical site of Tajikistan]. [Electronic resource.] – Mode of access: <http://www.stat.tj>.
33. Oficialnij statističeskij websajt Turkmenii [The official statistical website of Turkmenistan]. – [Electronic resource.] – Mode of access: <http://www.stat.gov.tm>.
34. Oficialnij statističeskij websajt Turcii [The official statistical website of Turkey]. – [Electronic resource.] – Mode of access: <http://www.turkstat.gov.tr/Start.do>.
35. Oficialnij statističeskij websajt Uzbekistana [The official statistical website of Uzbekistan]. – [Electronic resource.] – Mode of access: <https://www.stat.uz>.
36. Oficialnij statističeskij websajt Ukraini [The official statistical website of the Ukraine]. – [Electronic resource.] – Mode of access: <https://ukrstat.org>.
37. Oficialnij statističeskij websajt Horvatii [The official statistical website of Croatia]. [Electronic resource.] – Mode of access: http://www.dzs.hr/default_e.htm.
38. Oficialnij statističeskij websajt Japonii [The official statistical website of Japan]. – [Electronic resource.] – Access mode: <http://www.stat.go.jp>.

УДК 551.24

**Харченко В.М. [Harchenko V.M.],
Колядова Г.В. [Kolyadova G.V.],
Галай Б.Ф. [Galaj B.F.],
Бейтуганова М.А. [Beytuganova M.A.]**

ГЕОТЕКТЕНИКА И ГЕОДИНАМИКА СТРУКТУР РАСТЯЖЕНИЯ КОНТИНЕНТОВ И ОКЕАНОВ, СВЯЗЬ С РУДОНЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬЮ И СЕЙСМИЧНОСТЬЮ

**Geotectonics and geodynamics of structures
of the stretching of continents and oceans,
communications with rudo petroleum potential
and seismicity**

В данной статье рассматривается механизм образования структур растяжения, показывается их связь с нефтегазоносностью на примерах построения геолого-тектонических моделей с позиций концепции природы структур центрального типа, определяются основные самые эффективные методики выявления структур растяжения. Интерпретация структур растяжения с позиций концепции структур центрального типа, позволяет выделять наиболее перспективные площади не только в плане рудонефтегазоносности, но и в плане сейсмичности, что имеет очевидное практическое значение. Для оценки представлений о структурах растяжения собран фактический материал: данные по структурам растяжения различного ранга на территории Восточного и Западного Предкавказья, а также Красного моря. Обработаны данные дешифрирования космических снимков геолого-геофизических и геохимических материалов, построены геолого-тектонические модели структур растяжения различного ранга.

This article discusses the mechanism of formation of structures of tension, showing their connection with petroleum potential in the examples of construction of Geology-tectonic models using the concept of the nature of the structures of the Central type are identified the most effective methods of identification of structures of tension. Interpretation of structures stretching from the standpoint of the concept structures of the central type, allows to select the most promising areas not only in terms of rudo-petroleum potential, but also in terms of seismicity, which is of obvious practical importance. To assess the concepts about the structures of the stretching assembled factual material: data structures of stretching of various ranks in the Eastern and Western Ciscaucasia, and the Red Sea. Data of interpretation of space images of geological, geophysical and geochemical materials was processed, and geological-tectonic models of tensile structures of different rank were constructed.

Ключевые слова: структура растяжения, структура центрального типа, аэро- и космфотоснимки, топографическая карта, рисунок гидро-сети.

Key words: the structure of the stretching, the structure of the central type, aereo – and space photos, topographic map, the pattern of hydrological network.

Введение

Структуры растяжения являются по существу осадочными нефтегазоносными бассейнами различного ранга, с которыми связаны все нефтегазоносные территории; провинции, области и районы. Кроме того, в совре-

менном понимании механизма их образования – они являются своеобразными сейсмодислокациями, которые свидетельствуют о бывших, современных и, вероятно, будущих землетрясениях, поэтому их изучение приобретает особую актуальность и имеет важное не только научное, но и практическое значение. Как известно, что, как правило, уникальные и гигантские месторождения нефти и газа приурочиваются к структурам растяжения высокого ранга: структуры растяжения Красного моря, Аденского и Персидского заливов, Прикаспийская и Южнокаспийская впадины, впадина Мексиканского залива и др.

Материалы и методы исследования

Структуры растяжения по механизму своего образования являются по существу базовой ступенью в разработке теории образования и развития нефтегазоносных бассейнов, а рассматривая их как разновидность структур центрального типа можно также считать их базой для теории поисков и образования глубинной нефти.

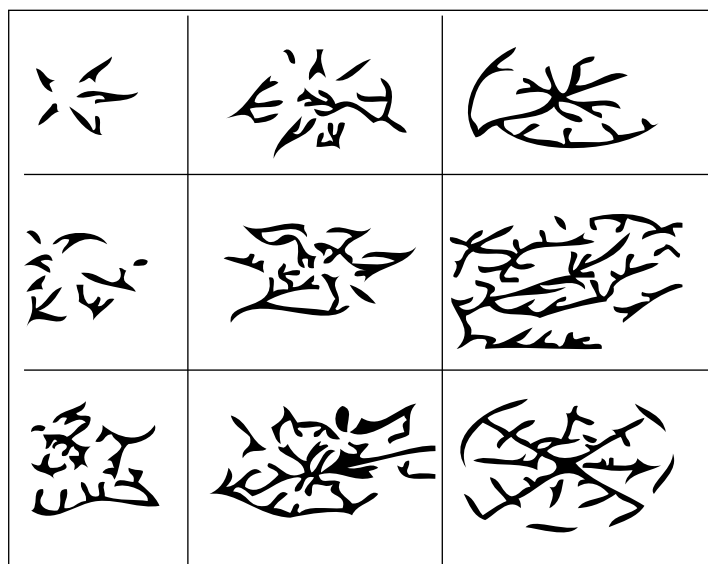
Структуры растяжения являются не только объектом для поисков залежей нефти и газа, но и представляются как сейсмодислокации, свидетельствующие о высокобалльных землетрясениях.

Методологическая база исследования: Дистанционные методы выявления структур центрального типа (СЦТ), метод подобия и аналогии, структурно-геоморфологический метод выявления современных структур растяжения (СР), палео-структурно-геоморфологический метод выявления древних СР, структурно-метрический метод построения геолого-тектонических моделей на базе концепции СЦТ, метод интерпретации СЦТ с целью выявления нефтегазоносности и сейсмичности территорий. Базовым методом решения любых геологических задач является аксиоматический метод основанный на приоритете вертикальных колебательных движениях в природе в целом и в земной коре в частности.

Результаты исследований и их обсуждение

Методика выявления структур растяжения.

Самым надежным и простым методом выявления СЦТ является контрастно-аналоговый, посредством выделения очевидных дуговых и кольцевых изображений на аэро- и космофотоснимках (АКФС) различного масштаба, с последующим выделением с помощью циркуля их центров и полных контуров. Кроме того, иногда центры СЦТ можно выделять по точке пересечения нескольких радиальных линеаментов. Вторым, не менее надежным методом является ландшафтно-индикационный в комплексе с анализом геолого-геофизических и геохимических данных. Для выявления СЦТ по косвенным признакам используются рисунки современной гидросети, которые являются очень чувствительным индикатором современных вертикальных движений земной коры (рис. 1).



Характерный рисунок гидросети для морфоструктур:

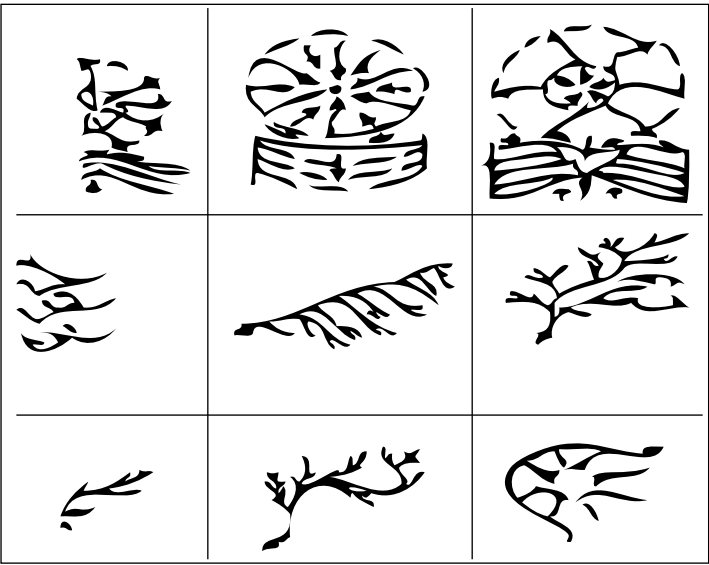
1 – купольных простых; 2 – купольных с контурным рвом подножья; 3 – купольных с дифференцированным центром; 4 – купольных с дифференцированной поверхностью; 5 – купольно-кольцевых с сильно поднятым центром; 6 – простых кольцевых; 7 – кольцевых, осложненных секущим разломом и дочерними купольными формами; 8 – сложных кольцевых; 9 – радиально-концентрический каркас разрядки напряжений.

Рис. 1.

Распределение гидросети в пределах морфоструктур центрального типа (по Соловьеву В.В., 1978).

Особо выделяются три рисунка гидросети; центробежный рисунок, который отражает положительные движения, центростремительный – отрицательные нисходящие движения и комплексный центробежно-центростремительный – локальные опускания земной поверхности на фоне общего сводового поднятия (рис. 2). Из ландшафтных индикаторов впервые использованы линзы пресных и солоноватых вод в Калмыкии и высокодебитные родники тектоногенного происхождения в Ставропольском крае, которые, как правило, расположены концентрически относительно единого центра, приурочиваясь к концентрическим тектоническим нарушениям различного ранга.

СЦТ подразделяется в соответствии с возрастом тектонических движений на современные, неотектонические и древние, которые соответственно определяются различными методами: геодезическими, геолого-геоморфологическими и методом мощностей и фаций.



1 – центробежный; 2 – центростремительный; 3 – центробежно-центростремительный; 4 – диагонально-сетчатый; 5 – субпараллельный; 6 – дендритовидный; 7 – перистый; 8 – перисто-древовидный; 9 – кольцевой-центробежный.

Рис. 2. Рисунки гидросети, отражающие структурные формы в земной коре [по Харченко В.М.].

В природе выделяются на АКФС и топокартах следующие рисунки гидросети, отражающие основные структурные формы в земной коре:

- 1. Центробежный рисунок гидросети отражает в Земной коре положительные или антиклинальные, куполовидные структуры, которые являются результатом вертикальных движений (рис. 2–1).
- 2. Центростремительный рисунок гидросети отражает в Земной коре наоборот синклинальные отрицательные брахиструктуры, как результат нисходящих вертикальных движений (рис 2–2).
- 3. Центробежно-центростремительный, комбинированный рисунок гидросети отражает в Земной коре сводовые, куполовидные поднятия с депрессиями или опусканиями в нейтральной части сводового поднятия, как результат горизонтального растяжения слоев верхней части осадочного чехла

(рис. 2–3). Как правило, в результате растяжения образуются отрицательные структуры типа грабенов, размеры которых могут быть самые различные в зависимости от масштаба сводового поднятия. Примером является рифты в зоне спрединга океанов, Африкано-Аравийские рифты, Рейнский и Байкальский рифты на континентах. Последние, как известно, связаны со сводными поднятиями астеносферного слоя Земли. Миниатюрные микрограбены можно получить, как известно, в зоне растяжения при поперечном изгибе слоистой среды.

4. Диагонально-сетчатый рисунок гидросети отражает в земной коре, как правило, распространение трещиноватости в направлениях характерных для слабодислоцированных преимущественно горизонтальных слоистых толщ (рис. 2–4).
5. Субпараллельный рисунок отражает моноклинальное залегание слоев земной коры в местах флексуообразных перегибов или на крыльях крупных сводных поднятий (рис. 2–5).
6. Дендритовидный рисунок гидросети свидетельствует в основном о разнонаправленных тектонических нарушениях разного порядка. В целом этот рисунок гидросети отражает погребенные брахиструктуры различного размера (рис. 2–6).
7. Перистый рисунок гидросети отражает погребенные под осадочным чехлом линейные структуры древнего фундамента, преимущественно их осевые поверхности (рис. 2–7).
8. Перисто-древовидный рисунок гидросети вероятней всего отражает линейные структур на фоне общего воздымания или сводового поднятия (рис. 2–8).
9. Кольцевой-центробежный рисунок отражает в земной коре вероятно куполовидное поднятие с относительно большой скоростью вертикальных движений. Ярким примером может служить морфоструктура г. Лысой в районе Кавминводского выступа (рис. 2–9).

После анализа ряда структур центрального типа по рисункам гидросети производится выявление радиусов дуг-конcentров наиболее перспективной СЦТ по различным признакам: фототону, дуговым элементам, гидросети, уступам в рельефе, поверхностям выравнивания на различных гипсометрических уровнях.

Косвенным признаком кольцевых тектонических нарушений могут служить точки перегибов продольного профиля рек, расположенных радиально относительно центра СЦТ, к которым приурочиваются высокодебитные родники на Северном Кавказе и в Предкавказье. В результате составля-

ется таблица радиусов по размеру в метрах, которые выделяются по степени достоверности в процентах.

Заключительным этапом этой работы является интерпретация СЦТ на базе модели очага землетрясения с выделением зон сжатий и разряжений (растяжений), узловых точек (геосолитонов), а также конкретное построение геолого-тектонической или флюидодинамической модели (разреза) по данным радиусов – концентров равным глубинам до геолого-геофизических неоднородностей согласно закону скалывающих напряжений и постулату М.В. Гзовского о распределении нормальных и максимальных касательных напряжений [7] тектонического блока, в худшем случае приводится сводная литолого-стратиграфическая колонка для исследуемой территории по литературным данным.

Геологический разрез по данным дешифрирования топокарт и АКФС строится на глубину «максимального» радиуса, где вероятен энергогенерирующий центр обусловивший образование СЦТ.

На основе анализа известной литолого-стратиграфической колонки и выделенных по радиусам геолого-геофизических неоднородностей выделяются: предполагаемые коллекторы и покрышки в теоретическом разрезе и определяют основной энергогенерирующий центр СЦТ, связанный с основной залежью УГВ или с вулканоплутоническим центром. Последние, согласно закона Архимеда создают поля напряжений: силы всплывания направлены вверх (нормальное напряжение) и под углом 45° (максимальные касательные напряжения).

Построенные литолого-стратиграфическая колонка и теоретическая геолого-тектоническая модель сопровождаются легендой, т.е. общепринятыми в геологии условными обозначениями, где в первую очередь выносятся данные по стратиграфии, тектонике, литологии.

Кроме построенной геолого-тектонической модели и схемы дешифрирования конкретной площади, где показаны на топокарте гидросеть, поверхности выравнивания, уступы, террасы и т.д., подтверждающие объективность дуг-концентров и линеаментов, составляется короткая пояснительная записка, где должны быть следующие сведения:

- о географической и тектонической привязке объекта исследования;
- краткие сведения о геологическом разрезе, о структурно-тектонических этажах, о геохимических и геофизических аномалиях и нефтегазоносности района;
- методика и результаты работы на конкретном объекте (по каким признакам выявлены дуги-концентры, в целом СЦТ какой рисунок гидросети, какая структура);
- породы-коллекторы, породы-покрышки, стратиграфическая привязка.

- выводы и рекомендации по геофизическим исследованиям и бурению поисковых скважин.

Механизм образования структур растяжения с позиции приоритета вертикальных тектонических движений и проявления флюидодинамических процессов.

По новым представлениям, основанным на использовании концепции структур центрального типа (СЦТ), структуры растяжения (СР) в форме модели «разбитой тарелки» представляются как результат повторяющейся импульсной разрядки тектонических напряжений в земной коре и мантии, сопровождающихся землетрясениями, сменой направлений и интенсивности вертикальных тектонических движений, внедрением флюидов по зонам тектонической трещиноватости, развивающейся под действием тектонической напряженности (согласно закону скалывающих напряжений – субвертикально и под углом 45°) (рис. 3). В этой флюидодинамической системе ведущее значение имеют процессы декомпрессии, гидродинамического расклинивания, полной или частичной ассимиляции вмещающих толщ континентальной коры. В земной коре с этими процессами связываются рудо нефтегазообразование, солеобразование и заполнение коллекторов углеводородами (УВ). Кроме того все СР по своей природе являются следами высокостепенных древних, новейших и современных землетрясений. СР, как и все СЦТ интерпретируются с выделением геодинамических центров, зон сжатия и растяжения, участков их интерференции (наложения), узловых точек или зон субвертикальной деструкции. Последние в пределах зон растяжения являются наиболее перспективными на предмет рудонефтегазообразования, в зонах сжатия – на предмет высокой сейсмичности и рудообразования.

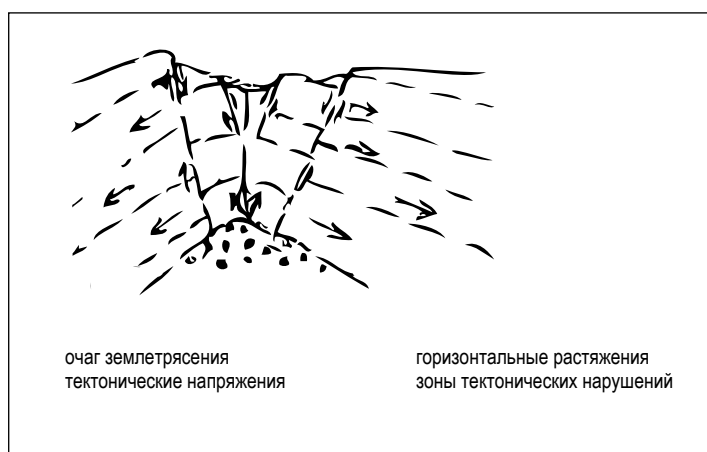
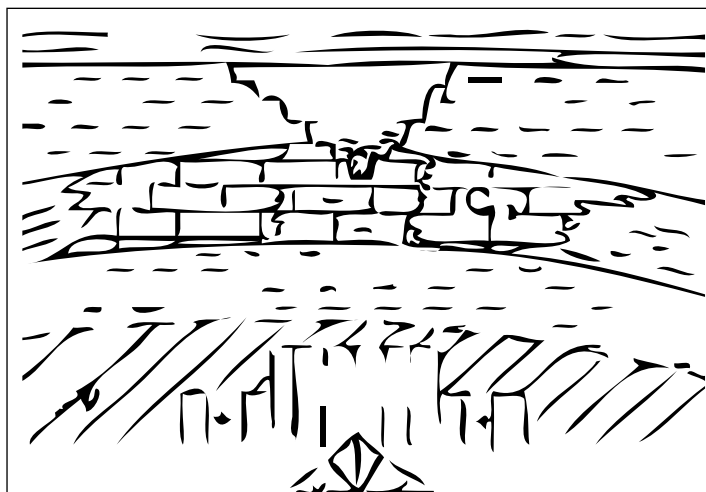


Рис. 3.

Механизм образования структур растяжения.

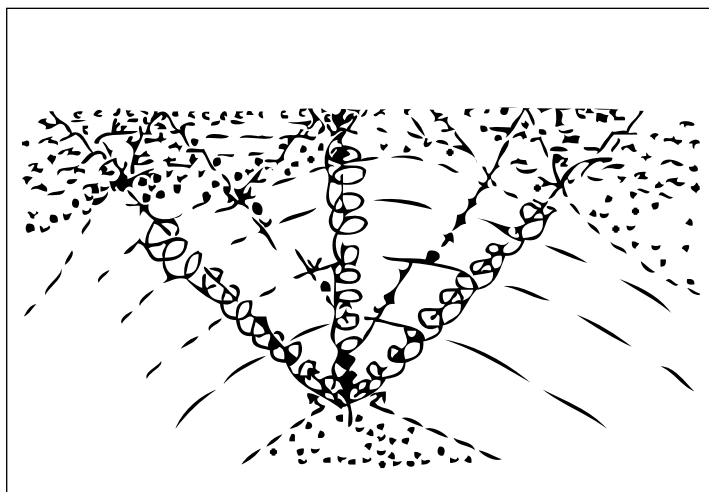


- 1 – возраст пород;
- 2 – глинистые породы;
- 3 – известняки;
- 4 – глинистые известняки;
- 5 – эффузивно-осадочные породы;
- 6 – конгломераты;
- 7 – граниты;
- 8 – породы основного состава;
- 9 – тектоническое нарушение (грабен);
- 10 – распределение полей напряжения.

Рис. 4. Теоретическая геолого-тектоническая модель Цимлянской структуры растяжения [по Харченко В.М., 2005].

Примерами геолого-тектонических моделей приводится целый ряд структур растяжения: начиная с известного провала на г. Машук на территории Кавминвод, Сенгилеевское озеро в окрестностях г.Ставрополя, озеро Маныч-Гудило, Цимлянское водохранилище в Ростовской области (рис. 4), Прикаспийская впадина, СР Карского моря, СР Северо-Западного Кавказа и, наконец СР Красного моря и Аденского залива (рис. 5). Последняя, как известно, с позиций современной тектоники плит представляет собой современную зону спрединга, т.е. раздвигание Африканской и Аравийской тектонических плит на границе с северо-западной части Индийского океана, приуроченная к Красному морю и Аденскому и Персидскому заливам. Эта территория, как известно, знаменита уникальными запасами нефти и газа и выделяется в особую нефтегазоносную провинцию.

По нашему мнению отдельные части зон спрединга, в местах пересечения трансформных разломов, представляют собой типичные структуры рас-



Флюиды (смесь магматических расплавов и парогазовой системы)
 Магма
 Соль
 Пароды фундамента
 Зоны сбросов
 Направления действия тектонических напряжений
 Скважины
 Геолого-геофизические разделы
 Возраст горных пород

Рис. 5. Геолого-тектоническая и флюидодинамическая модель Красноморско-Аденской рифтовой системы.

тяжения, которые рассматриваются как флюидодинамические системы, где впервые приводятся в комплексе основополагающие процессы: декомпрессии, гидравлического расклинивания, частичной или полной ассимиляции или переработки флюидами вмещающих пород фундамента и осадочного чехла континентальной коры в зоне спрединга. Согласно этой модели, из выявленного сводового поднятия и геодинамического центра в зоне пересекающихся тектонических нарушений глобального плана, происходит естественное движение флюидов вверх по спирали строго по двум направлениям: вертикально вверх и под углом 45° , согласно закону скалывающих напряжений. В земной коре континентов, где давление глубинных флюидов в зонах декомпрессии на много превышает гидростатическое давление, проявляются процессы гидравлического расклинивания, частично или полностью ассимиляция вмещающих пород фундамента и осадочного чехла континентальной коры, формирование соленосных толщ и заполнение различных коллекторов в

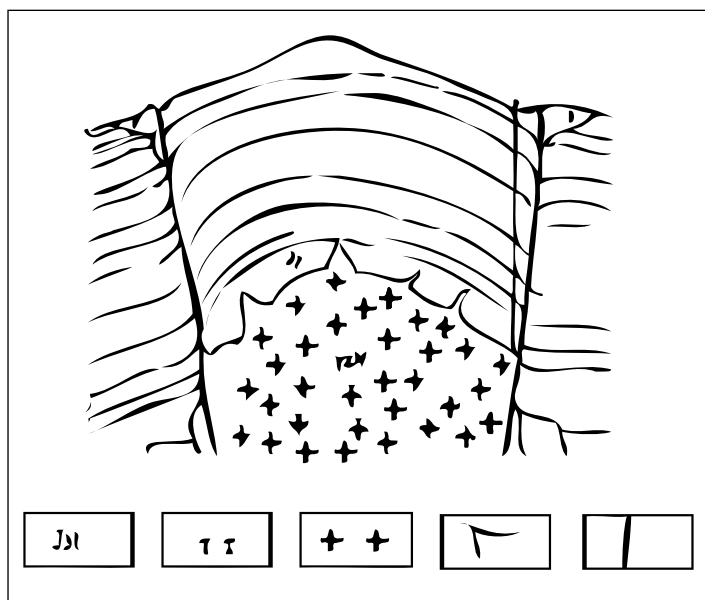


Рис. 6.

Схематический разрез г. Машук**[по данным В.Л. Августинского, 1968].**

1 – осадочные морские отложения: J_{3t} – титонский ярус, K_{IV} – валанжин, K_{1gt} – готерив, K_{1br} – баррем, K_{1apt} – апт, K_{1ab} – альб, K_{2 sn-snt} – сеноман-сантон, K_{2 kmp} – кампан, K_{2 mst+d} – маастрих, даний, P₁ – палеоцен, P₂ – эоцен, P₃ – олигоцен, 2 – травертины, 3 – бештауниты, 4 – протерозойско-палеозойский фундамент, 5 – разломы.

том числе и трещинноватых. В поверхностных условиях, в зонах восходящих флюидов, параллельно происходит образование травертинов – залежей солей из пересыщенных соленосных растворов, входящих в состав флюидов, которые представляют собой смесь магматических расплавов основного и ультраосновного состава с температурой не менее 1000 градусов на выходе, парагазовых составляющих и т.д. Наглядно процесс образования показан на примере структуры растяжения на г. Машук, район знаменитого «Провала» (рис.6), где после вероятного сильного землетрясения, в зоне тектонического разлома с восходящими горячими растворами в современный период образуются карбонатные и сульфатные травертины с выделением сероводородных газов. Глубинные флюиды являются как правило носителями рудных веществ и углеводородов, но и различных солей, которые являются надежными покрытиями при формировании залежей УВ. Таким образом осуществляется естественный глубинный процесс не только образования СР, но и формирования залежей рудных и приразломных залежей в структурах растяжения.

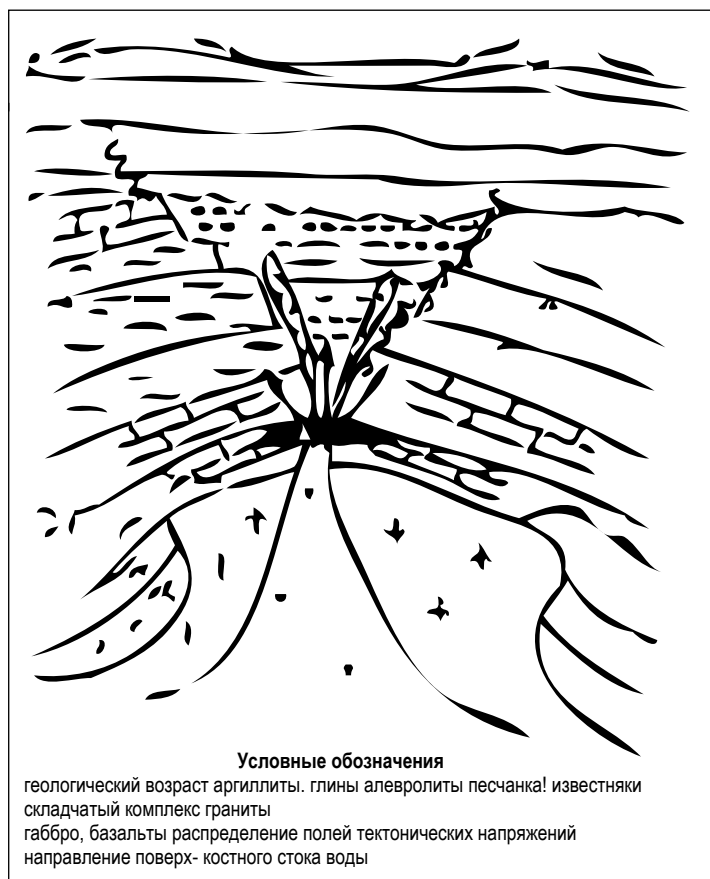


Рис. 7. Принципиальная схема Маныч-Гудиловского рифта (структуры растяжения регионального плана) по В.М. Харченко.

Механизм образования структур растяжения трактуется как результат импульсных вертикальных тектонических движений с образованием сбросов и грабенов в центральной части СР, отмечается резкая смена вертикальных движений с формированием в центральной части провала-понижения, заполненного как правило поверхностными и глубинными водами. Яркий пример СР – провал на г. Машук, озеро Тамбукан на КавМинводах, Сенгилеевская котловина в окрестностях г. Ставрополя, озеро Маныч-Гудило, Прикаспийская впадина и др. (рис. 7).

Выводы

Структуры растяжения по своей природе, как и структуры центрального типа являются следами древних, новейших и современных высоко балльных землетрясений или сейсмодислокациями, имеющими большое значение при сейсмическом микрорайонировании территорий.

Структуры растяжения – это результат импульсной разрядки тектонических напряжений в земной коре и мантии, сопровождающихся высоко балльными землетрясениями и внедрениями флюидов по зонам тектонической трещеноватости, развивающихся согласно тектоническим напряжениям.

Эффективный метод выделения структур растяжения – по характерному центрo-центростремительному рисунку гидросети, выделяемой достоверно по космическим снимкам и топокартам различного масштаба.

Основным объектом исследования, как в локальном так и региональном плане исследована являются геолого-тектонические модели структур растяжений различного ранга: миниатюрная структура растяжения – Провал на горе Машук (Кавминводы); Маныч-Гудилловская; Цимлянская; Прикаспийская; структура растяжения Карского моря; структуры растяжения Красного моря и Аденского залива. Последняя представляет собой современную зону спрединга на границе Африканско-Аравийской плиты и Северо-западной части Индийского океана

Структуры растяжения типа Красноморско-Аденской можно по аналогии успешно выделять по космическим снимкам мелкого и среднего масштаба на других территориях как континентов так и акваторий морей и океанов, что является отдельной задачей дальнейших научных исследований по этой тематике.

Нефтегазоносность структур растяжений объясняется с позиций концепции структур центрального типа [9], где при интерпретации этих структур типа «разбитой тарелки», залежи УВ приурочиваются к зонам растяжения и участкам их интерференции, и особо в узловых точках в пределах данных участков, а рудные залежи в зонах сжатия в узловых точках.

Глубинные флюиды являются как правило носителями не только рудных веществ и углеводородов, но и различных солей, которые являются надежными покрывками при формировании залежей углеводородов. Таким образом осуществляется естественный глубинный процесс не только образования структур растяжения, но и формирования залежей рудных и приразломных залежей в структурах растяжения.

Библиографический список

1. Белоусов В.В. Структурная геология: 3-е изд. М.: изд. МГУ, 1986.
2. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975.
3. Горшков Г.П. Дизъюнктивная тектоника Копет-Дага и закон ска-

- рывающих напряжений // Вестник МГУ. 1947. №1. С.103–115.
4. Друмя А.В., Шебалин Н.В. Землетрясение: где, когда, почему? Кишинёв: Штининца, 1985. С.196.
 5. Ежов Б.В., Худяков Г.И. Морфоструктуры центрального типа и глубинные геофизические разделы: Докл. АН СССР. М.: 1982 г. №3 (265). С. 667–669.
 6. Тимурзиев А.И. К созданию новой парадигмы нефтегазовой геологии на основе глубинно-фильтрационной модели нефтеобразования и нефтегазонакопления // Геофизика. №4. М.: 2007 г. С. 49–60.
 7. Тяпкин К.Ф., Довбнич М.М. Вращение Земли – единственный реальный источник энергии ее тектогенеза // Фундаментальные проблемы геотектоники: мат-лы совещания. Т. 2. М.: 2007 г. С. 295–201.
 8. Харченко В.М. Комплексная концепция тектогенеза как теоретическая основа для объяснения геодинамических условий образования структур центрального типа (на примере СЦТ Северного Ледовитого океана, Баренцева и Карского морей) // Геология полярных областей Земли: материалы совещания. Т.2. М.: 2009 г. С. 266–269.
 9. Харченко В.М. Природа структур центрального типа и закономерности распространения залежей углеводородов, локальных и региональных очагов землетрясений // Вестник СевКавГТУ. Ставрополь: 2006 г. №2 (6). С. 48–53.
 10. Шафрановский И.И., Плотников Л.И. Симметрия в геологии. Л.: Недра, 1975 г. 144 с.

References

1. Belousov V.V. Strukturnaya geologia [Structural Geology]: 3 izd. M.: Izd. MGU, 1986.
2. Gzovsky M.V. Osnovi tektonofiziki [Fundamentals of Tectonophysics]. M.: Nauka, 1975. 327 p.
3. Gorshkov G.P. Dizuktivnaya tektonika Kopen-Daga i zakon skalivayoshikh napryazhenii [Disjunctive tectonics of the Kopet-Dag and the law of the shear stress] // Vestnik MGU, 1947. №1. Pp. 103–115.
4. Drumay A.V., Shebalin N.V. Zemletryasenie: gde, kogda, pochemy? [Earthquake: where, when, why?] Kishinev: Shtinintsa, 1985. P. 196.
5. Ezhov B.V., Khudyakov G.I. Morfostrukturni tsentral'nogo tipa i glubinnii geofizicheskie razdeli [Morphostructures of the Central type and deep geophysical sections]: Dokl. AN SSSR. M., 1982. №3 (265). Pp. 667–669.
6. Timurziev A.I. K sozdaniyu novoi paradigmi neftegazovoi geologii na osnove glubinno-filtratsionnoi modeli nefteobrazovania i neftegazonakopleniya [To create a new paradigm of petroleum Geology on the basis of depth filtration model of petroleum formation and exploration] // Geofyzika, 2007. №4. Pp. 49–60.

7. Tyapkin K.F., Dubnic M.M. Vrashenie Zemli – edinstvennii realnii istochnik energii ee tectogeneza [Dubnic the rotation of the Earth – the only real energy source of tectogenesis it] // Fundamental'nii problemi geotektoniki: mat-li sovesaniya. T. 2. M., 2007, pp. 295–201.
8. Kharchenko V.M. Kompleksnaya kontseptsia tektogeneza kak teoreticheskaya osnova dlya obyasneniya geodinamicheskikh uslovii obrazovaniya struktur tsentral'nogo tipa (na primere STsT Severnogo Ledovitogo okeana, Barentsevogo i Karskogo morei [Integrated concept of the tectogenesis as a theoretical basis for the explanation of geodynamic conditions of formation of structures of the Central type (for example, STST Arctic ocean, Barents and Kara seas)] // Geologiya polyarnikh oblastei: materiali sovesaniya. T. 2. M., 2009, pp. 266–269.
9. Kharchenko V.M. Priroda struktur tsentral'nogo tipa i zakonomernosti rasprostraneniya zalejei uglevodorodov, lokal'nikh i regional'nikh ochagov zemletryasenii [The nature of the structures of the Central type and distribution patterns of hydrocarbon deposits, local and regional earthquakes] // Jurnal SevKavGTU. Stavropol: 2006, №2 (6). Pp. 48–53.
10. Shafranovskii I.I., Plotnikov L.I. Simetriya v geologii [Symmetry in Geology]. L.: Nedra, 1975. 144 p.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ», № 1, 2018

УДК: 612.1;796

Беляев Н.Г. [Belyaev N.G.],
Анфиногенова О.И. [Anfinogenova O.I.],
Лисова И.М. [Lisova I.M.]

ХАРАКТЕРИСТИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ КРОВИ МУЖЧИН С РАЗЛИЧНЫМ ОБЪЕМОМ СУММАРНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ

**Characteristics of indices of peripheral blood
of men with various volume of total engine activity**

Установлено, что положительный эффект от систематического выполнения мышечных нагрузок в большей степени проявляется в отношении морфофункциональных показателей эритроцитов. Как у молодых мужчин, так и у мужчин в возрасте 61–65 лет регистрировалось достоверное увеличение количества эритроцитов, уровня гемоглобина и гематокрита по сравнению со сверстниками, имеющими низкий повседневный суммарный объем двигательной нагрузки. Физические нагрузки замедляли возрастные изменения морфофункциональных показателей форменных элементов крови. Так, у пожилых мужчин с высокой суммарной двигательной активностью был ниже средний объем эритроцитов, ширина распределения эритроцитов в абсолютных величинах и в процентах по сравнению со сверстниками, имеющими низкий объем двигательной активности. В группе мужчин 61–65 лет содержание лимфоцитов было достоверно выше по сравнению с мужчинами аналогичного возраста, но игнорирующими занятия физическими упражнениями. К тому же у мужчин с низкой суммарной двигательной активностью определялись низкие показатели тромбоцитов, процента содержания макротромбоцитов и тромбокрит.

It was established that the positive effect of the systematic performance of muscle loads is more pronounced in relation to morpho-functional indicators of red blood cells. Both in young men and men aged 61–65 years, a significant increase in the number of erythrocytes, hemoglobin and hematocrit was recorded in comparison with peers with a low daily total volume of motor load. Physical loads slowed down the age-related changes in the morphofunctional indices of blood cells. Thus, in elderly men with high total motor activity, the mean red blood cell volume, the distribution of red blood cells in absolute values and in percent compared to peers with a low volume of motor activity were lower. In the group of men, 61–65 years of age, the lymphocyte count was significantly higher than in men of similar age, but ignoring exercise. In addition, in men with low total motor activity, low platelet counts, percentage of macroblot content and thrombocrit were determined.

Ключевые слова: клетки крови, старение, физическая нагрузка.
Key words: blood cells, aging, physical activity.

Введение

Изучение влияния физических нагрузок на параметры периферической крови нашли свое отражение в целом ряде работ как зарубежных, так и отечественных физиологов. Первые работы W. Winternitz датированы 1893 годом и посвящены изучению лейкоцитов в крови спортсменов. В 1926 году А.П. Егоровым были предоставлены данные о динамике содер-

жания лейкоцитов на разных этапах выполнения мышечной нагрузки, описаны стадии миогенного лейкоцитоза. В последующем появилось большое количество работ о количестве эритроцитов и тромбоцитов на разных этапах тренировочных циклов у представителей различных видов спорта. Причем динамику изменений форменных элементов изучали уже с учетом возраста, пола и стажа спортивных тренировок [3, 4, 9].

Интерес к данному вопросу объясним, способность быстро реагировать на действие различных возмущающих факторов изменением своего морфологического состава и принимать непосредственное участие в формировании неспецифических адаптационных реакций организма. При этом, происходящие адаптивные изменения в крови во многом определяют функциональную устойчивость организма к различным возмущающим факторам среды и к интенсивным мышечным нагрузкам в том числе [1].

Динамика картины периферической крови способна отражать как позитивные, так и негативные изменения, происходящие в организме спортсмена. В частности, увеличение количества эритроцитов и уровня гемоглобина свидетельствует о повышении кислородной емкости крови и общей выносливости спортсменов. В то же время, эритропения может явиться предвестником развивающегося хронического физического перенапряжения [2].

Однако в большинстве доступных нам работ приводятся результаты, полученные на молодых людях, имеющих продолжительный и регулярный стаж спортивных тренировок. Тогда как немалую долю среди тренирующихся составляют спортсмены-любители и лица среднего и пожилого возраста. Их занятия не ставят своей целью достижение высоких результатов, а ориентированы на поддержание здоровья. В данном случае занятия имеют другой режим тренировок, а, следовательно, и иной характер реактивности организма.

С возрастом увеличиваются дегенеративно-дистрофические изменения в различных звеньях системы крови. В частности, при старении снижается не только количество лимфоцитов, но и их способность вырабатывать иммуноглобулины, также регистрируется падение концентрации гемоглобина. По мере старения уменьшается количество и увеличивается их средний объём, что отражается на реологических свойствах крови. Причем эти процессы наиболее выражены у мужчин, нежели у женщин.

В связи с этим изучение морфофункционального состояния клеток периферической крови людей пожилого возраста, имеющих различный уровень суммарной двигательной активности, имеет большое прикладное значение для профилактической и восстановительной медицины.

Материалы и методы исследования

В соответствии с целью работы проводилось обследование мужчин в возрасте 21–65 лет с их письменного согласия. Участники эксперимента были разделены на 4 группы. Первую группу обследуемых составили

практически здоровые по данным медицинского обследования молодые мужчины в возрасте 21–22 года, не занимающиеся физическими упражнениями. Во вторую группу вошли лица аналогичного возраста, систематически занимающиеся спортом, но не входящие в категорию спортсменов высокого класса. Третья группа – мужчины 61–65 лет, имеющие невысокий уровень суммарной двигательной активности. Четвертая группа была представлена лицами 61–65 лет, двигательный режим которых предусматривал систематическое выполнение физических упражнений, состоящих из 15–20 минут утренней гимнастики и 3–4-х разовых занятий упражнениями аэробного характера в течение 40–50 минут.

Исследования проводились в соответствии с Хельсинской декларацией Всемирной ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с поправками 2000 г. и «Правилами клинической практики в Российской Федерации», утвержденными Приказом Минздрава РФ от 19.06.2003 г. № 266.

У обследуемых кровь из вены бралась утром натощак в специальные пробирки, содержащие антикоагулянт. Анализ морфофункционального состояния клеток периферической крови осуществляли с использованием гематологического анализатора «Медоник – M20C» фирмы Boule Medical AB P.O. Box 42056 SE – 126 13, Stockholm – Sweden. Полученные результаты подвергались вариационно-статистической обработке в соответствии с принципами, изложенными в руководстве Г.Ф. Лакина (1990).

Результаты исследования и их обсуждение

При анализе морфофункционального состояния клеток красной крови у обследуемых мужчин установлено, что во всех группах количество эритроцитов находилось в пределах нормы (таблица 1). В то же время выявлено достоверное увеличение количества эритроцитов, уровня гемоглобина и гематокрита в крови молодых мужчин спортсменов ($P \geq 0,001$). Увеличение числа эритроцитов и концентрации гемоглобина в крови является положительной адаптивной реакцией системы крови на регулярно выполняемые мышечные нагрузки, проявляющейся повышением кислородной емкости крови и аэробной работоспособности человека.

Достоверно низкие величины количество эритроцитов и концентрация гемоглобина регистрировались у мужчин третьей группы, что свидетельствует о снижении гемопоэза как результата возрастного ухудшения кровоснабжения костного мозга и интенсификации жировых перерождений кроветворных клеток. В аналогичной возрастной группе мужчин, но систематически занимающихся физической культурой, количество эритроцитов и уровня гемоглобина не имели достоверных отличий от показателей мужчин первой группы, но достоверно были выше данного показателя у мужчин пожилого возраста, не занимающихся физическими упражнениями.

Таблица 1. МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭРИТРОЦИТОВ МУЖЧИН, ИМЕЮЩИХ РАЗЛИЧНЫЙ УРОВЕНЬ СУММАРНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ

Группы обследуемых	Исследуемый показатель					
Общая концентрация эритроцитов, 10 ¹² /л		Средний объём эритроцита, fl	Ширина распределения эритроцитов в абсолютных значениях, fl	Ширина распределения эритроцитов в %	Концентрация гемоглобина, г/л	Гематокрит, %
I (n = 8)	4,31±0,22	86,7±1,8	58,6±3,5	15,2±0,9	141±8,4	40,4±1,1
II (n = 11)	5,12±0,09	83,5±3,2	57,8±2,1	14,6±1,3	167±6,9	44,3±0,8
P ₁	≥0,001	≤0,1	≤0,1	≤0,1	≥0,001	≥0,001
III (n = 13)	3,26±0,41	89,1±2,5	59,8±2,6	17,3±0,7	112,1±5,8	39,4±1,0
P ₁	≥0,001	≤0,1	≥0,001	≥0,001	≥0,001	≤0,1
P ₂	≥0,001	≥0,001				
IV (n = 7)	4,79±0,30	84,8±2,3	57,9±4,1	14,8±0,8	148±4,9	41,6±1,8
P ₁	≤0,1	≤0,1	≤0,1	≤0,1	≤0,1	≤0,1
P ₂	≤0,1	≤0,1	≥0,001	≤0,1	≥0,001	≥0,001
P ₃	≥0,01	≤0,1	≤0,1	≥0,001	≥0,001	≤0,1

Примечание: n – количество обследованных лиц; fl – условная единица обозначения (фемтолитр); P₁ – достоверность отличий по сравнению с данными I группы. P₂ – достоверность отличий по сравнению с данными II группы. P₃ – достоверность отличий по сравнению с данными III группы.

У мужчин третьей группы регистрировались и максимальные показатели среднего объема эритроцитов. Следовательно, можно говорить об ухудшении реологических свойств крови данной категории мужчин. В то время как у мужчин 61–65 лет, систематически выполняющих нагрузки аэробного характера, показатель средней величины эритроцитов был ниже по сравнению со своими сверстниками, игнорирующими физические нагрузки. Отличия были недостоверны, но, тем не менее, можно говорить о положительной тенденции влияния мышечных нагрузок на реологические свойства крови.

При проведении сравнительного анализа морфофункциональных значений тромбоцитов у мужчин разного возраста и имеющих различный уровень суммарной двигательной активности было отмечено достоверно более низкое количество тромбоцитов в крови пожилых мужчин, имеющих низкий уровень

Таблица 2.

МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТРОМБОЦИТОВ МУЖЧИН, ИМЕЮЩИХ РАЗЛИЧНЫЙ УРОВЕНЬ СУММАРНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ

Группы обследуемых	Исследуемый показатель				
	Общая концентрация тромбоцитов, 10 ⁹ /л	Средний объём тромбоцита, fl	Ширина распределения тромбоцитов, %	Тромбоцит, %	Макротромбоциты, %
I (n=8)	252±12	9,1±0,4	11,2±0,5	0,25±0,04	18,0±1,6
II (n = 11)	237±23	8,7±0,9	11,4±0,8	0,20±0,02	20,3±1,4
P ₁	≥0,001	≤0,1	≤0,1	≤0,1	≤0,1
III (n = 13)	190±11,0	11,6±0,5	11,5±0,6	0,15±0,07	12,7±1,0
P ₁	≥0,001	≥0,001	≤0,1	≤0,1	≥0,001
P ₂	≤0,1	≥0,001	≤0,1	≤0,1	≥0,001
IV (n = 7)	214±17,0	8,1±0,7	10,6±?	0,17±0,05	14,9±0,7
P ₁	≥0,001	≤0,1	≤0,1	≤0,1	≤0,1
P ₂	≤0,1	≤0,1	≤0,1	≤0,1	≥0,001
P ₃	≤0,1	≥0,001	≤0,1	≤0,1	≥0,001

Примечание:

n – количество обследованных лиц; fl – условная единица обозначения (фемтолитр); P₁ – достоверность отличий по сравнению с данными I группы. P₂ – достоверность отличий по сравнению с данными II группы. P₃ – достоверность отличий по сравнению с данными III группы.

суммарной двигательной активности (таблица 2). В данной возрастной группе достоверно более низкими оказались и такие показатели, как процент содержания макротромбоцитов и тромбоцитрит. Известно, что с возрастом снижаются темпы кроветворения, и этим фактом можно объяснить более низкие величины перечисленных показателей у мужчин 61–65 летнего возраста, составивших третью группу обследуемых. У мужчин пожилого возраста, имеющих высокой суммарной уровень двигательной активности, данный показатель не имел достоверных отличий по сравнению с лицами молодого возраста. Что является дополнительным подтверждением положительного влияния оптимального уровня двигательной активности на функциональное состояние системы крови.

При проведении сравнительного анализа динамики клеток белой крови по таким показателям как абсолютное значение лимфоцитов и гранулоцитов,

Таблица 3. МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЛЕЙКОЦИТОВ МУЖЧИН, ИМЕЮЩИХ РАЗЛИЧНЫЙ УРОВЕНЬ СУММАРНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ

Исследуемый показатель	Группы обследуемых					
	I (n=8)	II (n = 13)	P	III (n = 13)	IV (n = 7)	P
Общая концентрация лейкоцитов, 109/л	6,9 ± 0,2	4,7 ± 0,5	≥ 0,001	5,02 ± 0,3	5,4 ± 0,9	≤ 0,1
Абсолютное значение лимфоцитов, 109/л	2,1 ± 0,6	1,4±0,1	≤ 0,1	1,4 ± 0,2	1,5 ± 0,08	≤ 0,1
Абсолютное значение гранулоцитов, 109/л	4,2 ± 0,7	2,8±0,9	≤ 0,1	3,2 ± 0,3	3,3 ± 0,4	≤ 0,1
Абсолютное значение популяции средних клеток, 109/л	0,6 ± 0,01	0,5 ± 0,008	≥ 0,001	0,4 ± 0,02	0,6 ± 0,03	≥ 0,001
Процент лимфоцитов	31,5 ± 1,5	32,6 ± 2,4	≤ 0,1	25,8 ± 1,1	29,5 ± 0,9	≥ 0,01
Процент гранулоцитов	62,4 ± 1,8	58,3 ± 2,2	≤ 0,1	64,0 ± 2,5	61,7 ± 1,5	≤ 0,1
Процент популяции средних клеток	6,1 ± 1,1	8,7 ± 0,7	≤ 0,1	10,1 ± 1,0	8,8 ± 0,9	≤ 0,1

Примечание: n – количество обследованных лиц; P – достоверность отличий по сравнению с данными лиц, имеющих низкий уровень суммарной двигательной активности.

процента лимфоцитов, процента гранулоцитов и процента популяции средних клеток достоверных отличий между мужчинами разного возраста и имеющими различный уровень суммарной двигательной активности, не прослеживалось, за исключением количества лейкоцитов в крови молодых спортсменов и количества лимфоцитов у пожилых мужчин, систематически выполняющих физические упражнения.

В большинстве работ, связанных с изучением содержания форменных элементов в крови мужчин занимающихся и не занимающихся спортом так же не обнаруживалось отличий по большинству качественных и количественных показателей морфофункционального состояния лейкоцитов.

Низкие величины общей концентрации лейкоцитов в крови молодых спортсменов можно рассматривать как результат отрицательного перекрестного эффекта от интенсивных спортивных тренировок. Как правило, такой показатель регистрируется у неперспективных спортсменов, что в принципе согласуется с нашими результатами. Вторую группу составили молодые люди, систематически тренирующиеся, но не достигшие высоких спортивных результатов.

Увеличение количества лимфоцитов и эозинофилов у перспективных спортсменов отмечали в своих исследованиях А.П. Егоров (1935), Ж.И. Карпова и соавт. в (1987) и расценивалось авторами как положительный резуль-

тат от двигательной активности. Но данные результаты были получены на молодых мужчинах. В то время, как в наших исследованиях достоверное увеличение процента содержания лимфоцитов регистрировалось в крови мужчин пожилого возраста, имеющих высокий уровень суммарной двигательной активности, что демонстрирует положительный эффект для иммунной системы от регулярных занятий физическими упражнениями в пожилом возрасте.

Выводы

Полученные результаты еще раз подтверждают, что с возрастом дегенерирующим изменениям подвергаются многие показатели морфофункционального состояния клеток крови: уменьшается число эритроцитов, концентрация гемоглобина, увеличивается средний объем эритроцитов и ширина их распределения, что не только снижает кислородную емкость крови, но и негативно отражается на ее реологических свойствах. При ухудшении реологических свойств крови возрастает нагрузка на кардиомиоциты. В условиях низкой двигательной активности сердце, как правило, не обладает высокими функциональными возможностями и, соответственно, у данной категории лиц возрастает риск возникновения различных форм сердечной недостаточности. С возрастом заметным изменениям подвергаются лейкоциты и тромбоциты. При этом, регулярная физическая нагрузка замедляет негативные возрастные изменения клеток крови. В наибольшей степени положительный эффект от занятий физическими упражнениями во всех возрастных группах отмечается для морфофункциональных показателей эритроцитов.

Библиографический список

1. Александров, Н.П. Изменения в системе красной крови человека (эритроне) при адаптации к новым условиям // Здоровье. 2010. № 1. С. 16–25.
2. Беляев Н.Г. Ермолова Л.С., Иванов А.Л. О стимуляции эритропоза и адаптивной реакции комбинированным фитопрепаратом// Сельскохозяйственная биология. 2010. №6. С. 122–125.
3. Буянов, В.П. Исследования изменения объема циркулирующей крови при физических нагрузках // Кардиология. 1989. № 3. С. 143–148.
4. Дроздов, Д.Н., Кравцов А.В. Влияние физической нагрузки на показатели периферической крови человека // Вестник Мозырского Государственного педагогического университета им. И.П. Шамякина. 2015. № 1 (45). С. 23–28.
5. Кленова Н.А. Характеристика метаболизма эритроцитов при велоэргометрических нагрузках в норме и патологии: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Уфа, 1997. 25 с.
6. Научная библиотека диссертаций и авторефератов disserCat <http://www.dissercat.com/content/kartina-krovi-kak-fiziologicheskii-kriterii-funktsionalnogo-sostoyaniya-organizma-sportsmeno#ixzz51yo1Qx2r>.

7. Лакин, Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1990.
8. Горизонтов, П.Д. Система крови как основа резистентности и адаптации организма // Физиологический журнал СССР. 1981. Вып. 27 (3). С. 317–321.
9. Хабибулина, И.Р., Румянцева Э.Р. Влияние физической нагрузки на различные звенья системы крови у фехтовальщиков // Вестник ЮУрГУ. Сер. Образование, здравоохранение, физическая культура. 2006. №3–1. С. 46–54.

References

1. Aleksandrov, N.P. Izmeneniya v sisteme krasnoy krovi cheloveka (eritrone) pri adaptatsii k novym usloviyam (Changes in the human red blood system (erythron) when adapting to new conditions) // Zdorov'ye. 2010. №1. S. 16–25.
2. Belyayev N.G. Yermolova L.S., Ivanov A.L. O stimulyatsii eritropoeza i adaptivnoy reaktsii kombinirovannym fitopreparatom (On the stimulation of erythropoiesis and adaptive reaction by combined phytopreparation) // Sel'skokhozyaystvennaya biologiya. 2010. №6. S. 122–125.
3. Buyanov, V.P. Issledovaniya izmeneniya ob'yema tsirkuliruyushchey krovi pri fizicheskikh nagruzkakh (Studies of the change in the volume of circulating blood during physical exertion) // Kardiologiya. 1989. №3. S. 143–148.
4. Drozdov, D.N., Kravtsov A.V. Vliyaniye fizicheskoy nagruzki na pokazateli perifericheskoy krovi cheloveka (Influence of physical load on the parameters of human peripheral blood) // Vestnik Moryrskogo Gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.P. Shamyakina. 2015. №1 (45). S. 23–28.
5. Klenova N.A. Kharakteristika metabolizma eritrotsitov pri veloergometricheskikh nagruzkakh v norme i patologii (Characteristics of erythrocyte metabolism under veloergometric stresses in norm and pathology): Avtoref. dis. . kand. biol. nauk. Ufa, 1997. 25s.
6. Nauchnaya biblioteka dissertatsiy i avtoreferatov disserCat <http://www.dissercat.com/content/kartina-krovi-kak-fiziologicheskii-kriterii-funktsionalnogo-sostoyaniya-organizma-sportsmenov#ixzz-51yo1Qx2r>.
7. Lakin, G.F. Biometriya (Biometrics). M.: Vysshaya shkola, 1990.
8. Gorizontov, P.D. Sistema krovi kak osnova rezistentnosti i adaptatsii organizma (The system of blood as the basis of resistance and adaptation of the organism) // Fiziologicheskii zhurnal SSSR. 1981. Vyp. 27 (3). S. 317–321.
9. Khabibulina, I.R., Rumyantseva E.R. Vliyaniye fizicheskoy nagruzki na razlichnyye zven'ya sistemy krovi u fekhtoval'shchikov (Influence of physical load on various parts of the blood system of fencers) // Vestnik YUUGU. Ser. Obrazovaniye, zdravookhraneniye, fizicheskaya kul'tura. 2006. №3–1. S. 46–54.

УДК 579.66

Филиппова А.М. [Filippova A.M.],
Денисова Е.В. [Denisova E.V.],
Андрусенко С.Ф. [Andrusenko S.F.]

РАЗРАБОТКА НОВЫХ СТИМУЛЯТОРОВ РОСТА АЦИДОФИЛЬНОЙ ПАЛОЧКИ НА ОСНОВЕ ФРАКЦИЙ ТОПИНАМБУРА

The use of jerusalem artichoke (*helianthus tuberosus* L.) As a component of the nutrient solution

В данной работе были проведены исследования различных фракций топинамбура, которые можно успешно использовать в качестве компонента питательных сред для роста ацидофильных лактобактерий. Выявлена зависимость роста ацидофильной микрофлоры от введения в качестве стимуляторов фракции углеводов, органических кислот, аминокислот из топинамбура. Определены минимальные стимулирующие концентрации углеводов, органических кислот, аминокислот, для всех фракций они составляют 0,25%. Прирост бактерий при этом составляет 9,5%, 6%, 4,3% соответственно по сравнению с контрольной средой. По результатам исследования показано, что выделенные фракции оказывают стимулирующее влияние на рост и развитие микроорганизмов при добавлении к среде для культивирования. При этом наиболее эффективной является фракция углеводов топинамбура.

In this paper we present the studies of various Jerusalem artichoke fractions, which can be successfully used as a component of nutrient media for the growth of acidophilic lactobacilli. The dependence of the growth of acidophilic microflora on the introduction of a fraction of carbohydrates, organic acids, amino acids from Jerusalem artichoke as stimulants has been revealed. The minimal stimulating concentrations of carbohydrates, organic acids, amino acids are determined, for all fractions they are 0.25%. The growth of bacteria in this case is 9.5%, 6%, 4.3%, respectively, compared with the control environment. According to the results of the study, it was shown that the isolated fractions exert a stimulating effect on the growth and development of microorganisms when adding to the culture medium. In this case, the most effective fraction is the carb of Jerusalem artichoke.

Ключевые слова: топинамбур, ацидофильная палочка, питательная среда, факторы роста.

Key words: Jerusalem artichoke, acidophilous bacterium, nutrient solution, growth factors.

Быстрый рост и высокие показатели синтеза микроорганизмов напрямую зависят от питательной среды. Питательная среда должна быть сбалансирована по составу и наличию соединений, необходимых для роста и развития определенного микроорганизма. При этом актуальным является поиск недорогого сырья, включающего в состав различные факторы роста, а также источники углерода, азота и других веществ при производстве различных питательных сред.

На сегодняшний день одним из перспективных растений, широко используемых в качестве сырья для фармацевтической, пищевой промышленности относится топинамбур. В сухом веществе клубней находится значительное количество углеводов: полисахарида инулина 30–40% и плодового сахара до 7%, что дает возможность применять топинамбур в кондитерском

производстве. По этой же причине топинамбур представляет большую ценность как сырье для производства спирта и сахара. Особенно большое значение топинамбур имеет как кормовая культура. Клубни ее содержат в среднем около 80% воды, 13–17% азотистых экстрактивных веществ, 1,5% сырого протеина [1, 6].

Одной из важных особенностей топинамбура является сбалансированность его по микро- и макроэлементному составу. Он содержит большое количество железа, кремния, цинка, магния, калия, марганца, фосфора, кальция.

Клубни топинамбура практически не накапливают в себе нитраты, способные вызывать мутации клеток, и, следовательно, развитие онкологических процессов, и, напротив, за счет своего уникального химического состава превращают нитраты в безопасные соединения и используют для синтеза необходимых аминокислот [7].

В настоящее время для профилактики и лечения дисбактериозов различной этиологии используют пищевые добавки, лекарственные препараты, продукты функционального питания, а также продукты питания, содержащие ацидофильные лактобактерии. Лактобактерии являются представителями резидентной микрофлоры человека, в первую очередь обнаружены в полости рта, кишечника и влагалища. Наиболее часто встречаемыми являются *Lactobacillus acidophilus*. Эти микроорганизмы способствуют перевариванию сложных белков в организме человека [4, 5]. При этом выделяются молочная кислота, витамины группы В, ферменты и антибактериальные вещества, которые замедляют рост патогенной микрофлоры [2]. Кроме того, эти бактерии улучшают сопротивляемость организма к стафилококкам, усиливают всасывание питательных веществ в толстом кишечнике и снижают уровень холестерина в крови. Недостаток этих микроорганизмов усиливает активности существующих патогенных бактерий, что увеличивает риск развития множества заболеваний.

Таким образом, было актуально оценить эффективность использования клубней топинамбура в качестве сырья для культивирования ацидофильных лактобактерий.

Результаты исследований в совокупности могут быть использованы при разработке нового состава питательных сред в микробиологии для выращивания ацидофильных лактобактерий. Целью работы являлось исследование взаимосвязи структуры компонентов питательной среды с добавлением фракций топинамбура и роста ацидофильной микрофлоры.

Материалы и методы исследований

Для исследования использовались клубни топинамбура, выращенного в Ставропольском крае. Сырье заготавливалось в осенний период (сентябрь-октябрь). В качестве источника бактерий *L.acidophilus* использовали препарат 410San, L.Acidophilus San (Л. Ацидофилус Сан). Одна капсула препарата содержит $2,5 \times 10^9$ лиофилизированных клеток.

Получение углеводных фракций топинамбура

Готовили водную вытяжку из клубней топинамбура. Для этого измельченные клубни топинамбура переносили в ступку, растирали с 1–2 г песка до однородной массы. Затем содержимое переносили через воронку в мерную колбу на 250 мл, доливали горячей дистиллированной водой в соотношении 1:6 и нагревали 30 мин на водяной бане при $t = 75\text{--}80^\circ\text{C}$.

После охлаждения вытяжки осаждали белки, содержимое доводили до метки, закрывали пробкой и перемешивали.

После отстаивания вытяжку фильтровали в сухой стакан, отбирали 50 мл фильтрата в колбу на 200 мл. В эту же колбу прибавляли раствор сульфата натрия Na_2SO_4 (5:1) для осаждения избытка ионов свинца, водой доводили объем до метки, закрывали пробкой, взбалтывали и давали отстояться. Жидкость фильтровали в стакан через двойной бумажный фильтр [3].

Получение фракции органических кислот топинамбура

Для приготовления водной вытяжки органических кислот клубней топинамбура отвешивали на теххимических весах 25 г клубней. Вещество растирали в фарфоровой ступке с 2–10 мл воды и 3 г песка. Измельченную массу количественно с 50 мл воды переносили в мерную колбу емкостью 250 мл, взбалтывали до получения однообразной взвеси и добавляли 1 мл толуола. Колбу наполняли водой до метки, болтушку хорошо перемешивали и настаивали 2 часа при комнатной температуре. Затем фильтровали, прозрачного фильтрата отмеривали пипеткой 50 мл вытяжки, переносили ее в колбу и титровали 0,1 н. раствором щелочи в присутствии фенолфталеина до слабо-розового окрашивания.

Получение фракции аминокислот топинамбура

Для приготовления вытяжки аминокислот брали 4–6 г измельченных клубней топинамбура. В стакан с навеской приливали около 50 см³ дистиллированной воды, перемешивали содержимое стеклянной палочкой и стакан устанавливали на кипящую водяную баню. После того как температура в стакане с растительным веществом достигла 60°C, не охлаждая содержимого стакана, прибавляли в него 25 см³ раствора медного купороса – CuSO_4 , а затем при помешивании небольшими порциями туда же приливали 25 см³ раствора NaOH. Образовалась основная соль сернокислой меди ($\text{CuSO}_4 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$), которая и осаждала белки. Выпадал осадок комплекса белковых молекул и меди. стакан с содержимым ставили на отстаивание в течение 1–1,5 ч. Осадок в стакане промывали декантацией несколько раз горячей дистиллированной водой. Затем осадок полностью без потерь переносили на фильтр и продолжали промывание горячей водой до исчезновения ионов серной кислоты в вытекающем фильтрате (реакция с раствором BaCl_2). Отсутствие мути после добавле-

ния BaCl_2 к небольшой порции вытекающего фильтрата указывало на то, что все небелковые азотсодержащие соединения отмыты из осадка белка.

**Подготовка посевного материала
ацидофильных лактобактерий**

Лиофильно высушенный препарат 410 San, *L.Acidophilus* San восстанавливали, растворяя 1 капсулу в 100 мл стерильного гидролизованного молока. Через 5 мин экспозиции при комнатной температуре суспензию микроорганизмов стерильно переносили пипеткой из флакона в пробирку. Концентрация живых ацидофильных лактобактерий в этой исходной суспензии составляла $2,5 \times 10^7$ на 1 мл молока .

Результаты исследования и их обсуждение

В настоящей работе в качестве возможных стимуляторов роста *L.acidophilus* испытывали следующие БАВ, выделенные из топинамбура: фракция углеводов; фракция органических кислот; фракция аминокислот.

Определение минимальной стимулирующей концентрации каждого из выше указанных биологических материалов в отношении ацидофильных лактобактерий проводили методом разведения в гидролизованном молоке.

Полученные фракции углеводов топинамбура вносили в различных концентрациях: 0,25%, 0,5% и 0,75% в готовое гидролизованное молоко.

Из исходной суспензии ацидофильных лактобактерий, содержащей $2,5 \times 10^7$ живых м.к. в 1 мл среды готовили разведением на молоке, содержащем 10^4 м.к. в 1 мл и стерильно засевали из него по 2,0 мл во все опытные пробирки с разведениями биологического материала в молоке, а также в контрольную пробирку К1, содержащую 2 мл молока без биологического материала. Получали таким образом в посевах концентрацию живых бактерий, равную 5 тыс./мл. Контрольную пробирку К2, содержащую 4 мл молока, не засевали. Все пробирки помещали в термостат при $37,5 \pm 0,5$ °С. Через 24 часов культивирования посевов учитывали результаты роста. Результаты роста бактерий учитывали по методу Виноградского-Брида. Результаты эксперимента представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОЙ СТИМУЛИРУЮЩЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ФРАКЦИЙ ПОЛИСАХАРИДОВ ТОПИНАМБУРА

Исследованные субстанции	Концентрация биоматериала, %			Контроль
	0,25	0,5	0,75	
инулин	$6,03 \pm 0,14$	$6,21 \pm 0,15$	$6,27 \pm 0,13$	$5,69 \pm 0,14$
пектин	$5,76 \pm 0,16$	$5,80 \pm 0,15$	$5,87 \pm 0,14$	$5,69 \pm 0,14$
водная вытяжка углеводов	$6,23 \pm 0,13$	$6,30 \pm 0,15$	$6,34 \pm 0,13$	$5,69 \pm 0,14$

Количество живых клеток в 1 мл культивируемой среды выражено в lg КОЕ/мл.

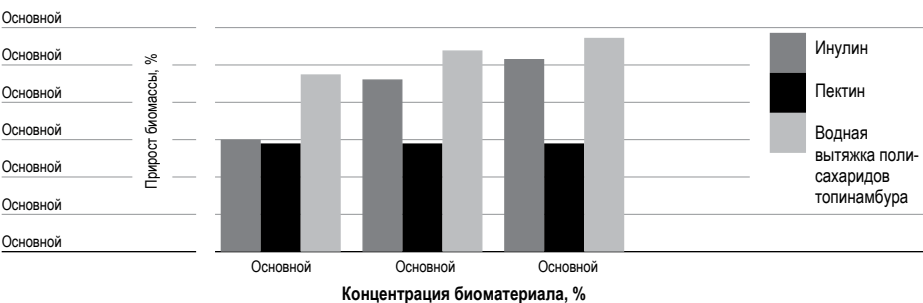


Рисунок 1. Стимулирующее влияние углеводных фракций топинамбура на рост ацидофильной микрофлоры.

Определена минимальная стимулирующая концентрация фракции углеводов на рост ацидофильных лактобактерий в гидролизованном молоке, и она составляет 0,25%. Прирост бактерий при этом составляет 9,5% по сравнению с контрольной средой.

Полученные фракции органических кислот топинамбура вносили в различных концентрациях: 0,25%, 0,5% и 0,75% в готовое гидролизованное молоко, по методике описанной выше. Результаты эксперимента представлены в таблице 2 и на рисунке 2.

Таблица 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОЙ СТИМУЛИРУЮЩЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ФРАКЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ КИСЛОТ ТОПИНАМБУРА

Исследованные субстанции	Концентрация биоматериала, %			Контроль
	0,25	0,5	0,75	
Фракция органических кислот	6,06 ± 0,10	6,14 ± 0,12	6,08 ± 0,10	5,71 ± 0,15

Количество живых клеток в 1 мл культивируемой среды выражено в lg КОЕ/мл.



Рисунок 2. Стимулирующее влияние фракции органических кислот топинамбура на рост ацидофильной микрофлоры.

Минимальная стимулирующая концентрации фракции органических кислот составляет 0,25%. Прирост ацидофильных лактобактерий составляет 6% по сравнению с контрольной средой.

Полученные фракции аминокислот топинамбура вносили в различных концентрациях: 0,25%, 0,5% и 0,75% в готовое гидролизованное молоко.

Результаты эксперимента представлены в таблице 3 и на рисунке 3.

Таблица 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОЙ СТИМУЛИРУЮЩЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ФРАКЦИИ АМИНОКИСЛОТ ТОПИНАМБУРА

Исследованные субстанции	Концентрация биоматериала, %			Контроль
	0,25	0,5	0,75	
Фракция аминокислот	5,73 ± 0,14	5,83 ± 0,14	5,92 ± 0,13	5,49 ± 0,13

Количество живых клеток в 1 мл культивируемой среды выражено в lg КОЕ/мл.

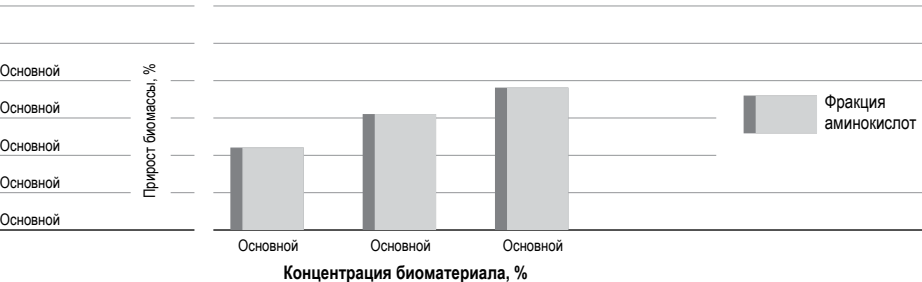


Рисунок 3. Стимулирующее влияние фракции аминокислот топинамбура на рост ацидофильной микрофлоры.

Определена минимальная стимулирующая концентрация фракции аминокислот составляет 0,25%. Прирост ацидофильных лактобактерий составляет 4,3% по сравнению с контрольной средой

Таким образом, выделенные из топинамбура фракции углеводов, витаминов, органических кислот, аминокислот могут рассматриваться как перспективные компоненты питательных сред для культивирования *L.acidophilus*, а также как потенциальные пребиотические средства. В системе опытов *in vitro* они оказывают стимулирующее влияние на рост и развитие микроорганизмов при добавлении к среде для культивирования. Наиболее эффективно в этом плане действует фракция углеводов топинамбура.

Библиографический список

1. Виноградова А.В., Паклина О.В., Анашкина Е.Н. Топинамбур – перспективное сырье биотехнологии / Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2010. № 11. С. 137–142.
2. Иркитова, А.Н. Эколого-биологическая оценка штаммов *Lactobacillus acidophilus*, используемых в производстве пробиотических продуктов: автореф. дис. ... канд. биол. наук / Институт экологии и генетики микроорганизмов Уральского отделения Российской академии наук. Пермь, 2012.
3. Лапенко М.А., Аванесян С.С., Андрусенко С.Ф. Подбор оптимальных параметров для выделения высокомолекулярных углеводов на примере инулина / В сборнике: XII Международная научно-инновационная конференция аспирантов, студентов и молодых ученых с элементами научной школы «Теоретические знания – в практические дела» сборник материалов конференции: в 2 ч. Омск, 2011. С. 37–39.
4. Лысенко Ю.А., Лунева А.В., Волкова С.А., Николаенко С.Н., Петрова В.В. Подбор оптимальной питательной среды для культивирования, концентрирования и высушивания клеток *Lactobacillus acidophilus* // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 102. С. 689–699.
5. Мустафаев А.А., Лысенко Ю.А., Пономарева Л.О., Носенко А.В., Петрова В.В., Ситников И.В. Использование продуктов растительного сырья как основы для культивирования лактобактерий // В сборнике: Современные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции Сборник статей по материалам II научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2016. С. 204–207.
6. Топинамбур-инновационный ресурс в развитии экономики России / В.И. Старовойтов, О.А. Старовойтова, П.С. Звягинцева [и др.] // Пищевые ингредиенты. Сырье и добавки. 2013. №2. С. 30–33.
7. Титок В., Веевник А., Ярошевич М. Топинамбур – культура многофункционального назначения / Наука и инновации. 2014. Т. 5. № 135. С. 26–28.

References and Internet resources

1. Vinogradova A.V., Paklina O.V., Anashkina E.N. Topinambur – perspektivnoe syr'e biotekhnologii (The Jerusalem artichoke is a promising raw materials of biotechnology), Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya, 2010, No 11, pp. 137–142.
2. Irkitova, A.N. Ekologo-biologicheskaya otsenka shtammov lactobacillus acidophilus, ispol'zuemykh v proizvodstve probioticheskikh produktov (Environmental and biological evaluation of strains of lactobacillus acidophilus, used in the production of probiotic products): Avtoref. dis. ... kand. biolog. nauk / Institut ekologii i genetiki mikroorganizmov Ural'skogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk, Perm', 2012.
3. Lapenko M.A., Avanesyan S.S., Andrusenko S.F. Podbor optimal'nykh parametrov dlya vydeleniya vysokomolekulyarnykh uglevodov na primere inulina (The selection of optimal parameters for isolation of high molecular weight carbohydrates, for example, inulin), V sbornike: XII Mezhdunarodnaya nauchno-innovatsionnaya konferentsiya aspirantov, studentov i molodykh uchenykh s elementami nauchnoi shkoly "Teoreticheskie znaniya – v prakticheskie dela" sbornik materialov konferentsii: v 2 ch. – Omsk, 2011, pp. 37–39.
4. Lysenko Yu.A., Luneva A.V., Volkova S.A., Nikolaenko S.N., Petrova V.V. Podbor optimal'noi pitatel'noi sredy dlya kul'tivirovaniya, kontsentrirvaniya i vysushivaniya kletok lactobacillus acidophilus (Selection of the optimal nutrient medium for culturing, concentration and drying of cells of lactobacillus acidophilus), Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2014, No 102, pp. 689–699.
5. Mustafaev A.A., Lysenko Yu.A., Ponomareva L.O., Nosenko A.V., Petrova V.V., Sitnikov I.V. Ispol'zovanie produktov rastitel'nogo syr'ya kak osnovy dlya kul'tivirovaniya laktobakterii (Product use plant materials as the basis for the cultivation of lactobacilli), V sbornike: Sovremennye aspekty proizvodstva i pererabotki sel'skokhozyaistvennoi produktsii Sbornik statei po materialam II nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, 2016, pp. 204–207.
6. Topinambur – innovatsionnyi resurs v razvitii ekonomiki Rossii (Jerusalem artichoke – an innovative resource in the development of Russia's economy), V.I. Starovoitov, O.A. Starovoitova, P.S. Zvyagintseva [i dr.], Pishchevye ingredienty. Syr'e i dobavki, 2013, No 2, pp. 30–33.
7. Titok V., Veevnik A., Yaroshevich M. Topinambur – kul'tura mnogofunktsional'nogo naznacheniya (Jerusalem artichoke – a culture multi-purpose), Nauka i innovatsii, 2014, T. 5, No 135. pp. 26–28.

УДК 612.816.4

Севрюкова Г.А. [Sevriukova G.A.],
Настинова Г.Э. [Nastinova G.E.],
Товмасын Л.А. [Tovmasian L.A.],
Севрюкова П.Л. [Sevriukova P.L.]

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ МОЗГОВОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ В ГРУДНЫХ ОТВЕДЕНИЯХ ЭКГ НА ФОНЕ АКТИВНОЙ ОРТОСТАТИЧЕСКОЙ ПРОБЫ*

**The Functional State of the Cerebral Circulation
Depending on the Localization of Transition Area
in Chest Lead of ECG at Orthostasis**

Статья посвящена исследованию функционального состояния церебрального кровообращения в условиях ортостатической пробы у лиц молодого возраста с различной локализацией переходной зоны в грудных отведениях ЭКГ. Выделены четыре группы обследуемых, в зависимости от локализации переходной зоны в грудных отведениях ЭКГ: 1 группа – V1–2; 2 группа – V3; 3 группа – V4–5; 4 группа – локализация неопределенна. Регистрация электрокардиограмм и параметров церебральной гемодинамики осуществлялась с помощью программного комплекса «Валента». Выявлено, что срочные механизмы церебрального кровообращения на гравитационные изменения осуществляются за счет незначительного повышения пульсового кровенаполнения головного мозга при выраженном уменьшении венозного оттока из региона. Установлено влияние локальной электрофизиологической позиции сердца на регуляцию мозгового кровотока. Неблагоприятная реакция мозгового кровообращения на фоне ортостатической пробы отмечалась у лиц с горизонтальным расположением сердца (V1–2) и «неопределенной» локализацией переходной зоны в грудных отведениях ЭКГ.

The article is devoted to the study of the functional state of the cerebral circulation at orthostasis in persons of young age with different localization of transition area in chest lead of ECG. Four groups of respondents, depending on the localization of transition area in chest lead of ECG: group 1 – V1–2; group 2 – V3; group 3 – V4–5; 4 group – undetermined localization. Registration of electrocardiograms and parameters of cerebral hemodynamic was performed using program complex «Valenta». Urgent mechanisms of the cerebral circulation are due to a slight increase in pulse blood brain in significant reduction venous outflow from the region. The influence of the local electrophysiological position of the heart on the regulation of cerebral blood flow was established. Unfavorable reaction of cerebral circulation at orthostasis was observed in respondents with the horizontal location of the heart (V1–2) and undetermined localization of transition area in chest lead of ECG.

Ключевые слова: функциональное состояние, церебральная гемодинамика, ортостатическая проба, реоэнцефалография, электрокардиография, переходная зона в грудных отведениях ЭКГ

Key words: functional state, cerebral hemodynamics, orthostatic test, rheoencephalography, electrocardiography, transition area in chest lead of ECG

Введение

Одной из важнейших функций системы кровообращения является кровоснабжение головного мозга. Функциональное состояние мозгового кровообращения и системы кровообращения в целом детерминированы деятельностью сердца, характеристиками которой являются амплитудно-частотные параметры ЭКГ, хронология процессов возбуждения миокарда, положение результирующего вектора электрической оси сердца (ЭОС), локализация переходной зоны возбуждения отделов миокарда в горизонтальной плоскости [9]. Локализация переходной зоны в грудных отведениях связана с направлением оси QRS в горизонтальной плоскости. Обратимый сдвиг переходной зоны при нагрузках различного генеза обусловлен особенностями индивидуальных изменений суммарной деполяризации различных отделов миокарда в ответ на возмущающее воздействие [4, 7, 8]. Равномерное распространение импульсной активности по отделам миокарда обуславливает локализацию переходной зоны в V_3 , тогда как её смещение вправо или влево может являться маркером донозологических изменений в работе миокарда [8]. В этом аспекте существенное значение приобретает практически малоизученная проблема исследования гемодинамических эффектов мозгового кровотока, церебрального сосудистого тонуса и регионарного венозного возврата, обусловленных гравитационным перераспределением крови, в зависимости от локализации переходной зоны в грудных отведениях ЭКГ.

Целью исследования явилась сравнительная оценка церебральной гемодинамики в условиях ортопробы у лиц молодого возраста в зависимости от локализации переходной зоны в грудных отведениях ЭКГ.

Организация и методы исследования

в исследовании приняли участие лица молодого возраста (72 чел.; $19,7 \pm 1,4$ лет) на добровольной основе. Обследуемые информировались об условиях проведения исследований и используемых методиках, сообщалось о гарантиях неразглашения полученной информации об участниках исследования, что отвечает принципам информированного согласия.

Регистрация электрокардиограмм (ЭКГ), реоэнцефалограмм (РЭГ) осуществлялись с помощью модулей «Электрокардиография», «Реоэнцефалография» аппаратно-программного комплекса «ВАЛЕНТА» (РУ №ФСР 2007/00259 от 26.03.2009, г. Санкт-Петербург).

В условиях оперативного покоя и на фоне активной ортостатической пробы (АОП) регистрировались параметры стандартной ЭКГ (12 отведений), РЭГ (реографический индекс (РИ, у.е.), амплитудно-частотный показатель (АПЧ, 1/с), время быстрого и медленного наполнения (ВБН, ВМН, с), амплитудный показатель сосудистого тонуса (АПСТ, у.е.), венозный отток (ВО, %), дикротический индекс (ДИ, у.е.), индекс периферического сопротивле-

ния (ИПС, у.е.), диастолический индекс (ДИС, у.е.), коэффициент асимметрии (КА, %).

Усредненный профиль церебральной гемодинамики строился в «условных стенах», где Ме – это медиана нормативных значений; величина отклонения до нижней границы нормы «–1» стен; до верхней границы нормы «+1» стен.

Коэффициент сдвига на нагрузку рассчитывался по модифицированной формуле Лоскутовой Т.Д. (1978):

$$КС = L_n (P_n \div P_f),$$

где КС – коэффициент сдвига на нагрузку;
P_n – параметр, полученный под воздействием нагрузки;
P_f – фоновый параметр.

Статистический анализ первичных данных проводился с помощью программного пакета «Excel–2010».

Результаты и их обсуждение

Все обследуемые были распределены на группы в зависимости от локализации переходной зоны в грудных отведениях ЭКГ: смещение переходной зоны в V₁₋₂ (I группа; n = 14); локализация переходной зоны в V₃ (II группа; n = 25); смещение переходной зоны в V₄₋₅ (III группа; n = 18) и локализация переходной зоны неопределенна (IV группа; n = 15) [3].

По данным нашего исследования основные параметры церебральной гемодинамики (РИ, АЧП, ВБН, АПСТ, ДИС) в условиях оперативного покоя в группах сравнения находились в пределах возрастной физиологической нормы (рис. 1, 2). Однако, переменные, отражающие тонус церебральных артерий сопротивления (ВМН) и венозный отток (ВО) в I-й и IV-й группах в FM и OM отведениях и во II-й и III-й группах в OM отведении оказались исходно повышенными.

При межгрупповом сравнении в состоянии оперативного покоя параметров, отражающих гемодинамику преимущественно в системе позвоночной артерии (окципито-мастоидальное отведение, OM) выявлена внутригрупповая неоднородность, о чем свидетельствует высокая дисперсия (РИ_{OM}; ВО_{OM}; ИПС_{OM}; КА_{OM}). При этом практически у всех обследуемых регистрируется увеличение показателя венозного оттока (ВО), особенно с правой стороны: в I-й группе в среднем на 29,0%, во II-й – на 19,5%, в III-й – на 20% и IV-й – на 10,8% в сравнении с возрастной нормой, что свидетельствует о функциональном ухудшении регионарного венозного оттока.

В состоянии оперативного покоя ИПС, характеризующий тонус мелких, резистивных артерий в левом полушарии как в FM, так и в OM отведе-

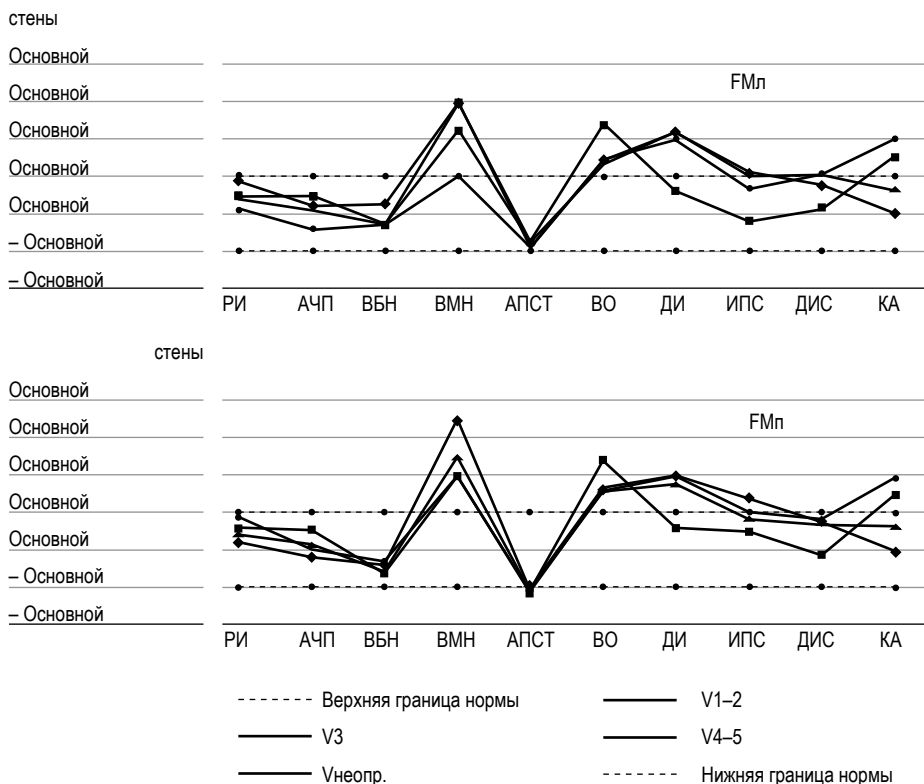


Рис. 1. Усредненные профили церебральной гемодинамики в FM отведении в условиях оперативного покоя

- * – достоверное различие показателей по сравнению с I группой;
 ** – со II группой;
 # – с III группой;

FMл, FMп – фронтально-мастоидальное отведение левого и правого полушарий).

ниях был наиболее оптимальным во II-й группе ($1,73 \pm 0,1$ у.е.; $1,58 \pm 0,14$ у.е. соответственно) по сравнению с таковым в других группах. У обследуемых III-й группы отмечалось снижение тонуса артерий сопротивления, снабжаемых кровью из бассейнов передней, средней, задней мозговых артерий. В FM отведении правого полушария обнаружено повышение тонуса артерий сопротивления у обследуемых III-й ($1,7 \pm 0,09$ у.е.) и I-й ($1,8 \pm 0,28$ у.е.) групп. У обследуемых IV-й группы тонус резистивных артерий наиболее низок ($1,4 \pm 0,1$ у.е.; $U_{\text{эмп}} = 11,7$; $p < 0,05$).

В отведении ОМ правого полушария наиболее высокий тонус резистивных сосудов характерен для II-й группы, тогда как высокая дисперсия индивидуальных значений, т.е. внутригрупповая неоднородность по ИПС отмечалась в III-й группе.

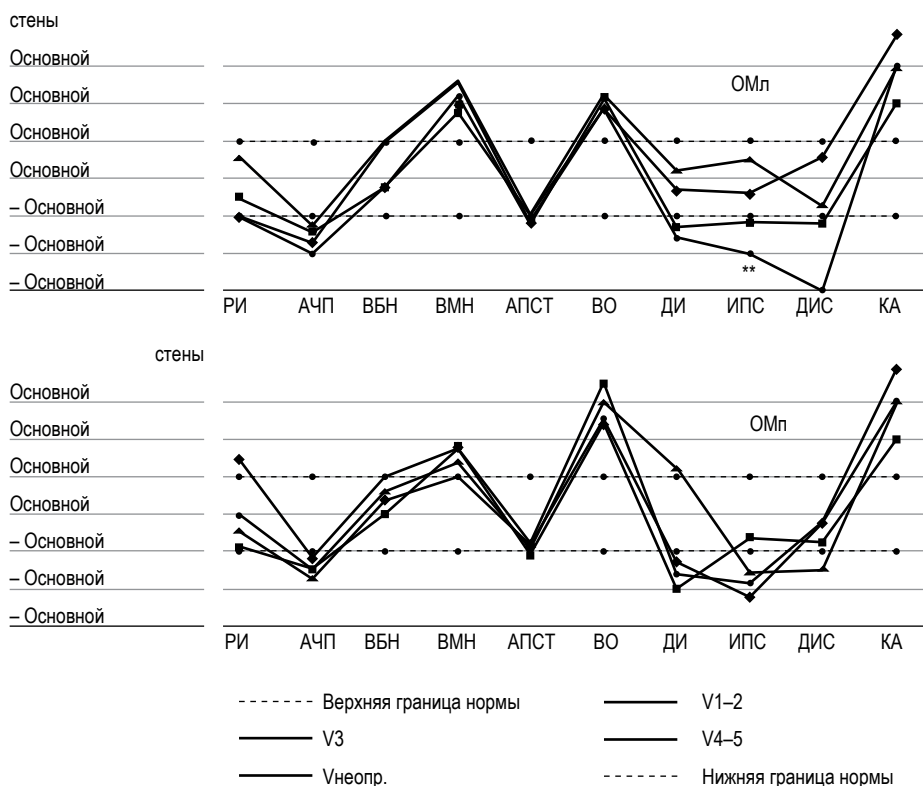


Рис. 2.

Усредненные профили церебральной гемодинамики в ОМ отведении в условиях оперативного покоя

- * – достоверное различие показателей по сравнению с I группой;
- ** – со II группой;
- # – с III группой;

ОМл, ОМп – окципито-мастоидальное отведение левого и правого полушарий)

Выраженная межполушарная асимметрия кровенаполнения в области позвоночной артерии, отмечаемая у всех обследуемых (I группа – 49,0%; II – 39,5%; III – 40,0%; IV группа 30,8%), возможно может быть объяснена компрессией позвоночных артерий при гиподинамии (вынужденное статическое положение тела во время учебной деятельности), а также снижением реактивности сосудов под воздействием гипоксии, являющейся негативным фактором учебного процесса [6, 2].

На фоне ортопробы у обследуемых IV-й группы установлено резкое снижение величины пульсового кровенаполнения во всех отведениях при повышении величины параметра венозного оттока (ВО) (рис. 3). Это свидетельствует о неблагоприятной реакции мозгового кровоснабжения у данного контингента обследуемых на использованное функциональное воздействие –

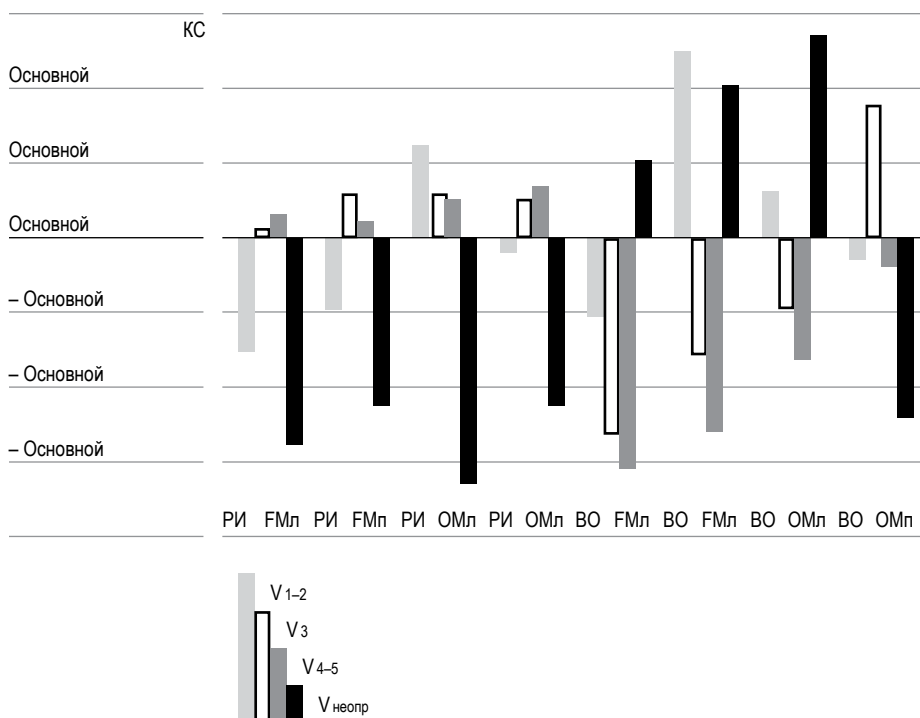


Рис. 3. Коеффициент сдвига показателей кровенаполнения и оттока на фоне активной ортостатической пробы (КС – коеффициент сдвига на нагрузку).

снижении притока крови в регион, в сочетании с функциональным ухудшением её венозного возврата к сердцу.

У обследуемых I-й группы похожая реакция мозгового кровоснабжения отмечалась избирательно – в бассейне внутренних сонных артерий. Следует отметить, что значительное уменьшение параметра PИ было обнаружено в FM отведении слева, тогда как в отведении OM слева отмечалось увеличение кровенаполнения в регионе. Венозный отток у обследуемых 1-й группы характеризовался разнонаправленными реакциями. Так, в отведении FM слева уменьшался, справа повышался и, наоборот, в отведении OM слева повышался, справа уменьшался.

Наши данные согласуются с утверждением о том, что регуляция мозгового кровообращения является сложным, многоуровневым феноменом, причем различные отделы сосудистого бассейна мозга обладают уникальными сосудистыми механизмами, выполняя различные функции в регулировании интенсивности кровотока в системе артерий сопротивления и распределения головного мозга и обеспечивая «мозаичность» кровенаполнения серого вещества [5].

Наиболее благоприятные реакции на гравитационные изменения выявлены у обследуемых II-й и III-й групп. Отмечалось незначительное повышение

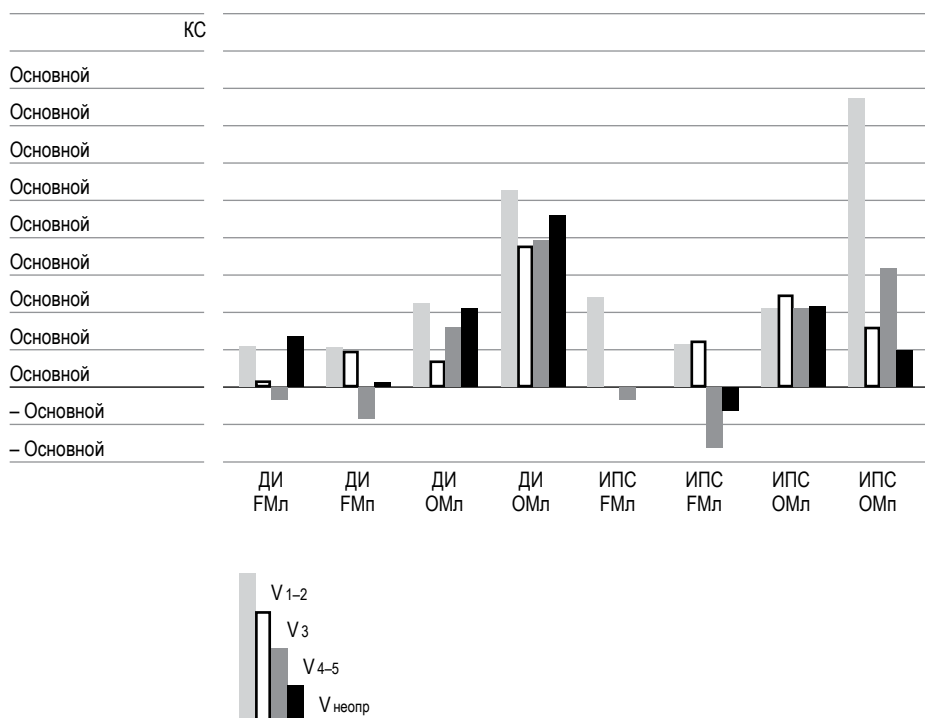


Рис. 4. Коэффициент сдвига показателей соотношения церебрального притока и оттока крови на фоне активной ортостатической пробы.

ние РИ при выраженном уменьшении величины ВО. Следовательно, в данных группах достигнута оптимальная «цена» физиологической компенсации гравитационного перераспределения крови в различных сосудистых регионах при выполнении активной ортопробы: без снижения пульсового кровенаполнения церебрального бассейна и функциональных нарушений оттока крови из него. Данные механизмы способствуют поддержанию адекватного кровотока в церебральных капиллярах, предотвращая ортостатические нарушения органного кровотока.

На основе анализа динамики параметров, отражающих соотношение притока и оттока крови, как в бассейне внутренних сонных артерий, так и в системе позвоночной артерии отмечаются однонаправленные реакции в группах сравнения (рис. 4). ДИ на фоне ортопробы увеличивался, что указывает на нарушение микроциркуляции в форме констрикции артерий сопротивления. При этом у обследуемых III-й группы данные изменения носили разнонаправленные реакции в зависимости от исследуемого отрезка сосудистой системы головного мозга. В FM отведении, как справа, так и слева выявлена дилатация мелких артерий (уменьшение ДИ, ИПС), тогда как в OM отведении таковые параметры тонуса резистивных артерий возросли, демонстри-

руя избирательную артерио- и артериолоконстрикцию. Наибольшие изменения ДИ, ИПС в бассейне позвоночной артерии зарегистрированы на фоне ортопробы у обследуемых 1-й группы.

Снижение перфузии мозговой ткани при переходе в вертикальное положение частично компенсируется миогенными механизмами ауторегуляции тонуса резистивных артерий, обуславливая оптимальность гистогематического обмена веществ в исследуемом регионе за счет генерализованной констрикция мелких регионарных сосудов и повышении транскапиллярного давления при нарушениях венозного оттока. Это обеспечивает норму гомеостатических реакций регионарного кровотока в изменившихся условиях жизнедеятельности [1, 8]. Не исключено, что избыточная реакция констрикции сосудистой системы мозгового кровообращения, может быть обусловлена относительным дефицитом регионарного кровотока в течение первых минут активного ортостаза.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование позволило выявить взаимобусловленность функциональных характеристик церебральной гемодинамики, тонических характеристик регионарных сосудов артериального и венозного отделов, сформированных в зависимости от локализации переходной зоны в грудных отведениях ЭКГ.

Незначительное повышение пульсового кровенаполнения в церебральном бассейне в сочетании с выраженным уменьшением венозного возврата у обследуемых с локализацией переходной зоны в V_3 и V_{4-5} являются результатами действия механизмов реализации срочных реакций, обеспечивающих оптимальную «цену» физиологической компенсации гравитационного перераспределения крови в различных сосудистых регионах при выполнении активной ортостатической пробы.

Гемодинамическая реакция церебрального бассейна на активно реализуемые гравитационные воздействия у обследуемых с горизонтальным расположением сердца (1 группа – V_{1-2}) и с «неопределенной» (4 группа – $V_{\text{неопр.}}$) локализацией переходной зоны в грудных отведениях ЭКГ свидетельствуют о меньшей адаптированности организма обследуемых данных групп. Выявлено резкое снижение пульсового кровенаполнения церебрального бассейна во всех отведениях при повышении венозного оттока. Обнаружены нарушения микроциркуляции в форме констрикции артерий сопротивления, что возможно, является проявлением компенсации недостаточного притока крови в регион.

Полученные результаты исследования необходимо учитывать при проведении ежегодных комплексных профилактических осмотров обучающейся молодежи и выявлении реальной картины состояния здоровья российских и иностранных студентов.

Библиографический список

1. Кузнецова Д.В. Цереброваскулярная и кардиоваскулярная реактивность при артериальной гипертензии в юношеском возрасте: дис. ... канд. мед. наук: 14.03.03. Томск, 2014. 118 с. URL: http://old.ssmu.ru/document/autoreferat_kuznecova.pdf (дата обращения 22.12.2017).
2. Михайловский М.В. Основные принципы хирургической коррекции идиопатического сколиоза // Хирургия позвоночника. 2005. № 1. С. 56–62. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9165810> (дата обращения 22.12.2017).
3. Севрюкова Г.А., Исупов И.Б., Товмасын Л.А. К вопросу о взаимном соответствии переходной зоны в грудных отведениях ЭКГ, сердечного ритма и церебральной гемодинамики // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2017. Т. 17. № 3. С. 337–344. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30608237> (дата обращения 11.01.2018).
4. Тихонов В.Ф., Агафонкина Т.В., Орешников Е.В. Влияние соревновательной физической нагрузки на ЭКГ-параметры у спортсменов-гиревиков // Вестник спортивной науки. 2010. № 1. С. 25–26. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17096376> (дата обращения 11.01.2018).
5. Шарапов А.Н., Сельверова Н.Б. Отчет о научно-исследовательской работе «Особенности автономной нервной регуляции, центрального и периферического отделов кровообращения и системы дыхания в процессе адаптации к умственной и умеренной физической нагрузкам и адаптационные особенности стероидогенеза у детей 13–14 лет» // ФГБ НУ «Институт возрастной физиологии РАО», 2016. С. 26–93. URL: <http://www.ivfrao.ru/science/publications/reports> (дата обращения 15.01.2018).
6. Яруллин Х.Х. Клиническая реоэнцефалография: монография. М.: Медицина, 1983. 272 с.
7. Aro, A.L., Phan D. et al. Cardiac structural and functional profile of patients with delayed QRS transition zone and sudden cardiac death // *Europace Journals*. 2017. 19(4). Pp. 629–635. DOI: 10.1093/europace/euw040.
8. Nakamura Y., Okamura T. et al. Prognostic values of clockwise and counterclockwise rotation for cardiovascular mortality in Japanese subjects: A 24-year follow-up of National Integrated Project for Prospective Observation of Noncommunicable Disease and its Trends in the Aged, 1980–2004 // *Circulation*. 2012. 125(10). Pp. 1226–1233. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.111.070045.
9. Narayanan K., Chugh S.S. The 12-lead electrocardiogram and risk of sudden death: Current utility and future prospects // *Europace Journals*. 2015. 17. PP. ii7-ii13. DOI: 10.1093/europace/euv121.

References

1. Kuznecova D.V. Cerebrovaskulyarnaya i kardiovaskulyarnaya reaktivnost' pri arterial'noy gipertenzii v yunosheskom vozraste (Cerebrovascular and cardiovascular reactivity in arterial hypertension in

- adolescence): dis. ... kand. med. nauk: 14.03.03. Tomsk, 2014. 118 s. URL: [http:// old.ssmu.ru/document/autoreferat_kuznecova.pdf](http://old.ssmu.ru/document/autoreferat_kuznecova.pdf) (date of access 22.12.2017).
2. Mihaylovskiy M.V. Osnovnye principy hirurgicheskoy korrekcii idiopaticeskogo skolioza (General principles of idiopathic scoliosis surgical correction) //Hirurgiya pozvonochnika. 2005. №1. S. 56–62. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9165810> (date of access 22.12.2017).
 3. Sevryukova G.A., Isupov I.B., Tovmasyan L.A. K voprosu o vzaimnom sootvetstvii perekhodnoy zony v grudnykh otvedeniyah EKG, serdechnogo ritma i cerebral'noy gemodinamiki (To the question about the reciprocal conformity of the transition area in the chest leads ECG, heart rate and cerebral hemodynamics) //Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Himiya. Biologiya. Ekologiya. 2017. T. 17. №3. S. 337–344. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30608237> (date of access 11.01.2018).
 4. Tihonov V.F., Agafonkina T.V., Oreshnikov E.V. Vliyaniye sorevnovalatel'noy fizicheskoy nagruzki na EKG-parametry u sportsmenov-girevikov (Influence of physical training activity on ECG parameters in Kettlebell) //Vestnik sportivnoy nauki. 2010. №1. S. 25–26. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17096376> (date of access 11.01.2018).
 5. SHarapov A.N., Sel'verova N.B. Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote «Osobennosti avtonomnoy nervnoy regul'yacii, central'nogo i perifericheskogo otdelov krovoobrashcheniya i sistemy dyhaniya v processe adaptacii k umstvennoy i umerennoy fizicheskoy nagruzkam i adaptacionnye osobennosti steroidogeneza u detey 13–14 let» (Features of autonomous nervous regulation, central and peripheral blood circulation and respiratory system in the process of adaptation to mental and moderate physical activity and adaptation features steroidogenesis in children 13–14 years) // FGB NU «Institut vozrastnoy fiziologii RAO», 2016. S. 26–93. URL: [http://www. ivfrael.ru/science/publications/reports](http://www.ivfrael.ru/science/publications/reports) (date of access 15.01.2018).
 6. YArullin H.H. Klinicheskaya reoencefalografiya: monografiya (Clinical rheoencephalography). M.: Medicina, 1983. 272 s.
 7. Aro, A.L., Phan D. et al. Cardiac structural and functional profile of patients with delayed QRS transition zone and sudden cardiac death // Europace Journals. 2017. 19(4). Pp. 629–635. DOI: 10.1093/europace/euw040.
 8. Nakamura Y., Okamura T. et al. Prognostic values of clockwise and counterclockwise rotation for cardiovascular mortality in Japanese subjects: A 24-year follow-up of National Integrated Project for Prospective Observation of Noncommunicable Disease and its Trends in the Aged, 1980–2004 //Circulation. 2012. 125(10). Pp. 1226–1233. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.111.070045.
 9. Narayanan K., Chugh S.S. The 12-lead electrocardiogram and risk of sudden death: Current utility and future prospects // Europace Journals. 2015. 17. PP. ii7-ii13. DOI: 10.1093/europace/euv121.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

«Наука. Инновации. Технологии», №1, 2018

Андрусенко Светлана Федоровна, к.б.н., доцент, доцент кафедры биомедицины и физиологии ИЖС СКФУ, тел. 89887056068, E-mail svet1677@yandex.ru.

Анфиногенова Оксана Ивановна, кандидат биологических наук, доцент, заведующая кафедрой биомедицины и физиологии Северо-Кавказского федерального университета. Тел. 89624394487. E-mail: zahana@bk.ru.

Батчаев Мухтар Исаевич, директор ООО «Эко-технологии» Телефон 8(962)448-74-84 E-mail: poo-eko@mail.ru.

Бейтуганова Марина Анатольевна, аспирант кафедры геологии нефти и газа Северо-Кавказского федерального университета. Тел. (928)-717-15-32.

Беккиев М.Ю., директор ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», доктор технических наук, профессор. Нальчик. E-mail: vgikbr@yandex.ru.

Беляев Николай Георгиевич, доктор биологических наук, профессор кафедры биомедицины и физиологии Северо-Кавказского федерального университета. Тел. 89034411854. E-mail: belyaev_nikolay@mail.ru.

Ватиашвили Михаил Рубенович, кандидат физико-математических наук, доцент, научный консультант Грузинского государственного научно-технического центра «Дельта» Министерства обороны Грузии. Тел. 89674188458. E-mail: mivv123@mail.ru.

Водопьянова Дарья Сергеевна, кандидат географических наук, доцент, преподаватель кафедры физической географии и кадастров Северо-Кавказского федерального университета. Адрес: г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1. Телефон - +79887517399. E-mail: darina_000023@rambler.ru.

Галай Борис Федорович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор кафедры «Строительство» Северо-Кавказского федерального университета. Тел. (8652) 95-68-44. E-mail: galaybf@mail.ru.

Горлов Александр Семенович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой высшей математики Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова, тел.: 8-920-554-91-89. E-mail: belgoras@mail.ru

Денисова Евгения Владимировна, к.б.н., доцент, доцент кафедры биомедицины и физиологии ИЖС СКФУ, тел. 89880862655, E-mail den_ev@mail.ru.

Диденко Павел Анатольевич кандидат географических наук, доцент, преподаватель кафедры физической географии и кадастров Северо-Кавказского федерального университета; г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1. Тел. +79187485260, e-mail - idenkor@yandex.ru.

Закинян Роберт Гургенович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета. Тел. 8(918)77-88-675. E-mail: zakinyan@mail.ru.

Излиева Ольга Васильевна доктор географических наук, профессор кафедры туризма Высшей школы бизнеса ЮФУ. Тел. 89185813297. E-mail: ivlieva.o@mail.ru.

Колядова Галина Валентиновна, аспирант кафедры геологии нефти и газа Северо-Кавказского федерального университета. Тел. (962)-001-84-90. E-mail: Geya-313@mail.ru.

Кудряшова Ольга Борисовна Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), Старший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Доктор физико-математических наук, доцент; ул. Социалистическая, 1. Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-58-47, факс (3854) 30-30-43. E-mail: olgakudr@inbox.ru.

Кушнир Ксения Владимировна, аспирант 3-го курса Института наук о Земле Южного Федерального университета, методист кафедры туризма Высшей школы бизнеса Южного федерального университета. Тел. +7 928 103 59 17. E-mail: labtourism@sfedu.ru.

Лисова Ирина Михайловна, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры биомедицины и физиологии Северо-Кавказского федерального университета.

Муравлев Евгений Викторович, старший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов, кандидат технических наук ФГБУН «Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук»

(ИПХЭТ СО РАН); ул. Социалистическая, 1. Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-58-47, факс (3854) 30-30-43. E-mail: evvimv@gmail.com.ru.

Настинова Галина Эрднеевна, доктор географических наук, профессор кафедры общей биологии и физиологии, Калмыцкий государственный университет, Российская федерация, 358000, г. Элиста, ул. Пушкина, 11. E-mail: nastinova.ge@yandex.ru. Тел. +7(961)541-22-78.

Нефедова Мария Викторовна, кандидат географических наук, доцент, преподаватель кафедры физической географии и кадастров Северо-Кавказского федерального университета; г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1. Тел. +79624522262. E-mail: nefedova_m@mail.ru.

Плачинта Иван Георгиевич, преподаватель кафедры географии, экологии, туризма Кокшетауского государственного университета им. Ш. Уалиханова. E-mail: plachinta-ivan@mail.ru. Тел. 8(707) 845-58-27.

Разумов В.В. Главный научный сотрудник ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», доктор географических наук, профессор; г. Нальчик. E-mail: razumov_vv@mail.ru.

Разумова Н.В., ведущий научный сотрудник АО «Российские космические системы» Роскосмоса, кандидат географических наук, доцент; г. Москва. E-mail: razumova-nv@yandex.ru.

Редькина Татьяна Валентиновна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и математического моделирования Северо-Кавказского федерального университета. Тел. 8-918-744-92-67. E-mail: TVR59@mail.ru.

Савотченко Сергей Евгеньевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры высшей математики Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Тел. 8-920-561-04-46. E-mail: savotchenkose@mail.ru.

Севрюкова Галина Александровна, доктор биологических наук, профессор кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, Волгоградский государственный технический университет, Российская федерация, 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, 28. Тел. +7(919)799-79-18. E-mail: sevrykova2012@yandex.ru.

Севрюкова Полина Леонидовна, магистрант, Волгоградский государственный социально-педагогический университет, 400066, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, 27.

Скрипчинская Евгения Андреевна, кандидат географических наук, доцент, преподаватель кафедры физической географии и кадастров Северо-Кавказского федерального университета. Адрес: г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1. Тел. +79054120721. E-mail: gerdtea@yandex.ru.

Степкина Мария Юрьевна Младший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов, Кандидат технических наук; ул. Социалистическая, 1. Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-58-47, факс (3854) 30-30-43. E-mail: mabric@mail.ru.

Судакова Анастасия Евгеньевна, магистрант программы «Бизнес менеджмент» Экономико-управленческого факультета университета им. Масарика, Брно, Чехия. Тел. (916) 975-68-75. E-mail: sudakova.a.e@yandex.ru.

Сурнева Олеся Борисовна, аспирант кафедры общей и теоретической физики, Северо-Кавказского федерального университета. Тел. 33-01-45. Email: ien_skfu@mail.ru.

Тикунова Ирина Николаевна, кандидат географических наук, кафедра Географии мирового хозяйства географического ф-та МГУ. Тел. (495) 939-36-31. E-mail: irina.tikunova@icloud.com

Товмасын Лаура Андреевна, лаборант-исследователь кафедры биологии, Волгоградский государственный университет, Российская федерация, 400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, 100

Филиппова Анастасия Михайловна, к.б.н., доцент, доцент кафедры биомедицины и физиологии ИЖС СКФУ. Тел. 89614457499. E-mail: nastasia.m@list.ru.

Харченко Владимир Михайлович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор кафедры геологии нефти и газа Северо-Кавказского федерального университета. Тел. (8652) 94-72-38.

Чиркунов Юрий Александрович, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой высшей математики Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета. Тел. (383) 2-66-27-58. E-mail: chr101@mail.ru.

Шагин С.И., начальник управления научных исследований и инновационной деятельности Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова, доктор географических наук; г. Нальчик. Email: khiz.87@mail.ru.

Яновская Ольга Сергеевна, аспирант кафедры общей и теоретической физики, старший преподаватель кафедры прикладной математики и математического моделирования Северо-Кавказского федерального университета. Тел. (8652) 33-01-45. Email: ien_skfu@mail.ru.

ABOUT THE AUTHORS

«Наука. Инновации. Технологии», №1, 2018

Andrusenko Svetlana Fedorovna, candidate of biological sciences, the associate professor of department of the biomedicine and physiology North-Caucasus federal university. Tel. 89887056068. E-mail: svet1677@yandex.ru.

Anfinogenova O.I., PhD in Biological sciences, Associate Professor, Head of the Department of Biomedicine and Physiology of the North Caucasus Federal University phone 89624394487. E-mail: zaxana@bk.ru.

Batchaev Mukhtar Isayevich, Director of Eco-Technologies LLC. Phone 8(962)448-74-84 E-mail: noo-eko@mail.ru.

Bekkiyev M.Yu., director of Federal State Budgetary Institution Mountain Geophysical Institute, Doctor of Engineering, professor, Nalchik. E-mail: vgikbr@yandex.ru.

Belyaev N.G., Grand PhD in Biological sciences, Professor, Department of Biomedicine and Physiology of the North Caucasus Federal University. Phone 89034411854. E-mail: belyaev_nikolay@mail.ru.

Beytuganova Marina Anatolievna, postgraduate student of department of geology of oil and gas of the North-Caucasian Federal University. Phone (928)-717-15-32.

Chirkunov Yuri Alexandrovich, Doctor of Philosophy, Head of the Department of Higher Mathematics of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering. Phone +7(383)2- 66-2758. E-mail: chr101@mail.ru.

Denisova Evgenija Vladimirovna, candidate of biological sciences, the associate professor of department of the biomedicine and physiology North-Caucasus federal university. Tel. 89880862655. E-mail den_ev@mail.ru.

Didenko Pavel Anatolievich - candidate of geographical sciences, associate professor of the Department of Physical Geography and inventories of the North Caucasus Federal University. Address: a city of Stavropol, Pushkin Street 1. Telephone +79187485260. E-mail: didenkop@yandex.ru

Filippova Anastasia Mikhailovna, candidate of biological sciences, the associate professor of department of the biomedicine and physiology North-Caucasus federal university. Telephone 89614457499. E-mail: nastasia.m@list.ru.

Galay Boris Fyodorovich, doctor of geological and mineralogical Sciences, professor, professor of department «Construction» of the North Caucasus Federal University. Phone (8652) 95-68-44. E-mail: galaybf@mail.ru.

Gorlov Alexander Semenovich, Candidate of Engineering Sciences, Head of High Mathematics Department Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Phone: 8-920-554-91-89, E-mail: belgoras@mail.ru.

Ivliyeva Olga Vasilyevna doctor of geographical sciences, associate professor department chair of tourism of the Higher school of business of SFU; tel. 89185813297. E-mail: ivlieva.o@mail.ru.

Kharchenko Vladimir Mikhaylovich, doctor of geological and mineralogical sciences, professor, professor of department of geology of oil and gas of the North-Caucasian Federal University. Phone (8652) 94-72-38.

Kolyadova Galina Valentinovna, postgraduate student of department of geology of oil and gas of the North-Caucasian Federal University. Phone (962)-001-84-90. E-mail: geya-313@mail.ru.

Kudryashova Olga Borisovna Institute for Problems of Chemical & Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), Senior research associate of laboratory of physics of transformation of energy of high-energy materials Doctor of physical and mathematical sciences, assistant professor. E-mail: olgakudr@inbox.ru. Ph. (3854) 30-58-47, fax (3854) 30-30-43

Kushnir Ksenia Vladimirovna graduate student (3rd course), Institute of Earth sciences of Southern Federal University, methodologist of tourism department, Higher school of business, Southern Federal University, +7 928 103 59 17, labtourism@sfnu.ru.

Lisova I.G., PhD in Biological sciences, Associate Professor, Department of Biomedicine and Physiology of the North Caucasus Federal University. Phone: 89054156788. Email: stavlim@mail.ru.

Muravlev Evgeny Viktorovich, Institute for Problems of Chemical & Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), Junior researcher of laboratory of physics of transformation of energy of high-energy materials Candidate of Technical Sciences. E-mail: evvimv@gmail.com.ru. Ph. (3854) 30-58-47, fax (3854) 30-30-43.

Nastinova Galina E., Ph.D. (Geography), Professor of General Biology and Physiology Department, Kalmyk State University, 11, Pushkina St., Elista, 358000, Russian Federation, nastinova.ge@yandex.ru.

Nefedova Maria Victorovna, candidate of geographical sciences, associate professor of the Department of Physical Geography and inventories of the North Caucasus Federal University. Address: a city of Stavropol, Pushkin Street, 1. Tel. +79624522262. E-mail: nefedova_m@mail.ru.

Plachinta Ivan Georgievich, lecturer of the Department of Geography, Ecology, Tourism at Sh. Ualikhanov Kokshetau State University. E-mail: plachinta-ivan@mail.ru. Phone 8(707) 845-58-27.

Razumov V.V. Chief researcher of Federal State Budgetary Institution Mountain Geophysical Institute, doctor of geographical sciences, professor, Nalchik. E-mail: razumov_vv@mail.ru.

Razumova N.V. Leading researcher of JSC Russian Space Systems of Roskosmos, candidate of geographical sciences, associate professor, Moscow. E-mail: razumova-nv@yandex.ru.

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. Ph. 8-918-744-92-67 Email: TVR59@mail.ru.

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

Sevriukova Galina A., Ph.D. (Biology), Professor of Industrial Ecology and Safety Department, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Av., Volgograd, 400005, Russian Federation, sevrykova2012@yandex.ru.

Sevriukova Polina, L., postgraduate student, Volgograd State Social and Pedagogical University, 27 Lenin Av., Volgograd, 400066, Russian Federation.

Shagin S.I., head of department of scientific research and innovative activity of the Kabardino-Balkarian state university of H.M. Berbekov, doctor of geographical sciences, Nalchik. E-mail: khiz.87@mail.ru.

Skripchinskaya Evgeniya Andreevna, candidate of geographical sciences, pre-penny, lecturer of the Department of Physical Geography and inventories of the North Caucasus Federal University. Ad: a city of Stavropol, Pushkin Street, 1. Tel. +79054120721. E-mail: gerdtea@yandex.ru.

Stepkina Maria Yurevna Institute for Problems of Chemical & Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), Junior researcher of laboratory of physics of transformation of energy of high-energy materials, Candidate of Technical Sciences. E-mail: mabric@mail.ru Ph. (3854) 30-58-47, fax (3854) 30-30-43.

Sudakova Anastasya Evgenievna, the undergraduate program "Business Management", Economics and Management faculty of the Masaryk University, Brno, Czech Republic. Phone (916) 975- 68-75. E-mail: sudakova.a.e@yandex.ru.

Surneva Olesya Borisovna, post-graduate student of the Department of General and Theoretical Physics, North-Caucasian Federal University Phone: (8652) 33-01-45. E-mail: ien_skfu@mail.ru.

Tikunova Irina Nikolaevna, Kandidat of Geographical Science, Scientific researcher of the Department of Geography of World Economy, Geographical Faculty, Lomonosov Moscow State University. Phone (495) 939- 36-31. E-mail: irina.tikunova@icloud.com.

Tovmasian Layra, A., laboratory assistant of Biology Department, Volgograd State University, 100 University Av., Volgograd, 400062, Russian Federation.

Vatiashvili M.R. PhD of physical and mathematical sciences, Scientific consultant Georgian state scientific and technical "Delta" Ministry of Defense of Georgian.

Vodopiyanov Daria Sergeevna - candidate of geographical sciences, associate professor of the Department of Physical Geography and inventories of the North Caucasus Federal University. Address: a city of Stavropol, Pushkin Street 1. Tel. +79887517399. E-mail: darina_000023@rambler.ru.

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. Phone: (8652) 33-01-45. Email: ien_skfu@mail.ru.

Zakinyan Robert Gurgenovitch, The doctor of physical and mathematical sciences, Professor of the Department of General and Theoretical Physics IMNS NCFU. Telephone 8(918)77-88-675. E-mail: zakinyan@mail.ru.

CONTENTS

«Наука. Инновации. Технологии», №1, 2018

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

- Vatiashvili M.R.** The method of hail breaking on the protected areas of the Central Caucasus region 7
- Redkina T.V.** Bacłone transformation for a system of partial differential equations of the third order 23
- Savotchenko S.E., Gorlov A.S.**
Simulation of wave processes in liquid under the vibrations of the membrane in the tube 43
- Stepkina M.Yu., Kudryashova O.B., Muravlev E.V.**
Interaction sprayed of charge fine powders with electroneutral liquid-phase and solid-phase aerosol environments 55
- Surneva O.B., Yanovskaya O.S.**
Parabolic equation with exponential nonlinearity as the condition of joint venture linear system 65
- Chirkunov Yu. A.** Submodels of the three-dimensional Westervelt model in the absence of dissipation 81

EARTH SCIENCES

- Batchaev M.I., Zakinyan R.G.**
Mathematical model of floods with the distributed parameters. 95

**Vodopyanova D.S., Skripchinskaya E.A.,
Nefedova M.V., Didenko P.A.**

Anthropogenic transformation and natural potential of landscapes of Apanasenkovsky district 103

Kushnir K.V., Ivliyeva O.V.

Efficiency of tourist and recreational complex as a factor of territorial development (in case of Russian Azov sea coast). 117

Plachinta I.G.

Development of the analysis method of the influence of the economic factor on migration (on the example of Akmola region) 131

Razumov V.V., [Беккиев М.Ю. Shagin S.I.

Scales and danger of floods in the North Caucasus 143

Tikunova I.N., Sudakova A.E.

The tourist potential of the Silk road countries 161

**Harchenko V.M., Kolyadova G.V.,
Galaj B.F., Beytuganova M.A.**

Geotectonics and geodynamics of structures of the stretching of continents and oceans, communications with rudo petroleum potential and seismicity 181

BIOLOGICAL SCIENCES

Belyaev N.G., Anfinogenova O.I., Lisova I.M.

Characteristics of indices of peripheral blood of men with various volume of total engine activity 195

Filippova A.M., Denisova E.V., Andrusenko S.F.

The use of jerusalem artichoke (helianthus tuberosus l.) As a component of the nutrient solution 203

**Sevriukova G.A., Nastinova G.E.,
Tovmasian L.A., Sevriukova P.L.**

The Functional State of the Cerebral Circulation Depending on the Localization of Transition Area in Chest Lead of ECG at Orthostasis 211

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ 221

ABOUT THE AUTHORS 223

CONTENTS 225

Научное издание

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ

2018

Выпуск 1

Корректор – М.И. Толмачев.

Компьютерная верстка – О.Г. Полевич.

Подписано в печать 25.03.2018. Формат 70 × 108 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Бумага офсетная. Усл. печ. л.
19,75. Тираж 1 000 экз.

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