

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал
Северо-Кавказского федерального
университета

ISSN 2308–4758

18+



Выпуск № 4, 2018 г.

Выходит 4 раза в год

	«Наука. Инновации. Технологии» Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета
Учредитель	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет»
Главный редактор	д-р геогр. наук, профессор В. С. Белозеров
Редакционный совет	А. А. Левитская, председатель, ректор СКФУ, канд. филол. наук, доцент; А. А. Лиховид, заместитель председателя, проректор по научной работе и стратегическому развитию СКФУ, д-р геогр. наук, профессор; В. С. Белозеров, главный редактор, д-р геогр. наук, профессор; М. Ч. Залиханов, д-р геогр. наук, профессор, академик РАН (Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик); А. Г. Храмцов, д-р техн. наук, профессор, академик РАН; Ю. Ю. Балега, д-р физ.-мат. наук, академик. РАН (САО РАН, п. Нижний Архыз); С. В. Рязанцев, д-р экон. наук, член-корр. РАН (ИСПИ РАН, г. Москва); В. С. Тикуннов, д-р геогр. наук, профессор (МГУ им. Ломоносова, г. Москва); С. Пестрак, профессор (Институт Жана Лямура университета Лотарингии, г. Нанси, Франция)
Редакционная коллегия	М. Т. Абшаев, д-р физ.-мат. наук, профессор (Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик); А. А. Лиховид, д-р геогр. наук, профессор; В. С. Белозеров, д-р геогр. наук, профессор (главный редактор); Т. П. Бондарь, д-р мед. наук, профессор; В. Б. Бородулин, д-р мед. наук, профессор (Саратовский ГМУ Росздрава, г. Саратов); О. А. Бутова, д-р мед. наук, профессор; Т. И. Герасименко, д-р геогр. наук, профессор (Оренбургский гос. университет, г. Оренбург); В. А. Гридин, д-р геол.-минерал. наук, профессор; Л. И. Губарева, д-р биол. наук, профессор; Т. И. Джандарова, д-р биол. наук, доцент; Ю. И. Диканский, д-р физ.-мат. наук, профессор; Л. А. Диневич, д-р физ.-мат. наук, профессор (Тель-Авивский университет, г. Тель-Авив); К. В. Ерин, д-р физ.-мат. наук, профессор; А. И. Жакин, д-р физ.-мат. наук, профессор (Юго-Западный гос. университет, г. Курск); А. Р. Закинян, канд. физ.-мат. наук, доцент; А. О. Иванов, д-р физ.-мат. наук, профессор (Уральский федеральный университет им. Б. Ельцина); А. А. Коляда, д-р физ.-мат. наук, доцент (Белорусский гос. университет, г. Минск); С. А. Куникин, канд. физ.-мат. наук, доцент; А. Д. Лодыгин, д-р техн. наук, доцент; А. В. Лысенко, д-р геогр. наук, доцент; И. Н. 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. Молахосе-ини, канд. наук, доцент (Исламский университет Азад, Керман, Иран); Х. А. А. Кдаис, канд. техн. наук, профессор (Иорданский университет науки и технологии, Амман)
Свидетельство о регистрации	выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) ПИ № ФС77–52723 от 8.02.2013
Подп. индекс	Объединенный каталог. ПРЕССА РОССИИ. Газеты и журналы: 94011
Журнал включен	в БД «Российский индекс научного цитирования». Журнал «Вестник Ставропольского государственного университета» перерегистрирован в журнал «Наука. Инновации. Технологии» в связи с переименованием учредителя.
Журнал	в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, с 1 декабря 2015 г.
Адрес Телефон Сайт E-mail	редакции и издателя: 355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1 (8652) 33–07–32 www.ncfu.ru nit_ncfu@mail.ru
ISSN	2308–4758
©	ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», 2018

	«Science. Innovations. Technologies» North Caucasus Federal University
Founder	Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «North Caucasus Federal University»
Editor in chief	V. S. Belozеров, Doctor of Geographical Sciences, professor
Editorial Council	A.A. Levitskaya, chairman, Rector SKFU, PhD. Philology Sciences, Associate Professor; A.A. Likhovid, Vice Chairman, Doctor of Geographical Sciences, Professor; V.S. Belozеров, Chief Editor, Doctor of Geographical Sciences, professor; M.Ch. 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. Belozеров, Dr. of Geographical Sciences, professor, editor in chief; T.P. Bondar', MD, professor; V.B. Borodulin, MD, Professor (Saratov State Medical University, Saratov); O.A. Butova, MD, professor; Gerasimenko T.I., Dr. of Geographical Sciences, Professor (Orenburg State University, Orenburg); Gridin V.A., Dr. of geological-mineralogical Sciences, Professor; L.I. Gubareva, Sc. D., Professor; T.I. Dzhandarova, Sc. D., Associate Professor; Y.I. Dikanskiy, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor; L.A. Dinevich, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Tel-Aviv University, Tel-Aviv); K.V. Erin, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor; A.I. Zhakin, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Southwest State University, Kursk); A.R. Zakinyan, candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor; A.O. Ivanov, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Yeltsin's Ural Federal University); A.A. Kolyada, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor (Belarusian State University, Minsk); S.A. Kunikin, Ph.D., Associate Professor; A.D. Lodygin, Dr. of Technical Sciences, associate professor; A.V. Lysenko, Dr. of Geographical Science, associate professor; I.N. Molodikova, Ph.D. (Central European University, Budapest); V.I. Naats, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor; T.G. Nefedova, Dr. of Geographical Sciences, Leading Researcher, Russian Academy of Sciences (IG RAS, Moscow); P.M. 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 Phone Site E-mail	355009, Stavropol, Pushkin street, 1 8 (8652) 33–07–32 www.ncfu.ru nit_ncfu@mail.ru
ISSN	2308–4758
©	FGAOU VO «North Caucasus Federal University», 2018

СОДЕРЖАНИЕ

«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ», № 4, 2018

ФИЗИКО–МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

01.01.07

Вычислительная математика

Наац И.Э., Наац В.И., Ярцева Е.П.

Разработка численного метода решения
оптимизационных задач аппроксимации
функции, заданной приближенно, и её про-
изводных на основе вариационного подхо-
да

Development of a numerical method for solving optimi-
zation problems approximation of the function given ap-
proximately and its derivatives based on the variational
approach 7

01.01.02

Дифференциальные уравнения, дина- мические системы и оптимальное уп- равление

Чиркунов Ю.А.

Автомодельные волны трехмерной модели
Вестервельта при наличии диссипации

Self-similar waves of threedimensional model of wes-
tervelt in the existence of dissipation 21

01.04.14

Теплофизика и теоретическая теплотех- ника

Симоновский А.Я.

Фазовые превращения в сталях при управ-
ляемой закалке в магнитной жидкости

Phase transformations in steels under controlled quen-
ching in a magnetic fluid 31

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- 25.00.12 Геология, поиски и разведка нефтяных и газовых месторождений**
- Харченко В.М., Лапта Д.В.**
 Новый структурно-метрический метод выявления перспективных структур на нефть и газ (на примере Нурин-Хагской площади в Калмыкии)
 New structural-metric method for detecting perspective oil and gas structures (on the example of Nurin-Khagsky square in Kalmykia). 51
- 25.00.23 Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов**
- Ашабоков Б.А. Ташилова А.А. Кешева Л.А.**
 Результаты прогноза снежного покрова в Кавказском регионе методом сингулярно-спектрального анализа
 Results of snow cover forecast in the caucasus region using the method of singular-spectral analysis 65
- 25.00.24 Экономическая, социальная, политическая и рекреационная география**
- Ткачева Т.А.**
 Туристский образ Северного Кавказа в представлениях населения России
 Tourist image of the Northern Caucasus in the representations of the population of Russia 77
- Щитова Н.А., Соловьев И.А. Белозеров В.С.**
 Дагестан: модель межкультурного взаимодействия в полиэтничном регионе
 Dagestan – a model of intercultural interaction in a poly-ethnic region 91
- Черкасов А.А.**
 Особенности вовлечения в урбанизационные процессы этносов в России
 Peculiarities of involving the urbanization processes of ethnoses in Russia 105
- 25.00.25 Физика атмосферы и гидросферы**
- Бадахова Г.Х. Лашманов Ю.К. Шмигельский В.А.**
 Динамика и современный режим грозовой активности над Центральным Предкавказьем
 Dynanics and modern regime of thunderstorm activity over Central Precaucasus territory 117

Данилова Н.Е., Семенова Ю.А., Смерек Ю.Л., Закинян Р.Г.

Влияние подоблачной конвекции на развитие облачной конвекции

Influence under-cloudy convections on development of a cloudy convection

131

Диденко А.Ю. Симахина М.А. Волкова В.И. Закинян А.Р.

К проблеме искусственного стимулирования конвекции в атмосфере

37

To a problem of artificial stimulation of convection in atmosphere

151

01.01.07

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА

УДК 517.972:519.633

**Наац И.Э.,
Наац В.И.,
Ярцева Е.П.**

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

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ЗАДАЧ АППРОКСИМАЦИИ ФУНКЦИИ, ЗАДАННОЙ ПРИБЛИЖЕННО, И ЕЕ ПРОИЗВОДНЫХ НА ОСНОВЕ ВАРИАЦИОННОГО ПОДХОДА

Введение: представленная работа продолжает исследования авторов по методам теории приближения функций вещественной переменной, заданных приближенно, на основе их представления интегралами.

Материалы и методы исследований: в работе исследуются методы представления функций, заданных приближенно, их сингулярными интегралами применительно к задачам аппроксимации, как самих функций, так и их производных. Выполняется постановка задачи «восстановления» функции по приближенным данным, кратко излагаются основные понятия, определения и подходы к её решению. Разрабатывается численный метод решения оптимизационных задач аппроксимации функции по приближенным данным. Осуществляется построение соответствующего вычислительного алгоритма. Рассматривается задача «восстановления» производных исследуемой функции и подходы к её решению.

Результаты исследований и их обсуждение: возможным приложением подобной теории являются задачи вычислительной математики, связанные с операторами обобщенного дифференцирования суммируемых функций и нахождения так называемых слабых решений для краевых задач математической физики. Практическая значимость результатов состоит в том, что предложенные методы и подходы могут найти применение в прикладных задачах теории приближения функций, задачах прикладного анализа и краевых задачах математической физики, использующих приближенно заданные исходные данные, полученные в ходе физических экспериментов или эмпирические функции.

Ключевые слова: аппроксимация функции, обобщенные полиномы, регуляризующие алгоритмы, сингулярные интегралы, вычислительный процесс, задачи прикладного анализа.

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

North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

Development of a numerical method for solving optimization problems approximation of the function given approximately and its derivatives based on the variational approach

Introduction: the presented work continues the authors' research on the methods of the theory of approximation of functions of a real variable, given approximately, on the basis of their representation by integrals.

Materials and methods of research: the paper studies the methods of representation of functions given approximately by their singular integrals in relation to the approximation problems, both the functions themselves and their derivatives. The problem of "recovery" of the function from approximate data is formulated, the basic concepts, definitions and approaches to its solution are briefly described. A numerical method for solving optimization problems of function approximation from approximate data is developed. The construction of the corresponding computational algorithm is carried out. The problem of «recovery» of derivatives of the function under study and approaches to its solution are considered.

Research results and their discussion: a possible application of this theory is the problem of computational mathematics associated with the operators of generalized differentiation of summable functions and finding the so-called weak solutions for boundary value problems of mathematical physics. The practical significance of the results is that the proposed methods and approaches can be used in applied problems of the theory of approximation of functions, problems of applied analysis and boundary value problems of mathematical physics, using approximately given initial data obtained in the course of physical experiments or empirical functions.

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

Введение

Представленная работа продолжает исследования авторов по методам теории приближения функций вещественной переменной, заданных приближенно, на основе их представления интегралами [1–3]. В работе исследуются методы представления функций, заданных приближенно, их сингулярными интегралами применительно к задачам аппроксимации, как самих функций, так и их производных. В подобной постановке задача относится к классу некорректно поставленных задач, поскольку, как известно, операция дифференцирования эмпирических функций является некорректной, и требует для своего решения построения соответствующих регуляризующих методов и алгоритмов. Эти вопросы в определенной степени решаются в рамках данной работы.

В работе последовательно излагаются следующие этапы исследований и соответствующие им результаты: выполняется постановка задачи «восстановления» функции по приближенным данным, кратко излагаются основные понятия, определения и подходы к её решению; разработка численного метода решения оптимизационных задач аппроксимации функции по приближенным данным; построение соответствующего вычислительного алгоритма; рассматривается задача «восстановления» производных исследуемой функции и подходы к её решению.

Результаты теоретических исследований, полученных в рамках настоящей работы, имеют самостоятельное значение в теории приближения функций. Возможным приложением подобной теории являются задачи вычислительной математики, связанные с операторами обобщенного дифференцирования суммируемых функций и нахождения так называемых слабых решений для краевых задач математической физики [4–7]. Практическая значимость результатов состоит в том, что предложенные методы и подходы могут найти применение в прикладных задачах теории приближения функций, задачах прикладного анализа и краевых задачах математической физики, использующих приближенно заданные исходные данные, полученные в ходе физических экспериментов или эмпирические функции.

Материалы и методы исследований

Постановка задачи «восстановления» функции по приближенным данным, основные понятия, определения и подходы к её решению. Прежде чем непосредственно перейти к содержательной части представленной работы, следует привести несколько исходных определений. В частности, функция $f(x)$, определенная на множестве Ω (как правило, это отрезок $[a, b]$, если не оговорено другое), считается представленной интегралом, если в каждой точке $x \in \Omega$ ее можно записать в виде следующего линейного функционала

$$f(x) \sim \int_a^b K_n(x, x') \varphi(x') dx' = f(x, \varphi) \quad (1)$$

заданного на множестве $\Phi \subset C_\Sigma(\Omega)$ (« $\sim$ » – символа эквивалентности). Функционал (1) одновременно рассматривается и как функция переменной x . Считается, что переменные x и x' принимают значения в Ω , хотя последнее совсем не обязательно. В частности, для приложений определенный интерес могут представлять ситуации, когда $x' \in \Omega'$, а $x \in \Omega$ при этом $\Omega' \subset \Omega$. Подобные примеры важны при решении так называемых задач экстраполяции функций.

Представление функций $f(x)$ интегралом (1) носит достаточно общий характер и его конкретные приложения всегда основываются на тех или иных частных допущениях. Примером подобных представлений могут служить так

называемые потенциалы в теоретической физике. Поясним смысл символа эквивалентности « $\sim$ » в формуле (1) в контексте излагаемой ниже теории. Полагаем, прежде всего, что исследуемая функция $f(x) (\in \Omega)$ представлена своим σ приближением $f_\sigma(x)$, определяемым соотношением

$$\|f(x) - f_\sigma(x)\|_{L_2(\Omega)} \leq \sigma \cdot \|f_\sigma\|_{L_2(\Omega)}$$

где $\sigma (\sigma > 0)$ – некий параметр, характеризующий степень неопределенности в задании $f(x)$.

Зачастую в прикладном анализе $f_\sigma(x)$ задается вектором приближенных значений $\tilde{f}_\sigma(x) = \{f_{\sigma,i}\}_{i=1}^m$ и первое, что требуется от этих исходных данных – «восстановить» непрерывный график $\tilde{f}(x)$ исследуемой функциональной зависимости величин $Y = \{y = f(x)\}$ и $X = \{x : x \in \Omega\}$. Символ « $\sim$ » в дальнейшем означает приближенный характер соответствующих функций и переменных. Упомянутая выше задача «восстановления» функции по приближенным данным в соответствии с представлением (1) в прикладном анализе решается на основе оптимизационной задачи вида

$$\inf T_\alpha(K\varphi, f_\sigma) = T_\alpha(K\varphi^*, f_\sigma), \quad \varphi \in \Phi \subset C(\Omega) \quad (2)$$

$$\text{где} \quad T_\alpha(K\varphi, f_\sigma) = \|(K\varphi)(x) - f_\sigma(x)\|_{L_2(\Omega)}^2 + \alpha \|\varphi\|_{L_2(\Omega)}^2 \quad (3)$$

и $\alpha > 0$ – так называемый параметр регуляризации. Решение φ^* (тоже φ_α^* если требуется подчеркнуть его зависимость от параметра регуляризации) определяет далее $f(x, \varphi^*) = f^*(x)$ в соответствии с (1), то есть непрерывную функцию, аппроксимирующую искомую $f(x)$ в пределах Ω . Конечно последнее утверждение имеет место, если

$$\|(K\varphi^*)(x) - f_\sigma(x)\|_{L_2} \leq \sigma \|f_\sigma\|_{L_2},$$

и выбор α осуществляется в соответствии с соотношением $\alpha(\sigma) \rightarrow \infty$ при $\sigma \rightarrow 0$. Основано оно на том, что неравенства $\|f^* - f_\sigma\|_{L_2} \leq \frac{\varepsilon}{2}$ и $\|f_\sigma - f\|_{L_2} \leq \frac{\varepsilon}{2}$ влекут $\|f^* - f\|_{L_2} \leq \varepsilon$ на основе аксиом метрики, индуцированной указанной нормой. Изложенный выше подход может быть назван *методом обобщенной инверсии интегрального оператора K в операторном уравнении $K\varphi = f_\sigma$* . Заметим, что для выполнения условия (4) важна роль функционала $\|\varphi\|_{L_2(\Omega)}^2$ (стабилизатора) в правой части (3) [8].

Результаты исследований и их обсуждение

Разработка численного метода решения оптимизационных задач аппроксимации функции по приближенным дан-

ным. Для построения решающих алгоритмов изложенную выше теорию аппроксимации функций $f(x)$ функционалами (интегралами) вида $(K\varphi)(x)$ ($\varphi \in \Phi$) необходимо дополнить рекомендациями по выбору ядер $K(x, x')$ в представлении (1), а также методами построения множеств Φ , в пределах которых отыскиваются решения вариационной задачи (3). Ответы на указанные вопросы в большей мере раскрывают суть метода и область его возможных приложений в вопросах прикладного анализа.

Что касается выбора ядра $K(x, x')$ в представлении (1), то здесь можно сослаться на известную *теорему Гильберта-Шмидта* [9], в соответствии с которой, если функция $f(x)$ представима с помощью интеграла (1) с симметричным L_2 ядром $K(x, x')$ и $\varphi(x) \in L_2(\Omega)$, то $f(x)$ может быть также представлена и рядом Фурье относительно ортонормированной системы $\{u_k\}_{k=1}^{\infty}$ собственных функций указанного ядра. Последнее означает, что помимо (1) исследуемая функция $f(x)$ может быть одновременно представлена в виде

$$f(x) \sim \sum_{k=0}^m a_k u_k(x) \quad (5)$$

где
$$a_k = \int_{\Omega} f(x) u_k(x) dx, \quad k = 1, 2, \dots$$

Более того, если при этом $\int_{\Omega} K^2(x, x') dx' = A^2(x) < C^2$,

где C – конечное число, то ряд (5) сходится абсолютно и равномерно для каждой функции $f(x)$ вида $\int_{\Omega} K(x, x') \varphi(x') dx'$. ($f(x) \in L_2(\Omega)$). Таким образом, при симметричном L_{σ} ядре $K(x, x')$ функции $f(x)$ (тоже что и $f(x, \varphi^*)$), полученные изложенным выше методом по $f_{\sigma}(x)$, могут быть подвергнуты анализу с использованием разложений типа (5). Предполагается при этом, что ряд (5) «наследует» аналитические свойства функции $\tilde{f}(x)$ в той мере, в какой $f_{\sigma}(x)$ представляет $f(x)$ на Ω . Разумеется, речь не может при этом идти о характеристике $f(x)$ на основе производных, о чем будет сказано подробнее ниже. Можно заметить, что помимо симметричности ядра $K(x, x')$ могут быть приняты и другие подобные предположения. В частности, в случае так называемых ядер потенциального типа имеет место соотношение

$$K_n(x, x') = K_n(x - x') = K_n(|x - x'|) \quad (6)$$

При этом $K_n(|x - x'|) \rightarrow 0$ при $|x - x'| \rightarrow \infty$, что, без ограничения общности позволяет распространить интегрирование в (1) на бесконечный интервал $(-\infty, \infty)$. Если принять (6), то представление (1) можно рассматривать как свертку в $L_2(R_1)$ функций $K_n(x, x')$ и $\varphi(x')$ по переменной x' . В этом

случае для (1) используется запись $(K(x), \varphi) = (K, \varphi)(x) = f(x, \varphi)$. Основным аппаратом исследования функционалов типа $f(x, \varphi)$ является Фурье-преобразование в силу равенства $(K(x), \varphi)^\wedge = \hat{K}(x) \cdot \hat{\varphi}$, где символ « $\wedge$ » означает указанное преобразование. Таким образом, если принять допущение (6), то функции $f(x)$, представимые интегралом (1), можно относить к функциональному классу в $L_2(R_1)$, элементы которого имеют сходящиеся ряды Фурье. Заметим, что принятие условия (6) зачастую ведет к появлению у ядра $K(x, x')$ особенностей при $x' \rightarrow x$ (расходимости в нуле). Соответствующие интегралы при вычислениях требуют применения методов регуляризации их сходимости, о чем будет сказано ниже.

Ясно, что свойства функций $f(x, \varphi)$, порождаемых интегралом (1) на множестве Φ , также зависит помимо ядра $K(x, x')$ от свойств его элементов. Выше предполагалось, что функции φ принадлежат классу $L_2(R_1)$, что требовалось для существования решений вариационной задачи для функционала (3). Вместе с тем ясно, что введение большей определенности относительно свойств элементов множества Φ позволяет строить более эффективные решающие алгоритмы в рамках теории минимизации квадратичных функционалов. Примером подобного ограничения в задаче (2) было введение в $T_\sigma(K\varphi, f_\sigma)$ функционала $\|\varphi\|_{L_2(\Omega)}^2$.

Остановимся подробнее на том, в какой мере последовательности элементов φ из Φ могут влиять на «качество» представления (1). Для всякой последовательности $\{\varphi_\nu(x)\}_{\nu=1}^\infty$ можно определить последовательность $\{f_\nu(x) = \int_\Omega K(x, x')\varphi_\nu(x')dx'\}_{\nu=1}^\infty$. Если оператор K , определенный данным интегралом вполне непрерывен, то сходимость $\{\varphi_\nu\}_{\nu=1}^\infty$ необходимо влечет сходимость $\{f_\nu\}_{\nu=1}^\infty$. Правда, последняя, как известно, сходится в слабом смысле и, строго говоря, может и не иметь своего слабого предела. В этой части важной является следующая лемма 1.

Лемма 1: Если последовательность $\{f_\nu\}_{\nu=1}^\infty$ сходится сильно (по норме) и $\sup_{x'} K(x, x')$ по переменной x' ограничена сверху единицей всех x , то $\{(K\varphi_\nu)(x)\}_{\nu=1}^\infty$ сходится равномерно.

Доказательство. Доказательство леммы основывается на следующих соотношениях

$$\begin{aligned} |(K\varphi_\nu)(x) - (K\varphi_k)(x)| &= |f_\nu(x) - f_k(x)| = \left| \int_\Omega K(x, x')(\varphi_\nu(x') - \varphi_k(x'))dx' \right| \leq \\ &\leq \max_{x'} K(x, x') \int_\Omega |\varphi_\nu(x') - \varphi_k(x')|dx' \leq \|\varphi_\nu(x) - \varphi_k(x)\|_{L_1(\Omega)} \end{aligned}$$

Таким образом, $|f_\nu(x) - f_k(x)| \rightarrow 0$ в каждой точке $x \in \Omega$, если

$$\|\varphi_v - \varphi_k\|_{L_1(\Omega)} \rightarrow 0 \text{ при } v, k \rightarrow \infty.$$

Выше речь шла о последовательностях Коши, поскольку в рассматриваемых задачах априори оговаривать существование предельных элементов φ^* и f^* не представляется возможным. Подобные проблемы предпочтительно рассматривать в процессе построения логической структуры предлагаемых вычислительных методов и алгоритмов. Последнее обуславливается тем обстоятельством, что для конечномерных вариантов соответствующих функциональных пространств понятия сильной и слабой сходимости, в сущности, эквивалентны друг другу, что избавляет от необходимости излишнего теоретизирования при рассмотрении вариационных задач теории аппроксимации. Действительно, в дискретных вариантах, когда $\varphi(x)$ может быть представлена вектором $\vec{\varphi} = \{\varphi_1, \dots, \varphi_m\}$, ассоциированным в системой точек $\{x_i\}_{i=1}^m$ на отрезке $[a, b]$, интеграл (1) может быть заменен интегральной суммой вида

$$\sum_{i=0}^m K(x, \xi_i) \cdot \varphi_i \cdot \Delta_i(x') = S_m(x, \vec{\varphi})$$

где $\Delta_i(x') = |x'_i - x'_{i-1}|$ и ξ_i — некая неопределенная точка в пределах элементарного интервала разбиений, т. е. $x'_i < \xi_i < x'_{i-1}$ ($i = \overline{1, m}$).

Выбор системы точек $\{\xi_i\}_{i=1}^m$ в пределах области определения функции $\Delta_c T$ требует соответствующих допущений относительно аналитических свойств этой функции. Только в этом случае удастся построить вполне определенный квадратурный процесс и четко определить тот содержательный смысл, который вкладывается в понятие «конечномерный матричный аналог $\hat{K}$ для данного линейного интегрального оператора K ». Известно в силу указанных здесь причин, что построение дискретных аналогов для интегралов неоднозначно. Выбор конкретного способа дискретизации вносит определенность в вычислительные схемы и вместе с ней возможность характеристики аппроксимирующих последовательностей в терминах строгой сходимости.

Построение алгоритма дискретизации задачи (1) для численного решения оптимизационных задач аппроксимации функции $f(x)$ по приближенным данным. Приведем в качестве примера один из возможных вариантов дискретизации исходного представления (1), полагая, что в окрестности узловых точек x_l ($l = \overline{1, m}$), исследуемая функция $f(x)$ приближается отрезками прямых

$$\varphi_l^{(1)}(x') = f_{l-1} + \frac{f_l - f_{l-1}}{x'_l - x'_{l-1}}(x' - x'_l) \quad (7)$$

В условиях этого предположения имеет место следующие приближения

$$\int_a^b K(x, x') \varphi(x') dx' \sim \sum_{k=0}^m \varphi_k G_{m,k}(x) \quad (8)$$

$$\text{где} \quad \begin{cases} G_{m,k}(x) = M_{m,k}(x) + N_{m,k+1}(x), & k = \overline{0, m}, \\ M_{m,k=0}(x) = 0, & \forall x \in [a, b], \end{cases} \quad (9a)$$

$$\begin{cases} N_{m,l}(x) = \bar{Q}_{m,l}(x) - B_{m,l}(x), & \forall x \in [a, b] \\ M_{m,l}(x) = B_{m,l}(x) - x_{l-1} A_{m,l}(x) \\ l = \overline{0, m}, \end{cases} \quad (9b)$$

$$\begin{cases} A_{m,l}(x) = \frac{1}{x_l - x_{l-1}} \int_{x_{l-1}}^{x_l} K(x, x') dx', \\ B_{m,l}(x) = \frac{1}{x_l - x_{l-1}} \int_{x_{l-1}}^{x_l} x' \cdot K(x, x') dx' \end{cases} \quad (9в)$$

если $x \notin [x_{l-1}, x_l]$.

Формулы (9в) применимы в случае, если $x \notin [x_{l-1}, x_l]$, в противном случае в подынтегральных выражениях осуществляется замена типа

$$K(x, x') = K(x - x') := K_n(\mu) = C_{n,\mu} \quad (10)$$

Последнее условие касается тех ситуаций, когда ядро $K(x, x')$ имеет особенности в точках диагонали $x = x'$. Это может касаться в частности ядра потенциалов Рисса $K(x, x') = |x - x'|^{-\beta}$ ($0 < \beta < 1$). Заметим, что в вычислительных задачах теории потенциала обычно полагают $C_{n,\mu}$ равным нулю.

Расчетные формулы (7)–(10) (алгоритм) используются далее при решении оптимизационных задач вида

$$\min_{\vec{\varphi} \in \Phi_m} \|S_m(x, \vec{\varphi}) - f(x)\|_{L_2(\Omega_x)}^2$$

если аппроксимируемая функция $f(x)$ представлена непрерывным приближенным аналогом, скажем, $f_\sigma(x)$, и оптимизационных задач вида

$$\min_{\vec{\varphi} \in \Phi_m} \|\vec{S}(\vec{\varphi}) - \vec{f}\|_{l_2}^2, \quad (11)$$

если функция $f(x)$ представлена вектором своих значений в некоторых узлах $\{x_i\}_{i=1}^m$ на отрезке $[a, b]$.

Введение ограничений на $\varphi(x)$ и, в частности, предположение (7) делает целесообразным ограничить и множество возможных векторов $\{\vec{\varphi}\}$, образующих в совокупности пространство Φ_m . Будем в частности полагать, что в качестве Φ_m выбирается шар в R_m радиуса R с центром в точке $\vec{\varphi}_0$. Соответствующее обозначение записывается в виде $B(\vec{\varphi}_0, R) = \{\vec{\varphi} \in R_m : \|\vec{\varphi} - \vec{\varphi}_0\|_{l_2} \leq R\}$. Задача оптимальной аппроксимации (11) теперь записывается в виде

$$\min_{\vec{\varphi} \in B(\vec{\varphi}_0, R)} \|\vec{S}(\vec{\varphi}) - \vec{f}\|_{l_2}^2 \quad (12)$$

Поскольку $B(\vec{\varphi}_0, R)$ является выпуклым множеством, то задача минимизации на нем квадратичных функционалов решается однозначно. Последнее обстоятельство позволяет предложить и способ построения минимизирующей последовательности в задаче (12). Определяющей в этом плане может быть лемма 2.

Лемма 2. Если $\vec{\varphi}_1$ и $\vec{\varphi}_2$ принадлежат $B(\vec{\varphi}_0, R)$, то вектор $\vec{\varphi} = \alpha \cdot \vec{\varphi}_1 + \beta \cdot \vec{\varphi}_2$, где $\alpha + \beta = 1$ и $\alpha, \beta > 0$ также принадлежит этому шару.

Доказательство. Для доказательства леммы 2 достаточно показать, что $\|\vec{\varphi} - \vec{\varphi}_0\| < R$ если $\alpha, \beta \in B(\vec{\varphi}_0, R)$. Имеем

$$\|\vec{\varphi} - \vec{\varphi}_0\|_{l_2} = \|\alpha \cdot \vec{\varphi}_1 + \beta \cdot \vec{\varphi}_2 - \vec{\varphi}_0\|_{l_2} = \|\alpha \cdot (\vec{\varphi}_1 - \vec{\varphi}_0) + \beta \cdot (\vec{\varphi}_2 - \vec{\varphi}_0)\|_{l_2} \leq \alpha \|\vec{\varphi}_1 - \vec{\varphi}_0\|_{l_2} + \beta \|\vec{\varphi}_2 - \vec{\varphi}_0\|_{l_2} \leq \alpha R + \beta R = R$$

Следствие из леммы 2.

Важным следствием этой леммы является то, что условие

$$\vec{\varphi}^{(v-1)}, \vec{\varphi}^{(v-2)} \in B(\vec{\varphi}_0, R)$$

влечет принадлежность к шару $B(\vec{\varphi}_0, R)$ и вектора

$$\vec{\varphi}^{(v)} = \alpha \vec{\varphi}^{(v-1)} + (1 - \alpha) \vec{\varphi}^{(v-2)} \text{ для любых } v \geq 2.$$

Остается лишь указать способ выбора параметра α ,
где $\alpha \in (0, 1)$ на каждом v – том шаге линеаризации квадратичных форм.

Задача «восстановления» производных исследуемой функции $f(x)$ при условии, что она представлена своими σ приближениями $f_\sigma(x) \in C_\Sigma(\Omega)$. В заключение рассмотрим задачу «восстановления» производных исследуемой функции $f(x)$ в рамках изложенного в работе аналитического аппарата, считая, как и выше, что она представлена своими σ – приближениями. Поскольку эмпирические функции $f_\sigma(x) \in C_\Sigma(\Omega)$ и заведомо не дифференцируемы в обычном смысле, то ясно, что речь может идти о производных в «обобщенном» смысле. Смысл этого понятия в контексте излагаемой в работе теории будет пояснен ниже. А пока напомним, что обобщенные производные также как и обычные производные в случае дифференцируемых функций используются для характеристики мер локальной гладкости функциональных зависимостей величин X и $Y = \{y : y f(x), x \in X\}$. Для локально суммируемых функций подобная постановка вполне правомерна, а интегральные представления функций служат адекватным средством их исследования. С учетом последнего обстоятельства, исходным моментом теории дифференцирования функций, представленных интегралом типа (1), являются условия дифференцирования интегралов от суммируемых функций. Ясно, что речь идет, прежде всего, о выполнении равенства

$$\frac{d}{dx} \left(\int_{\Omega} K(x, x') \varphi(x') dx' \right) = \int_{\Omega} \frac{\partial K(x, x')}{\partial x} \varphi(x') dx' \quad (13)$$

Поскольку по условию задачи ядро $K(x, x')$ является L_2 – интегрируемым, то $K'_x(x, x')$ уже не обязано быть L_2 – интегрируемым, даже если удастся формально определить эту производную. Это первая трудность, которая возникает при попытке корректного определения производной для функции $f(x, \varphi) = (K\varphi)(x)$ по переменной $x \in \Omega$. Вторая особенность интегралов в (13) состоит в том, что для L_2 – интегрируемых функций интеграл $(K\varphi)(x)$ может быть в лучшем случае абсолютно непрерывной функцией, производная

от которой не обязана быть конечной в каждой точке $x \in \Omega$. Для адекватного (поточечного) соответствия интегралов в (13) необходима непрерывность соответствующих подынтегральных выражений [9]. В связи с этим заметим, что если функции $f(x)$ известны своими приближениями $\tilde{f}(x)$, то оператор дифференцирования целесообразно определять в виде

$$(D_n \tilde{f})_\mu(x) = \sup_{0 < |h| \leq \mu} \frac{\tilde{f}(x+h) - \tilde{f}(x-h)}{2h} \quad (14)$$

где параметр модели μ определяется, как и выше [1], т.е. в соответствии с принципом $\max_{(x_1, x_2) \in \Omega} |x_2 - x_1| \geq \mu$. В соответствии с этим, производную функции $f(x, \varphi) \equiv (K\varphi)(x)$ будем определять выражением (интегралом)

$$\int_{\Omega} (D_\mu(K\varphi))(x) dx' = \int_{\Omega} (D_{h,x} K)_\mu(x, x') \cdot \varphi(x') dx' \quad (15)$$

Оператор (14) можно считать оператором обобщенного дифференцирования для функций $f \in C_1(\Omega)$. Действительно, в этом случае

$$\lim_{\substack{|h| \leq \mu \\ \mu \rightarrow 0}} (D_n f)_\mu(x) = (Df)(x)$$

Подобные операции предельного перехода в (15), в силу сказанного выше, лишены содержательного смысла, а оператор (15) следует принимать в качестве определения «операции дифференцирования» для $f(x, \varphi)$, осуществляемой с помощью интеграла. Если исходная функция $f(x)$ представлена $f_\sigma(x)$, то в интеграле (15) функцию $\varphi(x)$ следует заменить на $\varphi^*(x)$ в соответствии с решением задачи «восстановления» функции по приближенным данным.

Выводы

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

Библиографический список

1. Наац И.Э., Наац В.И., Ярцева Е.П. Построение обобщенных производных для суммируемых функций на основе их сингулярных интегралов и исследование регуляризации их сходимости / Естественные и технические науки в современном мире: сборник научных статей по итогам XII международной научно-практической конференции (г. Москва, 10 февраля 2017 г.). М.: Научный журнал «CHRONOS». 2017. С. 54–62.
2. Наац И.Э., Наац В.И., Рыскаленко Р.А., Ярцева Е.П. Операторы потенциального типа в задачах прикладного анализа / Наука. Инновации. Технологии: Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета. Ставрополь, 2017. № 3. С. 42–60.
3. Наац, И.Э., Ярцева Е.П. Методы приближения суммируемых функций на основе интеграла Стилтеса применительно к задачам прикладного анализа / Наука. Инновации. Технологии: Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета. Ставрополь. 2016. №1. С. 33–46.
4. Наац И.Э. Метод численного решения краевой задачи для уравнения в частных производных с эмпирическими функциями на основе интегрального уравнения Фредгольма первого рода / И.Э. Наац, В.И. Наац, Р.А. Рыскаленко // Наука. Инновации. Технологии: Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета. Ставрополь. 2016. №3. С. 30–41.
5. Наац, В.И. Вычислительная модель для дифференциального уравнения с эмпирическими функциями на основе интегрального уравнения Фредгольма первого рода / В.И. Наац, И.Э. Наац, Р.А. Рыскаленко // Наука. Инновации. Технологии: Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета. Ставрополь. 2016. №2. С. 37–48.
6. Наац, В.И. Расчетно-аналитические модели для дифференциальных уравнений с приближенными данными на основе представления решения интегралами / В.И. Наац, И.Э. Наац, Р.А. Рыскаленко // Наука. Инновации. Технологии: Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета. Ставрополь. 2014. №4. С. 60–71.
7. Наац, И.Э. Метод решения некорректной задачи для дифференциального уравнения с приближенно заданными функциями на основе представления решения интегральными уравнениями / В.И. Наац, И.Э. Наац, Р.А. Рыскаленко // Наука. Инновации. Технологии: Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета. Ставрополь. 2015. №4. С. 16–31.
8. Тихонов, А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. М.: Физматлит. 1979. 288 с.
9. Данфорд, Н. Линейные операторы: общая теория / Н. Данфорд, Дж. Т. Шварц. М.: Изд-во иностранной литературы, 1962. 427 с.

References

1. Naats I.E., Naats V.I., Yartseva E.P. Construction of generalized derivatives for summable functions on the basis of their singular integrals and research of their convergence regularization / Natural and technical Sciences in the modern world: collection of scientific articles on the results of the XII international scientific – practical conference (Moscow, February 10, 2017). M.: Scientific journal «CHRONOS». 2017. P. 54–62.
2. Naats I.E., Naats V.I., Ruskalenko R.A., Yartseva E.P. Operators of potential type in problems of applied analysis / Science. Innovations. Technologies: scientific journal of the North Caucasus Federal University. Stavropol, 2017. № 3. P. 42–60.
3. Naats I.E., Yartseva E.P. Methods of approximation of integrable functions based on the Stieltjes integral with respect to problems in applied analysis. / Science. Innovations. Technologies: scientific journal of the North Caucasus Federal University. Stavropol. 2016. №1. P. 33–46.
4. Naats I.E. Method for numerical solution of boundary value problems for partial differential equations with the empirical functions on the basis of the integral Fredholm equation of the first kind / I.E. Naats, V.I. Naats, A.R. Ruskalenko // Science. Innovations. Technologies: scientific journal of the North Caucasus Federal University. Stavropol. 2016. №3. P. 30–41.
5. Naats V.I. Computational model for the differential equation with the empirical functions on the basis of the integral Fredholm equation of the first kind / V.I. Naats, I.E. Naats, R.A. Ruskalenko // Science. Innovations. Technologies: scientific journal of the North Caucasus Federal University. Stavropol. 2016. №. 2. P. 37–48.
6. Naats V.I. Calculation and analytical models for differential equations with approximate data on the basis of the submission of the decision integrals / V.I. Naats, I.E. Naats, R.A. Ruskalenko // Science. Innovations. Technologies: scientific journal of the North Caucasus Federal University. Stavropol. 2014. № 4. P. 60–71.
7. Naats I.E. the method of solving the ill-posed problem for a differential equation with approximately given functions based on the representation of the solution of integral equations / V.I. Naats, I.E. Naats, R.A. Ruskalenko // Science. Innovations. Technologies: scientific journal of the North Caucasus Federal University. Stavropol. 2015. №4. P. 16–31.
8. Tikhonov A.N. Methods of solving ill-posed problems / A.N. Tikhonov, V.Y. Arsenin. M.: Fizmatlit. 1979. 288 p.
9. Dunford N. Linear operators: General theory / H. Dunford, J.T. Schwartz. Moscow: publishing House of foreign literature, 1962. 427 p.

Об авторах

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

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

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

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

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

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

01.01.02

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ, ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
И ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

УДК 517.95+534.141

Чиркунов Ю. А.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), г. Новосибирск, Россия
chr101@mail.ru

АВТОМОДЕЛЬНЫЕ ВОЛНЫ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ ВЕСТЕРВЕЛЬТА ПРИ НАЛИЧИИ ДИССИПАЦИИ

Введение:

Многие математические модели механики сплошной среды сформулированы в виде линейных и квазилинейных дифференциальных уравнений. Симметричный анализ этих моделей является одним из наиболее эффективных способов получения количественных и качественных характеристик описываемых ими физических процессов. Актуальность исследования модели Вестервельта обусловлена использованием этой модели для расчета параметрических антенн сонаров и для расчета ультразвуковых полей в медицине.

Материалы и методы исследований:

Методами исследований являются: групповой (симметричный) анализ дифференциальных уравнений и общие методы математической физики.

Результаты исследований и их обсуждение:

Исследуется важная для приложений трехмерная модель Вестервельта нелинейной гидроакустики при наличии диссипации. Установлено, что среди инвариантных подмоделей ранга 1 эта модель имеет только три типа существенно различных (не связанных точечными преобразованиями) автомодельных волн. К ним относятся: автомодельная волна, распространяющаяся вдоль одной из осей координат, плоская автомодельная круговая волна и автомодельная сферически-симметричная волна. Получены интегро-дифференциальные уравнения, описывающие эти автомодельные волны. При некоторых условиях установлены существование и единственность таких автомодельных волн.

Выводы:

В нелинейной гидроакустике модель Вестервельта используется для исследования ультразвуковых полей, генерируемых мощными излучателями. Для трехмерной модели Вестервельта при наличии диссипации установлено, что среди инвариантных подмоделей ранга 1 эта модель имеет только три типа существенно различных (не связанных точечными преобразованиями) автомодельных волн. Исследованы эти волны. Наличие произвольных постоянных в полученных интегро-дифференциальных уравнениях, описывающих эти автомодельные волны открывает новые возможности для изучения других (отличных от исследованных в статье) имеющих физический смысл краевых задач. Практическая значимость этого исследования обусловлена использованием модели Вестервельта для расчета параметрических антенн сонаров и для расчета ультразвуковых полей в медицине.

Ключевые слова:

нелинейная гидроакустика, модель Вестервельта при наличии диссипации, автомодельные волны.

Chirkunov Yu. A. Novosibirsk state University of architecture and civil engineering,
Novosibirsk, Russia

SELF-SIMILAR WAVES OF THREE- DIMENSIONAL MODEL OF WESTERVELT IN THE EXISTENCE OF DISSIPATION

Introduction: Many mathematical models of continuum mechanics are formulated as linear and quasilinear differential equations. Symmetric analysis of these models is one of the most effective ways to obtain the quantitative and qualitative characteristics of the physical processes described by them. The relevance of the study of the Westervelt model is due to the use of this model for calculating parametric sonar antennas and for calculating ultrasonic fields in medicine

Materials and research methods: Research methods are: group (symmetry) analysis of differential equations and general methods of mathematical physics.

Research results and their discussion: The three-dimensional Westervelt model of nonlinear hydroacoustics, which is important for applications, is investigated in the presence of dissipation. It has been established that among the invariant submodels of rank 1, this model has only three types of essentially different (not connected by point transformations) self-similar waves. These include the self-similar wave propagating along one of the axes of coordinates, the flat self-similar circular wave and the self-similar spherically symmetric wave. Integro-differential equations describing these self-similar waves are obtained. Under some conditions, the existence and uniqueness of such self-similar waves are established.

Conclusions: In nonlinear hydroacoustics, the Westervelt model is used to study ultrasonic fields generated by high-power radiators. For the Westervelt three-dimensional model in the presence of dissipation, it was found that among the invariant submodels of rank 1 this model has only three types of essentially different (not connected by point transformations) self-similar waves. These waves are investigated. The presence of arbitrary constants in the obtained integro-differential equations describing these self-similar waves opens up new possibilities for studying other boundary value problems (other than those studied in the article) that have a physical meaning. The practical significance of this study is due to the use of the Westervelt model for calculating parametric sonar antennas and for calculating ultrasonic fields in medicine.

Keywords: nonlinear underwater acoustics, Westervelt model in the presence of dissipation, self-similar 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 моделей является одним из наиболее эффективных способов получения количественных и качественных характеристик описываемых ими физических процессов.

В нелинейной гидроакустике модель Вестервельта [1 – 11] 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 антенн сонаров и для расчета ультразвуковых полей в медицине.

В настоящей работе исследуется модель Вестервельта при наличии диссипации. Эта модель задается следующим уравнением Вестервельта [1 – 10]:

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

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

С помощью переменных

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

уравнение (1) записывается в следующем виде

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

Уравнение (3) является основным объектом дальнейшего исследования.

Материалы и методы исследований

В настоящей работе исследуются автомодельные волны трехмерной модели Вестервелта нелинейной гидроакустики при наличии диссипации. Получены три типа существенно различных (не связанных точечными преобразованиями) автомодельных волн. К ним относятся: автомодельная волна, распространяющаяся вдоль одной из осей координат, плоская автомодельная круговая волна и автомодельная сферически-симметричная волна. Получены интегро-дифференциальные уравнения, описывающие эти автомодельные волны. При некоторых условиях установлены существование и единственность таких автомодельных волн. Методами исследований являются: групповой (симметричный) анализ дифференциальных уравнений [12] и общие методы математической физики.

Результаты исследований и их обсуждение

1. Групповое свойство

Основная группа Ли преобразований уравнения (3) определяется по стандартному алгоритму [12] и порождается операторами:

$$\begin{aligned} X_0 &= \partial_t, \quad X_1 = \partial_x, \quad X_2 = \partial_y, \quad X_3 = \partial_z, \\ R &= 2t\partial_t + 3x\partial_x + 3y\partial_y + 3z\partial_z - (2p-1)\partial_p, \\ Z_1 &= y\partial_z - z\partial_y, \quad Z_2 = z\partial_x - x\partial_z, \quad Z_3 = x\partial_y - y\partial_x, \end{aligned} \quad (4)$$

Алгебра Ли с базисом (4) является прямой суммой фактора Леви с базисом

Z_1, Z_2, Z_3 и ее радикала с базисом X_0, X_1, X_2, X_3, R .

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. Каждой подалгебре этой оптимальной системы соответствует подгруппа основной группы уравнения (3), порожденная этой подалгеброй. Из необходимых условий существования инвариантных решений [12] следует, что все не связанные точечными преобразованиями инвариантные решения ранга 1 уравнения (3), суть решения, инвариантные относительно некоторых трехпараметрических и четырехпараметрических подгрупп основной группы уравнения (3). Автомодельные волны описываются решениями, инвариантными относительно подгрупп, базис алгебры Ли которых не содержит оператор переноса по времени X_0 и содержит оператор, зависящий от оператора растяжения R . Действие группы внутрен-

них автоморфизмов основной алгебры Ли (4) на эту алгебру показывает, что множество таких трехпараметрических и четырехпараметрических подгрупп с точностью до преобразований группы внутренних автоморфизмов основной алгебры Ли (4) исчерпывается следующими подгруппами:

$$\langle R + \alpha Z_3, X_1, X_2 \rangle,$$

$$\langle R, X_3, Z_3 \rangle,$$

$$\langle R, X_1, X_2, Z_3 \rangle,$$

$$\langle R, Z_1, Z_2, Z_3 \rangle,$$

где α — произвольная вещественная постоянная.

2. Автомодельные волны

Применение критерия инвариантности функции относительно группы Ли преобразований [12] дает универсальный инвариант каждой подгруппы оптимальной системы подгрупп в пространстве $R^5(t, x, p)$. Знание универсального инварианта подгруппы позволяет получить общий вид решения, инвариантного относительно этой подгруппы. Решение, инвариантное относительно подгруппы $\langle R + \alpha Z_3, X_1, X_2 \rangle$, и решение, инвариантное относительно подгруппы $\langle R, X_1, X_2, Z_3 \rangle$, совпадают. Оно описывает автомодельную волну, распространяющуюся вдоль оси Oz . Это решение имеет вид

$$p = z^{-\frac{2}{3}} q(\xi) + \frac{1}{2}, \quad \xi = tz^{-\frac{2}{3}}. \quad (5)$$

Подстановка (5) в уравнение (3) дает фактор уравнение для функции $q(\xi)$

$$q''' + \left(2q + \frac{4}{9} \xi^2 \right) q'' + 2q'^2 + 2\xi q' + \frac{10}{9} q = 0. \quad (6)$$

Уравнение (6) приводится к интегро-дифференциальному уравнению:

$$q'(\xi) + q^2(\xi) + \frac{4}{9} \xi^2 q(\xi) = c_2 + c_1 (\xi - \xi_0) - \frac{2}{9} \int_{\xi_0}^{\xi} \eta q(\eta) d\eta, \quad (7)$$

где $\xi_0 = t_0 z_0^{-\frac{2}{3}}$; c_1, c_2, t_0, z_0 —

произвольные вещественные постоянные.

Наличие произвольных постоянных в интегро-дифференциальном уравнении (7) позволяет определить автомодельную волну, для которой в начальный момент времени $t_0 \geq 0$ в фиксированной точке $z_0 \neq 0$ заданы давление, скорость и ускорение его изменения:

$$p(t_0, z_0) = p_0, \quad \frac{\partial p}{\partial t}(t_0, z_0) = p_1, \quad \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}(t_0, z_0) = p_2, \quad (8)$$

где $p_0 \geq 0, p_1, p_2$ – произвольные вещественные постоянные.

В этом случае c_1, c_2 определяются по формулам

$$c_1 = z_0^2 p_2 + p_1 \left(\frac{4}{9} t_0^2 + z_0^2 (2p_0 - 1) \right) + \frac{5}{9} t_0 (2p_0 - 1),$$

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

С помощью новой неизвестной функции

$$w = w(\xi) = q'(\xi) + q^2(\xi) + \frac{4}{9} \xi^2 q(\xi)$$

уравнение (6) записывается в виде эквивалентной системы

$$q' = w - q^2 - \frac{4}{9} \xi^2 q, \quad w' = c_1 - \frac{2}{9} \xi u, \quad (10)$$

для которой условия (8) принимают вид

$$q(\xi_0) = z_0^{\frac{2}{3}} \left(p_0 - \frac{1}{2} \right), \quad w(\xi_0) = z_0^{\frac{4}{3}} \left(p_1 + \left(p_0 - \frac{1}{2} \right)^2 \right) + \frac{2}{9} t_0^2 z_0^{-\frac{2}{3}} (2p_0 - 1). \quad (11)$$

Ввиду гладкости правых частей системы (10) в окрестности точки $(\xi_0, q(\xi_0), w(\xi_0))$, решение задачи Коши (10), (11) существует и единственно в окрестности точки ξ_0 . Следовательно, если константы c_1, c_2 заданы формулами (9), то в окрестности точки ξ_0 существует единственное решение нелинейного интегро-дифференциального уравнения (7). Подстановка этого решения в формулу (5) дает автомодельную волну, распространяющуюся вдоль оси Oz и удовлетворяющую начальным условиям (8).

Аналогично устанавливается, что в окрестности точки

$(t_0, z_0), (t_0 > 0, z_0 \neq 0)$ существует единственная автомодельная волна, распространяющаяся вдоль оси Oz и удовлетворяющая условиям

$$p(t_0, z_0) = p_0, \quad \frac{\partial p}{\partial z}(t_0, z_0) = p_3, \quad \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}(t_0, z_0) = p_4,$$

где $p_0 \geq 0, p_3, p_4$ – произвольные вещественные постоянные. Эта волна определяется по формулам (5), (7) при

$$c_1 = z_0^2 \left(\frac{9z_0^2}{4t_0^2} p_4 + \left(\frac{27z_0}{4t_0^2} - \frac{2t_0}{3z_0} - \frac{3z_0}{2t_0} (2p_0 - 1) \right) p_3 + \left(\frac{1}{t_0^2} + \frac{t_0}{3z_0^2} - \frac{1}{2t_0} (2p_0 - 1) \right) (2p_0 - 1) \right),$$

$$c_2 = z_0^{\frac{4}{3}} \left(-\frac{3z_0}{2t_0} p_3 + \left(\frac{2t_0^2}{9z_0^2} - \frac{1}{2t_0} \right) (2p_0 - 1) + \frac{1}{4} (2p_0 - 1)^2 \right).$$

Решение, инвариантное относительно подгруппы $\langle R, X_3, Z_3 \rangle$, описывает плоскую автомодельную круговую волну. Это решение имеет вид

$$p = r^{-\frac{2}{3}} q(\xi) + \frac{1}{2}, \quad \xi = tr^{-\frac{2}{3}}, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (12)$$

Из фактор-уравнения следует, что функция $q(\xi)$ является решением следующего интегро-дифференциального уравнения:

$$q'(\xi) + q^2(\xi) + \frac{4}{9} \xi^2 q(\xi) = c_4 + c_3(\xi - \xi_0) + \frac{4}{9} \int_{\xi_0}^{\xi} \eta q(\eta) d\eta, \quad (13)$$

где $\xi_0 = t_0 r_0^{-\frac{2}{3}}, \quad r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2};$

c_3, c_4, t_0, x_0, y_0 – произвольные вещественные постоянные.

Аналогично автомодельной волне (5) устанавливается, что, если в начальный момент времени $t_0 > 0$ на фиксированной окружности $r = r_0 \neq 0$ заданы давление, скорость и ускорение его изменения

$$p(t_0, r_0) = p_0, \quad \frac{\partial p}{\partial t}(t_0, r_0) = p_5, \quad \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}(t_0, r_0) = p_6 \quad (14)$$

где $p_0 \geq 0, p_5, p_6$ – произвольные вещественные постоянные, то в окрестности этой окружности при t близких к t_0 существует единственная плоская автомодельная круговая волна, удовлетворяющая начальным условиям (14). Эта волна определяется по формулам (12), (13) при

$$c_3 = r_0^2 p_6 + p_5 \left((2p_0 - 1) r_0^2 + \frac{2}{9} t_0^2 \right) + \frac{2}{9} t_0 (2p_0 - 1),$$

$$c_4 = r_0^3 \left(p_5 + \left(p_0 - \frac{1}{2} \right)^2 \right) + \frac{2}{9} t_0^2 r_0^{-\frac{4}{3}} (2p_0 - 1)$$

– Решение, инвариантное относительно подгруппы

$\langle R, Z_1, Z_2, Z_3 \rangle$, описывает автомодельную сферически-симметричную волну. Это решение имеет вид

$$p = |x|^{-\frac{2}{3}} q(\xi) + \frac{1}{2}, \quad \xi = t |x|^{-\frac{2}{3}}. \quad (15)$$

Из фактор-уравнения следует, что функция $q(\xi)$ является решением следующего интегро-дифференциального уравнения:

$$q'(\xi) + q^2(\xi) + \frac{4}{9} \xi^2 q(\xi) = c_6 + c_5(\xi - \xi_0) + \frac{10}{9} \int_{\xi_0}^{\xi} \eta q(\eta) d\eta, \quad (16)$$

где $\xi_0 = t_0 |x_0|^{-\frac{2}{3}}, \quad |x_0| = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2};$

$c_5, c_6, t_0, x_0, y_0, z_0,$ –

произвольные вещественные постоянные.

Аналогично автомодельной волне (5) устанавливается, что, если в начальный момент времени $t_0 > 0$ на фиксированной сфере $|x| = |x_0| \neq 0$ заданы давление и его радиальные производные

$$p(t_0, \mathbf{x}_0) = p_0, \quad \frac{\partial p}{\partial |\mathbf{x}|}(t_0, \mathbf{x}_0) = p_7, \quad \frac{\partial^2 p}{\partial |\mathbf{x}|^2}(t_0, \mathbf{x}_0) = p_8, \quad (17)$$

где $t_0 \geq 0$, p_7, p_8 – произвольные вещественные постоянные, то в окрестности этой сферы при t близких к t_0 существует единственная автомодельная сферически-симметричная волна, удовлетворяющая начальным условиям (17). Эта волна определяется по формулам (15), (16) при

$$c_5 = |\mathbf{x}_0|^2 \left(\frac{9|\mathbf{x}_0|^2}{4t_0^2} p_8 + \left(\frac{27|\mathbf{x}_0|}{4t_0^2} - \frac{2t_0}{3|\mathbf{x}_0|} - \frac{3|\mathbf{x}_0|}{2t_0} (2p_0 - 1) \right) p_7 + \left(\frac{1}{t_0^2} - \frac{t_0}{3|\mathbf{x}_0|^2} - \frac{1}{2t_0} (2p_0 - 1) \right) (2p_0 - 1) \right),$$

$$c_6 = |\mathbf{x}_0|^{\frac{4}{3}} \left(-\frac{3|\mathbf{x}_0|}{2t_0} p_7 + \left(\frac{2t_0^2}{9|\mathbf{x}_0|^2} - \frac{1}{2t_0} \right) (2p_0 - 1) + \frac{1}{4} (2p_0 - 1)^2 \right).$$

Выводы

В нелинейной гидроакустике модель Вестервельта [1–11] 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 антенн сонаров и для расчета ультразвуковых полей в медицине.

Для трехмерной модели Вестервельта нелинейной гидроакустики при наличии диссипации установлено, что среди инвариантных подмоделей ранга 1 эта модель имеет только три типа существенно различных (не связанных точечными преобразованиями) автомодельных волн. К ним относятся: автомодельная волна, распространяющаяся вдоль одной из осей координат, плоская автомодельная круговая волна и автомодельная сферически-симметричная волна. Получены интегро-дифференциальные уравнения, описывающие эти автомодельные волны. При некоторых условиях установлены существование и единственность таких автомодельных волн.

Наличие произвольных постоянных в полученных интегро-дифференциальных уравнениях открывает новые возможности для изучения других (отличных от приведенных в статье) имеющих физический смысл краевых задач.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета.

Библиографический список

1. Westervelt P. Parametric acoustic array // J. Acoustic Soc. Am., 1963, vol. 35(4), pp. 535–537.
2. Novikov B.K., Rudenko V. I., Timoshenko V. I. Nonlinear underwater acoustics. New York, AIP-Press. 1987. 262 p.
3. V. A. Voronin, S. P. Tarasov, V. I. Timoshenko. Nonlinear acoustics. New York, AIP-Press. 1995. 314 p.
4. Nonlinear acoustics. Ed. By M. Hamilton and D. Blackstock. London: Academic. 1998.
5. Ostashev V.E. Acoustic in moving inhomogeneous media. London: E&Fn Spon. 1997. 259 p.
6. Nachev S., Cathignol D., Tjøtta J.N., Berg A.M., Tjøtta S. Investigation of a high intensity sound beam from a plane transducer. Experimental and theoretical results // J. Acoust. Soc. Am., 1995, vol. 98, pp. 2303–2323.
7. Tavakkoli J., Cathignol D., Souchon R., Sapozhnikov O.A. Modeling of pulsed finite amplitude focused sound beams in time domain // J. Acoust. Soc. Am., 1998, vol. 104, pp. 2061–2072.
8. Lee Y.S. and Hamilton M.F. Time-domain modeling of pulsed finite amplitude sound beams // J. Acoust. Soc. Amer., 1995, vol. 97(2), pp. 906–917.
9. Averkiou M.A., and Hamilton M.F. Nonlinear distortion of short pulses radiated by plane and focused circular pistons // J. Acoust. Soc. Amer., 1997, vol. 102(5), pp. 2539–2548.
10. Sokka S.D., King R., and Hynynen K. MRI-guided gas bubble enhanced ultrasound heating in in vivo rabbit thigh // Phys. Med. Biol., 2003, vol. 48, pp. 223–241.
11. Чиркунов Ю. А. Подмодели трехмерной модели Вестервелта при отсутствии диссипации // Ж.: Наука. Инновации. Технологии. 2018, вып 1. С. 81–94.
12. Чиркунов Ю. А., Хабиров С. В. Элементы симметричного анализа дифференциальных уравнений механики сплошной среды. Новосибирск: НГТУ. 2012. 659 с.

References

1. Westervelt P. Parametric acoustic array // J. Acoustic Soc. Am., 1963, vol. 35(4), pp. 535–537.
2. B. K. Novikov, V. I. Rudenko, V. I. Timoshenko. Nonlinear underwater acoustics. AIP-Press, New York, 1987. 262 p.
3. V. A. Voronin, S. P. Tarasov, V. I. Timoshenko. Nonlinear acoustics. AIP-Press, New York, 1995. 314 p.
4. Nonlinear acoustics. Ed. By M. Hamilton and D. Blackstock. London: Academic. 1998.
5. Ostashev V.E. Acoustic in moving inhomogeneous media. London: E&Fn Spon. 1997. 259 p.
6. Nachev S., Cathignol D., Tjøtta J.N., Berg A.M., Tjøtta S. Investigation of a high intensity sound beam from a plane transducer. Experimental and theoretical results // J. Acoust. Soc. Am., 1995, vol. 98, pp. 2303–2323.

7. Tavakkoli J., Cathignol D., Souchon R., Sapozhnikov O.A. Modeling of pulsed finite amplitude focused sound beams in time domain // J. Acoust. Soc. Am., 1998, vol. 104, pp. 2061–2072.
8. Lee Y.S. and Hamilton M.F. Time-domain modeling of pulsed finite amplitude sound beams // J. Acoust. Soc. Amer., 1995, vol. 97(2), pp. 906–917.
9. Averkiou M.A., and Hamilton M.F. Nonlinear distortion of short pulses radiated by plane and focused circular pistons // J. Acoust. Soc. Amer., 1997, vol. 102(5), pp. 2539–2548.
10. Sokka S.D., King R., and Hynynen K. MRI-guided gas bubble enhanced ultrasound heating in vivo rabbit thigh // Phys. Med. Biol., 2003, vol. 48, pp. 223–241.
11. Chirkunov Yu. A. Pod modeli trekhmernoy modeli Westervelta pri otсутstvii dissipatsii (Three-dimensional model submodels Westervelt in the absence of dissipation) // J. Nauka. Innovatsii. Tekhnologii. 2018, no 1, pp. 81–94.
12. 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.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета.

Acknowledgments: The study was carried out with the financial support of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering.

Об авторе

Чиркунов Юрий Александрович, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой высшей математики Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета. Тел.: (383) 2-66-2758. E-mail: chr101@mail.ru.

About the author

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.

01.04.14

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

УДК 536.242

Симоновский А.Я. Ставропольский государственный аграрный университет,
г. Ставрополь, Россия
simonovchki@mail.ru

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛЯХ ПРИ УПРАВЛЯЕМОЙ ЗАКАЛКЕ В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

Введение:

в данной работе изучаются структуры и связанные с ними механические свойства ряда инструментальных сталей, подвергнутых закалочному охлаждению в магнитной жидкости с различным содержанием магнитной фазы при воздействии постоянного магнитного поля разной интенсивности. Возможность проведения в магнитной жидкости управляемой закалки определяется зависимостью интенсивности охлаждения от состава жидкости, величины и степени неоднородности магнитного поля, создаваемого вблизи охлаждаемой поверхности. Различная интенсивность охлаждения обуславливает различные механизмы фазовых превращений в стали в процессе закалки.

Материалы и
методы:

при выборе объекта исследования – образцов инструментальных сталей – исходили из закономерностей фазовых превращений, происходящих в сталях при различной интенсивности охлаждения. Поставленная цель достигалась выбором марок сталей, характеризующихся различной степенью устойчивости переохлажденного аустенита и, тем самым, различной величиной критической скорости закалки – скорости охлаждения, обеспечивающей только бездиффузионный механизм превращения аустенита.

Результаты
исследования:

впервые найдено, что путем изменения интенсивности магнитного поля при закалке в магнитной жидкости образцов малых размеров из сталей с пониженной устойчивостью переохлажденного аустенита можно управлять их твердостью.

Обсуждение и
заключения:

результаты исследований позволили выявить новое перспективное направление при использовании магнитной жидкости в качестве закалочной среды – проведение закалочного охлаждения.

Ключевые слова:

магнитная жидкость, теплообмен, гидродинамика, магнитное поле, закалка стали.

Simonovsky A. Ya. Stavropol State Agrarian University", Stavropol, Russia
simonovchkiij@mail.ru

PHASE TRANSFORMATIONS IN STEELS UNDER CONTROLLED QUENCHING IN A MAGNETIC FLUID

Introduction: In this paper we study structures and related mechanical properties of a number of tool steels subjected to quenching cooling in a magnetic fluid with different contents of the magnetic phase under the action of a constant magnetic field of different intensity. The possibility of controlled quenching in a magnetic fluid is determined by the dependence of the cooling intensity on the fluid composition, the magnitude and degree of inhomogeneity of the magnetic field created near the cooled surface. The different intensity of cooling causes different mechanisms of phase transformations in steel during the quenching process.

Materials and methods: when choosing the object of research – samples of tool steels – proceeded from the regularities of phase transformations occurring in steels with different cooling intensities. The goal was achieved by the choice of steel grades characterized by varying degrees of stability of the supercooled austenite and, thus, a different value of the critical quenching rate, the cooling rate, which ensures only the diffusionless mechanism of austenite transformation.
Results of the study: for the first time it was found that by changing the intensity of the magnetic field during quenching in samples of small sizes of steels with lowered stability of supercooled austenite, their hardness can be controlled.

Discussion and conclusions: the results of the research made it possible to identify a new promising direction when using a magnetic fluid as a quenching medium – performing hardening cooling.

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

Введение

В целом ряде работ [1...6] было показано, что магнитная жидкость может служить охлаждающей и закалочной средой в процессах интенсивного охлаждения нагретых до высоких температур твердых тел. Возможности управлять интенсивностью охлаждения при закалке обусловлены существенным влиянием магнитного поля на явления тепло-и массопереноса при кипении магнитной жидкости. Как будет показано в данной работе при определенных размерах закаливаемых образцов в магнитных полях в широком интервале их напряженности удастся добиваться как бездиффузионного (мартенситного) так и диффузионного (перлитного) превращений при интен-

сивном охлаждении стальных образцов в магнитных жидкостях, а так же промежуточного (бейнитного) превращения.

Материалы и методы исследования

При выборе объекта исследования – образцов инструментальных сталей – исходили из закономерностей фазовых превращений, происходящих в сталях при различной интенсивности охлаждения. Высокотемпературной фазой стали является аустенит [7]. При охлаждении стали до температур, ниже критических, аустенит претерпевает превращение. В зависимости от скорости охлаждения превращение аустенита с образованием окончательных структур может происходить при разных температурах. В результате медленного охлаждения превращение аустенита происходит при высоких температурах диффузионным путем, и окончательные структуры характеризуются высокой степенью равновесности. По мере увеличения скорости охлаждения диффузионные процессы в стали успевают происходить, однако, структура продуктов распада аустенита, оставаясь качественно подобной, характеризуется повышением степени дисперсности – сорбит и троостит. При закалочном охлаждении с высокими скоростями диффузионные процессы в стали произойти не успевают, поэтому перестройка гранецентрированной кубической решетки аустенита (Fe) в объемноцентрированную решетку феррита (Fe) происходит сдвиговым путем с одновременной фиксации углерода в решетке Fe. В результате образуется качественно новая фаза – пересыщенный твердый раствор – мартенсит. При выборе номенклатуры сталей для проведения экспериментов по закалке в магнитной жидкости основывались на стремлении обнаружить сталь, для которой интервал изменения скорости охлаждения в магнитной жидкости, обеспечиваемый наложением магнитного поля, охватывал бы область, характеризующуюся как перлитным – диффузионным, так и мартенситным – бездиффузионным превращением переохлажденного аустенита. Тем самым представлялось возможным наиболее полно оценить структурную чувствительность эффектов охлаждения в магнитной жидкости, достигаемых наложением магнитного поля.

Поставленная цель достигалась выбором марок сталей, характеризующихся различной степенью устойчивости переохлажденного аустенита и, тем самым, различной величиной критической скорости закалки – скорости охлаждения, обеспечивающей только бездиффузионный механизм превращения аустенита.

Применяли образцы из углеродистых сталей с различным содержанием углерода. Исследовались доэвтектоидная сталь У8 и эвтектоидная сталь У8. Образцы для анализа выполнялись цилиндрической формы диаметром 10 мм, высотой 35 мм. Выбор образцов достаточно малого диаметра был сделан по ряду причин. С одной стороны, руководствовались стремлением сопоставить результаты изучения интенсивности охлаждения в магнитной жидкости

в условиях наложения магнитного поля, полученные в работах [1, 2, 3], с данными по изучению структуры и твердости образцов, закаленных в магнитной жидкости в полях различной интенсивности.

Для достижения критических скоростей закалки в слабоохлаждающей среде размер образцов должен быть мал. Наконец, при малых размерах образца можно ожидать, что обнаруженная ранее неоднородность охлаждения различных участков поверхности цилиндра [2..5] не приведет к существенной неоднородности структуры и свойств образцов.

Образцы для закалки устанавливались на немагнитном направляющем штоке. Нагрев образцов с 10-минутной выдержкой для завершения превращений проводился в трубчатой электропечи. Температуры нагрева разных марок сталей под закалку выбирались в соответствии с рекомендациями [8, 9] и приведены в таблице 1. Там же указаны температуры критических точек этих сталей.

Охлаждение образцов осуществлялось быстрым вертикальным погружением в центр объема магнитной жидкости, заполнявшей немагнитный цилиндрический контейнер, расположенный в полюсах электромагнита.

В качестве показателя механических свойств закаленных образцов определялась их твердость. Измерение твердости проводилось на приборе Роквелла по шкале С в трех сечениях: центральном и двух крайних, расположенных на расстоянии 3-5 мм от торцов. Значение твердости и характеристики рассеяния результатов измерений принимались по всем замерам для серии образцов, обработанных при одном режиме. Доверительный интервал определялся при доверительной вероятности 0,95.

Характер полученных структур изучали путем приготовления микрошлифов по методике, описанной в [10], и исследования их в светлом поле горизонтального металлографического микроскопа МИМ-8М при увеличении 900X.

Рентгеноструктурный анализ проводился на рентгеноструктурном дифрактометре ДРОН-2,0 в излучении железного анода. Длина волны излучения $1,936 \text{ \AA}$ при рабочем напряжении 25 кВ и токе 24 мА. Диаметр диафрагмы на трубке составлял 2 мм. Применяемый фильтр – стандартный марганце-

Таблица 1.

ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ПОД ЗАКАЛКУ И КРИТИЧЕСКИЕ ТОЧКИ
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАРОК СТАЛЕЙ
Table 1. Temperatures for quenching and critical points used steel grades

Марка стали	Температура нагрева под закалку	Температура критических точек сталей [8, 9], °C	
		Ac1	Ac3
Сталь 50	880	725	760
У8	820	720	740

вый. Регистрация излучения проводилась сцинтилляционным счетчиком. Измерительная щель на счетчике составляла 1 мм. Запись показаний счетчика осуществлялась потенциометром КСП-4. Обработка рентгенограмм проводилась по методике, изложенной в [10].

Результаты исследования и их обсуждения

Твердость и структура доэвтектоидной стали после закалки в магнитной жидкости. В результате предварительных экспериментов было показано, что наилучшие результаты получаются при закалке образцов в растворах магнитной жидкости с объемной долей магнитной фазы в пределах $0,0023 \leq \varphi_m \leq 0,0374$. Это связано с благоприятным сочетанием для указанных растворов магнитных и теплофизических свойств, определяющих длительность и интенсивность пленочного и пузырькового режимов охлаждения. Для растворов с объемной долей магнитной фазы $\varphi_m > 0,0374$ охлаждение в режиме пленочного кипения распространяется до температур начала мартенситного превращения. Температура начала мартенситного превращения для выбранных марок сталей лежит в пределах 3000 С. На поверхности образцов визуально наблюдается значительный рост налета расслоившихся частиц магнитной фазы. За счет этого охлаждающая способность концентрированных растворов жидкости резко снижается. Растворы магнитной жидкости с объемной долей магнитной фазы $\varphi_m < 0,0023$ в значительной степени утрачивают магнитные свойства, что ослабляет влияние магнитного поля на процессы охлаждения. В то же время, в составе раствора, несмотря на значительное разбавление несущей жидкостью, остается достаточно большое количество поверхностно-активных веществ, присутствие которых и обуславливает низкую охлаждающую способность магнитной жидкости в сравнении с охлаждающей способностью несущей среды.

Низкая охлаждающая способность и слабое влияние магнитного поля на интенсивность охлаждения в растворах с $\varphi_m < 0,0023$ и $\varphi_m > 0,0374$ не позволяют эффективно проводить в них закалку и добиваться высокой твердости у закаленных образцов.

На рис. 1 приведены результаты измерения твердости образцов стали 50, закаленных в растворах магнитной жидкости с объемной долей магнитной фазы в полях различной интенсивности.

Видно, что наложение магнитного поля приводит к существенному увеличению твердости образцов. При закалке в растворах с объемной долей магнитной фазы $\varphi_m = 0,0294$ заметные изменения происходят уже в сравнительно малом по величине магнитном поле. Изменения носят скачкообразный характер. Однако, в связи с непрерывным изменением скорости охлаждения в магнитной жидкости, с ростом величины магнитного поля точки на графиках соединены непрерывными линиями. Следует отметить, что скачкообразный характер изменения твердости образцов при непрерывном

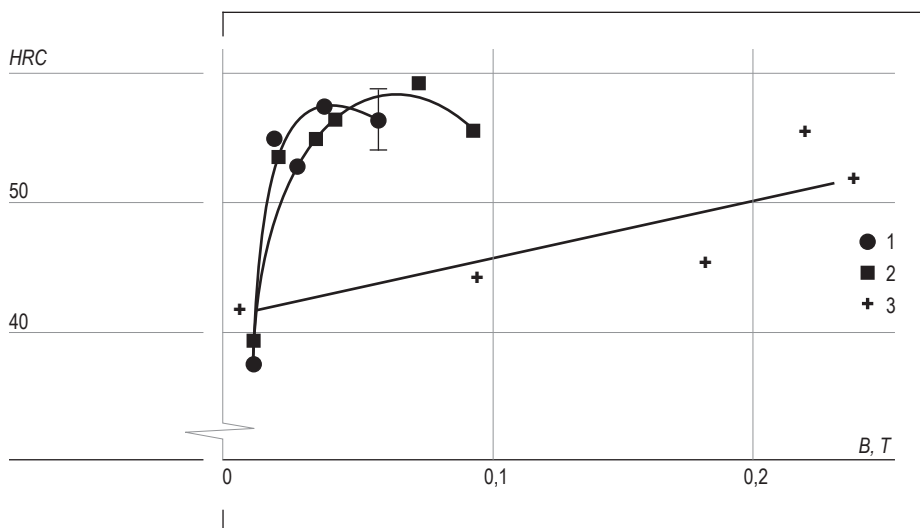


Рис. 1.

График зависимости твердости образцов из стали 50 от величины прикладываемого магнитного поля при закалке в магнитной жидкости с объемной долей магнитной фазы, φ_m : 1 – 0,0294; 2 – 0,0159; 3 – 0,0023.

Fig. 1. Graph of the hardness of samples from steel 50 as a function of the applied magnetic field when quenched in a magnetic fluid with a volume fraction of the magnetic phase φ_m : 1-0.0229; 2 – 0.0159; 3 – 0.0023.

изменении скорости охлаждения связан с отсутствием в применяемых сталях (сталь 50 и У8) промежуточного – бейнитного – превращения [7]. Существенные изменения твердости образцов при закалке в растворах магнитной жидкости с $\varphi_m = 0,0023$ происходят в значительном по величине магнитном поле. Максимум на кривых зависимости твердости образцов от величины прикладываемого магнитного поля обусловлен наличием максимума зависимости интенсивности охлаждения в магнитной жидкости в интервале температур мартенситного превращения (~ 3000 С) от величины приложенного магнитного поля.

На рис. 2 приведены фотографии микроструктур образцов из стали 50, подвергнутых закалке в магнитной жидкости с объемной долей магнитной фазы $\varphi_m = 0,0294$. Структура образцов, подвергнутых закалке в отсутствие магнитного поля (рис. 2а), состоит из примерно равной доли продуктов диффузионного и бездиффузионного превращения. На фотографии светлые области – мартенсит. Отчетливо видны характерные мартенситные иглы. Темные области – троостит. Анализ структуры подтверждается измерениями твердости образцов. Твердость 40 HRC соответствует полумартенситной зоне стандартной торцевой пробы для стали с содержанием углерода 0,5% [11]. На

рис. 2б приведена фотография микроструктуры стали 50, полученной при закалке в малом по величине магнитном поле. На фотографии темные области с большеугловыми границами – троостит. Области игольчатой формы на светлом фоне – мартенсит. Видно, что уже в малом магнитном поле для образцов применяемого размера скорость охлаждения близка к критической – превалирует бездиффузионное превращение переохлажденного аустенита. Дальнейшее увеличение магнитного поля уже не приводит к существенным изменениям в структуре образцов. На рис. 2 в приведена фотография микроструктуры стали 50, полученной при закалке в поле 0,0220 Т. Отчетливо видны характерные морфологические признаки мартенсита – игольчатая форма темных включений. Однако здесь еще могут наблюдаться отдельные области трооститных включений.

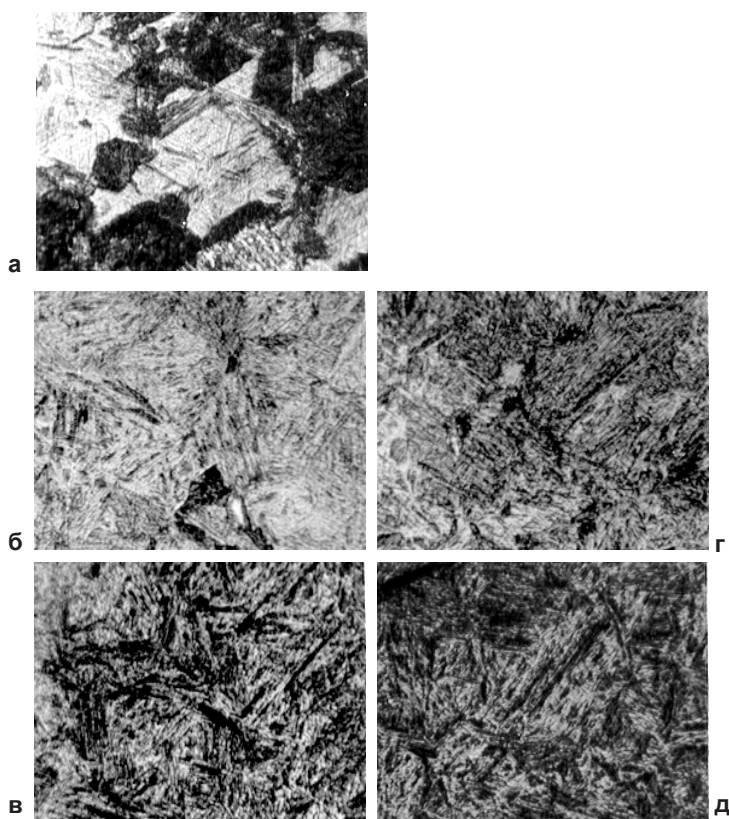


Рис. 2.

Микроструктуры стали 50 после закалки в магнитной жидкости ($\varphi_m = 0,0294$) в магнитных полях, Т: а – 0; б – 0,0140; в – 0,0220; г – 0,0370; д – 0,0525.

Fig. 2. Microstructures of steel 50 after quenching in a magnetic fluid ($\varphi_m = 0.0294$) in magnetic fields, T: a – 0; b – 0.0140; в – 0,0220; г – 0.0370; d – 0.0525.

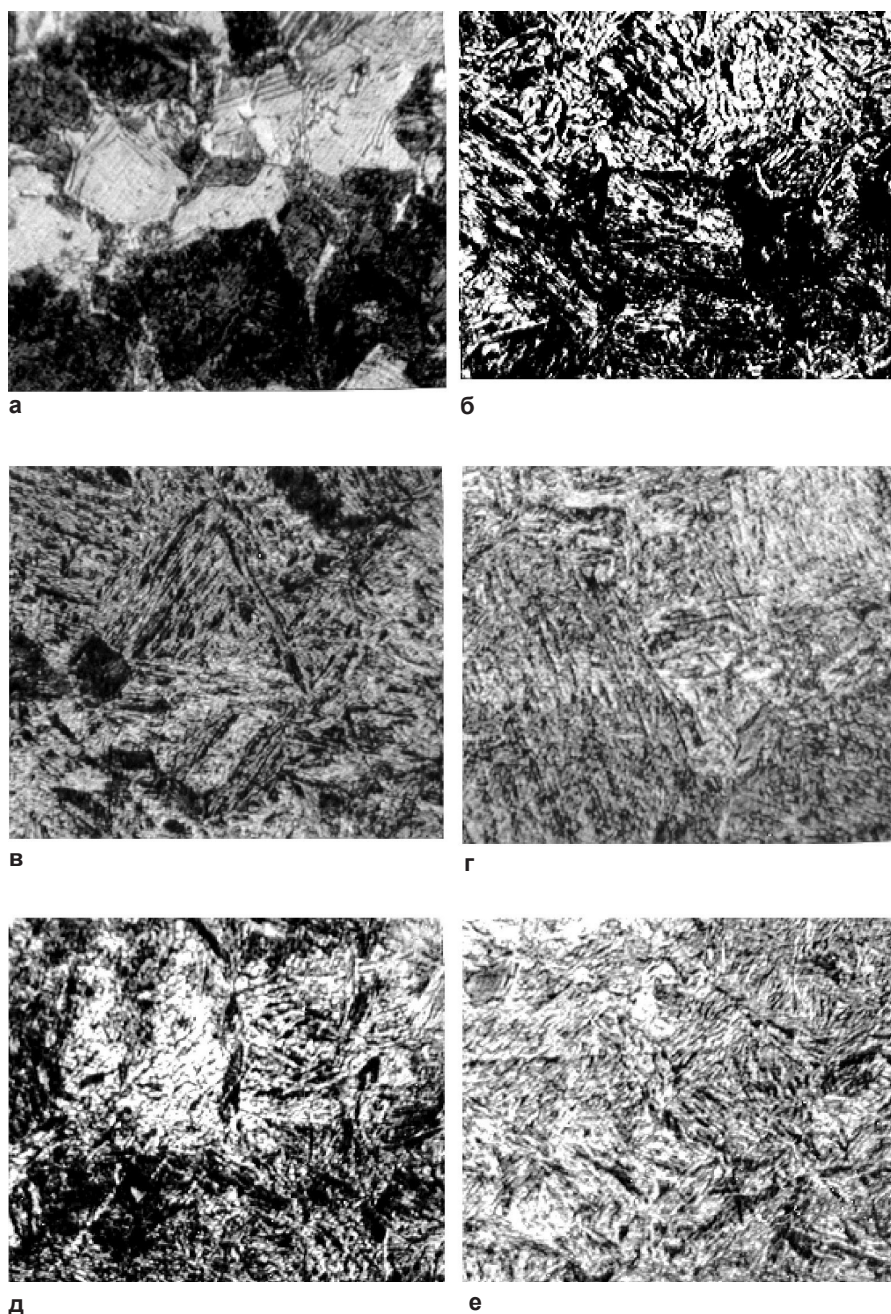


Рис. 3.

Микроструктуры стали 50 после закалки в магнитной жидкости ($\varphi_m = 0,0159$) в магнитных полях, Т: а – 0; б – 0,0220; в – 0,0370; г – 0,0525; д – 0,0680; е – 0,0980.

Fig. 3. Microstructures of steel 50 after quenching in a magnetic fluid ($\varphi_m = 0.0159$) in magnetic fields, T: а – 0; б – 0.0220; в – 0.0370; г – 0.0525; д – 0.0680; е – 0.0980.

На рис. 2 г и д приведены фотографии микроструктур образцов из стали 50, закаленных в магнитных полях 0,0370 Т и 0,0525 Т соответственно. Структура образцов в обоих случаях – мартенсит. На фотографиях видна игольчатая форма темных включений. Однако по мере увеличения магнитного поля наблюдается тенденция к укрупнению темных включений – характерный признак процессов отпуска. По-видимому, это следствие максимума во влиянии магнитного поля на интенсивность процесса охлаждения в магнитной жидкости в интервале температур мартенситного превращения. Снижение скорости охлаждения в интервале температур мартенситного превращения с ростом величины прикладываемого магнитного поля приводит к возможности протекания процессов низкотемпературного отпуска.

При закалочном охлаждении образцов из стали 50 в магнитной жидкости с объемной долей магнитной фазы $\varphi_m = 0,0159$ характер фазовых превращений аналогичен происходящим при закалке в жидкости с $\varphi_m = 0,0294$.

На рис. 3 а приведена фотография микроструктуры стали 50 после закалки в магнитной жидкости с $\varphi_m = 0,0159$ без магнитного поля. Сравнительный анализ твердости и морфологических особенностей структуры стали показывает, что здесь присутствуют продукты диффузионного и бездиффузионного превращения. При твердости 40 HRC для стали с содержанием углерода ~ 0,5 % в объеме образца присутствует ~ 50 % троостита и ~ 50 % мартенсита. На фотографии светлые области, в объеме которых видны иглообразные включения – мартенсит, темные области – троостит.

При закалке образцов в магнитном поле в жидкости с объемной долей магнитной фазы $\varphi_m = 0,0159$ удастся плавно управлять составом фаз в сталях. На рис. 3 б и 3 в приведены фотографии микроструктур стали 50 после закалки в магнитных полях 0,0220 Т и 0,0370 Т соответственно. На фотографии темные иглообразные образования на светлом фоне – мартенсит.

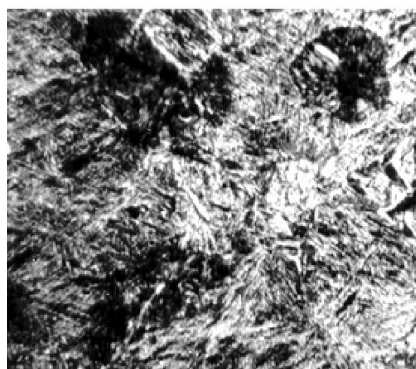
Темные включения с большеугловыми границами – троостит. В таком же по величине магнитном поле (0,0370 Т) при закалке в жидкости $\varphi_m = 0,0294$ трооститные включения практически отсутствовали. Дальнейшее увеличение магнитного поля при закалке в жидкости с объемной долей магнитной фазы $\varphi_m = 0,0159$ приводит к исчезновению в структуре продуктов диффузионного превращения. В подтверждение этого на рис. 3 г приведена фотография микроструктуры стали 50, полученная при закалке в магнитном поле 0,0525 Т. Видно, что структура стали – мартенсит. При закалке в магнитной жидкости с $\varphi_m = 0,0159$ в магнитном поле, большем 0,0525 Т, в структуре могут обнаруживаться последствия процессов отпуска. На рис. 3 д и е приведены фотографии микроструктур стали 50, полученных при закалке в магнитных полях 0,0680 и 0,980 Т соответственно. Видно, что игольчатые образования укрупнены. С уменьшением объемной доли магнитной фазы в магнитной жидкости удастся все более плавно управлять составом фаз в стали в результате закалки.



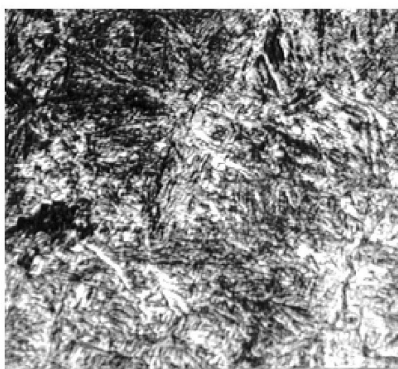
а



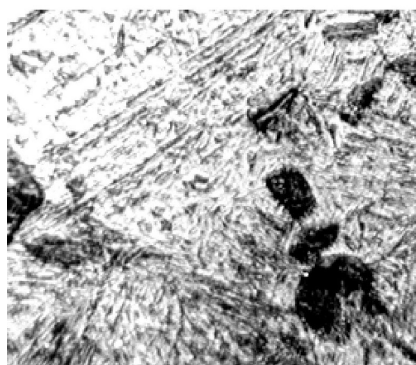
б



в



г



д

Рис. 4.

Микроструктуры стали 50 после закалки в магнитной жидкости ($\varphi_m = 0,0023$) в магнитных полях, T: а – 0; б – 0,0980; в – 0,1930; г – 0,2310; д – 0,2460.

Fig. 4. Microstructures of steel 50 after quenching in a magnetic fluid ($\varphi_m = 0.0023$) in magnetic fields, T: a – 0; b – 0.0980; в – 0.1930; г – 0.2310; d – 0.2460.

Однако величина прикладываемого магнитного поля, необходимого для управления процессом, существенно возрастает.

На рис. 4 а приведена фотография микроструктуры стали 50, закаленной в магнитной жидкости с объемной долей магнитной фазы $\varphi_m = 0,0023$ в отсутствие магнитного поля. Как и при закалке в жидкостях с $\varphi_m = 0,0294$ и $\varphi_m = 0,0159$ в отсутствие магнитного поля, твердость образцов соответствует полумартенситной зоне (40 HRC). в структуре присутствует $\sim 50\%$ мартенсита и $\sim 50\%$ троостита. На фотографии эти области видны соответственно как светлая с наличием игольчатых образований и темная с участками большей и меньшей протравленности – участки более и менее темные. Последнее связано с наличием в структуре мелкодисперсной и грубодисперсной фаз.

Наложение магнитного поля приводит к последовательному уменьшению объема трооститных включений в структуре стали.

На рис. 4 б – 4 д приведены фотографии микроструктур стали 50, закаленной в магнитной жидкости с $\varphi_m = 0,0023$ в магнитном поле. Из фотографий видно, что с увеличением магнитного поля объем темных пятен с большеугловыми границами хорошо протравленной мелкодисперсной фазы – троостита – уменьшается.

Закалка эвтектоидной и низколегированной сталей в магнитных жидкостях

С увеличением содержания углерода в стали снижается критическая скорость закалки, однако, увеличивается предельная твердость закаленных образцов. Несмотря на меньшую критическую скорость закалки стали У8 в сравнении со сталью 50, твердость образцов из стали У8, закаленных в магнитной жидкости в отсутствие поля, оказалась ниже твердости образцов из стали 50, обработанных в аналогичных условиях. На рис. 5 приведены результаты измерения твердости образцов из стали У8, подвергнутых закалке в растворах магнитной жидкости с объемной долей магнитной фазы в пределах $0,0023 \leq \varphi_m \leq 0,0374$ в магнитном поле различной интенсивности.

При закалке в наиболее концентрированном растворе в отсутствие поля твердость образцов не превысила 30 HRC. Напомним, что в аналогичных условиях твердость образцов стали 50 составила 40 HRC. Подобный эффект объясняется различием температуры нагрева под закалку этих марок сталей.

С ростом температуры нагрева увеличивается начальная разность температуры образца и охлаждающей жидкости. Это приводит к более интенсивному охлаждению образца в высокотемпературной области [7]. В связи с более низкой температурой нагрева под закалку стали У8, охлаждение образцов в области температур перлитного превращения происходило медленнее, что способствовало диффузионным процессам в стали.

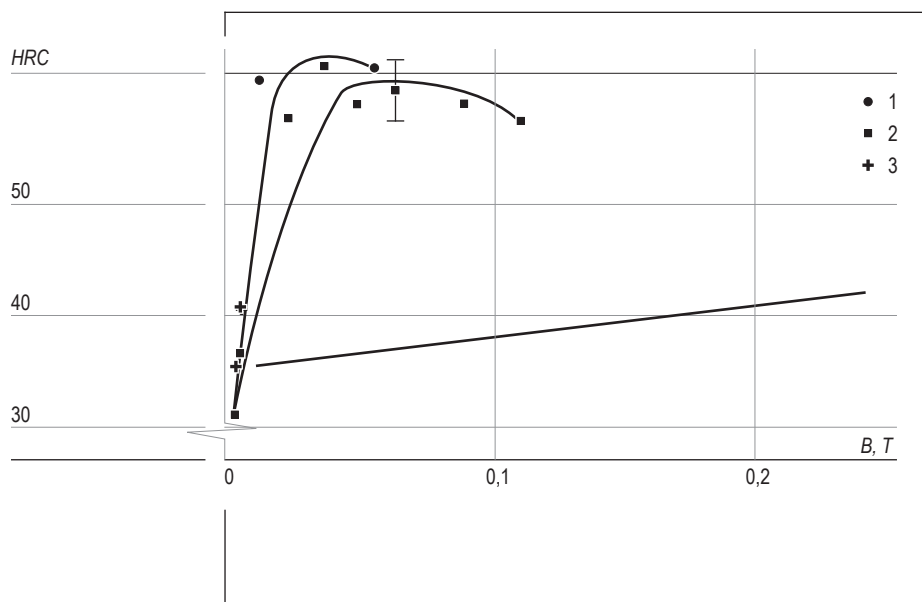


Рис. 5.

График зависимости твердости образцов из стали У8 от величины прикладываемого магнитного поля при закалке в магнитной жидкости с объемной долей магнитной фазы, ϕ_m : 1 – 0,0294; 2 – 0,0159; 3 – 0,0023.

Fig. 5. The graph of the dependence of the hardness of the samples from Y8 steel on the magnitude of the applied magnetic field upon quenching in a magnetic fluid with a volume fraction of the magnetic phase: 1 – 0.0229; 2 – 0.0159; 3 – 0.0023.

На рис. 6 а приведена фотография микроструктуры стали У8, полученной в результате закалки в магнитной жидкости с объемной долей магнитной фазы $\phi_m = 0,0294$ в отсутствие магнитного поля. На фотографии хорошо видны светлые области, где практически сформировалась равновесная структура – перлит. На фотографии на светлом фоне феррита видны тонкие пластины цементита. Однако, в большом объеме в структуре обнаруживаются мелко-дисперсные перлитоподобные фазы – сорбит и троостит. На фотографии они выглядят как менее темные (слабо протравленные) и более темные (сильно протравленные) области. При закалке в концентрированном растворе магнитной жидкости ($\phi_m = 0,0294$) уже в малом по величине маг-

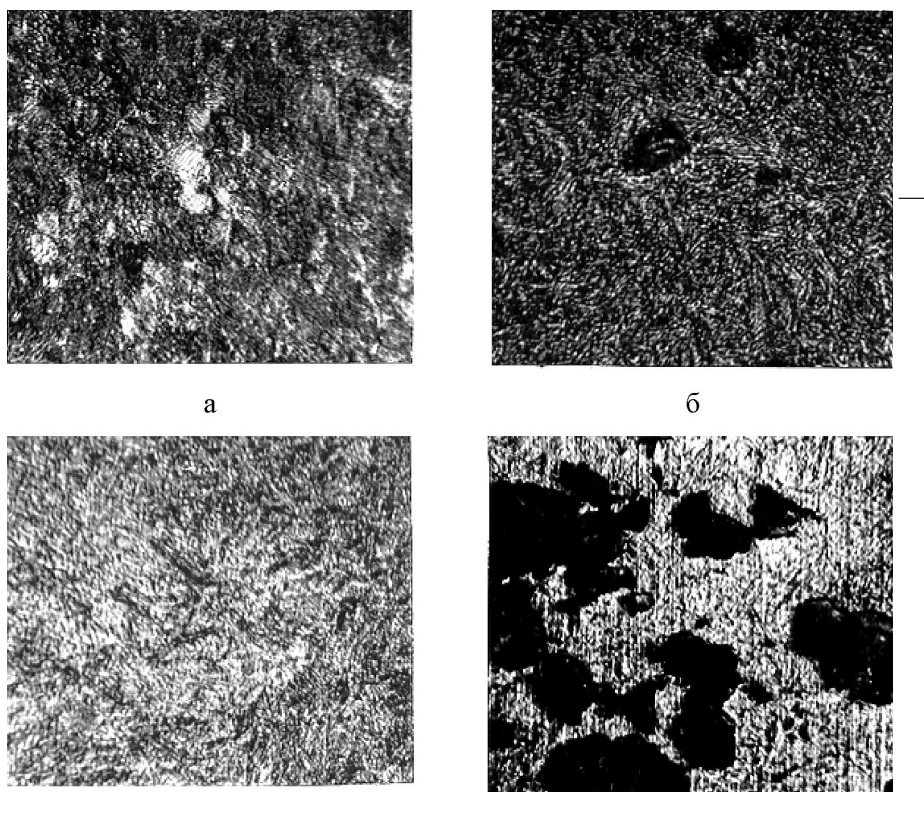


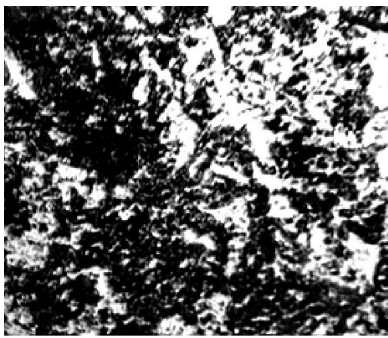
Рис. 6.

Микроструктуры стали У8 после закалки в магнитной жидкости ($\varphi_m = 0,0294$) в магнитных полях, Т : а – 0; б – 0,0220; в – 0,0370; г – 0,0525.

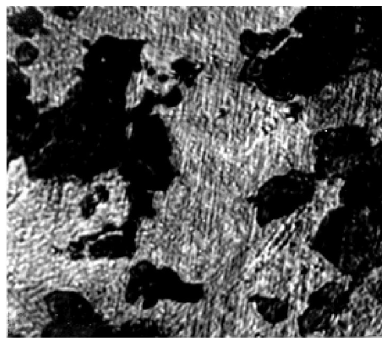
Fig. 6. The microstructures of steel U8 after quenching in a magnetic liquid ($\varphi_m = 0.0294$) in magnetic fields,

T : a = 0; b – 0.0220; в – 0.0370; g – 0.0525

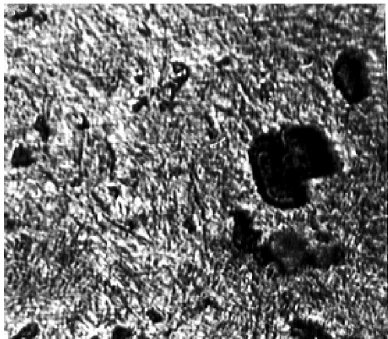
нитном поле бездиффузионное превращение преобладает. На рис. 6б, где приведена фотография микроструктуры стали У8 после закалки в магнитном поле 0,0220 Т, видны редко расположенные темные пятна троостита. Основная структура стали – мелкоигольчатый мартенсит. При закалке в магнитном поле 0,0370 Т, как следует из фотографии рис. 6 в, трооститные включения в структуре уже не обнаруживаются. При закалке стали У8 максимум влияния поля более выражен. На рис. 6 г приведена фотография микроструктуры стали У8, полученной в результате закалки в магнитном поле 0,0525 Т. Видно, что трооститные включения – на фотографии это темные пятна с большеугловыми границами – вновь появляются и занимают значительный относительный объем в структуре.



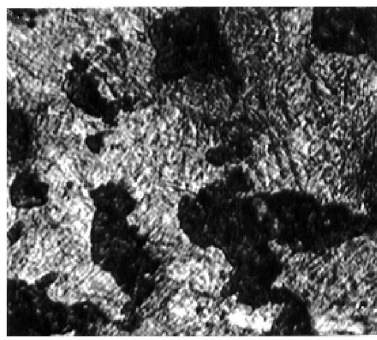
a



б



в



г

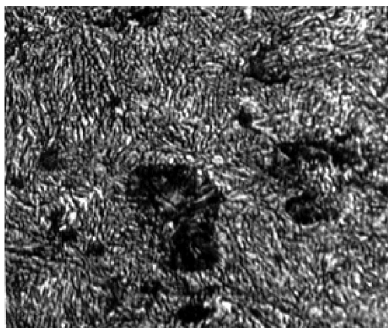
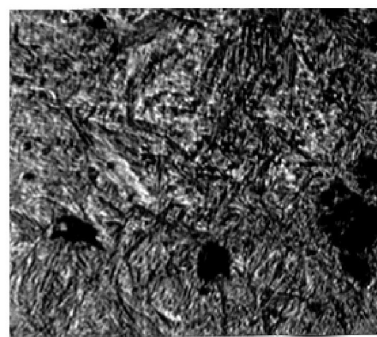
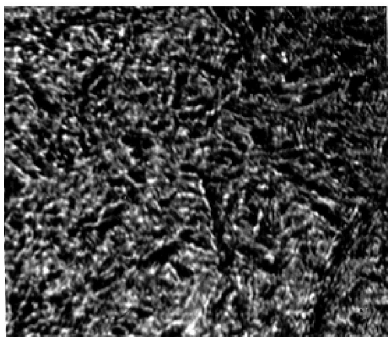


Рис. 7.

Микроструктуры стали У8 после закалки в магнитной жидкости ($\varphi_m = 0,0159$) в магнитных полях, Т: а – 0; б – 0,0220; в – 0,0370; г – 0,0525; д – 0,0680; е – 0,0980; ж – 0,1250

Fig. 7. The microstructures of steel U8 after quenching in a magnetic fluid ($\varphi_m = 0.0159$) in magnetic fields, T: a – 0; b – 0.0220; в – 0,0370; г – 0.0525; д – 0,0680; е = 0.0980; ф – 0,1250

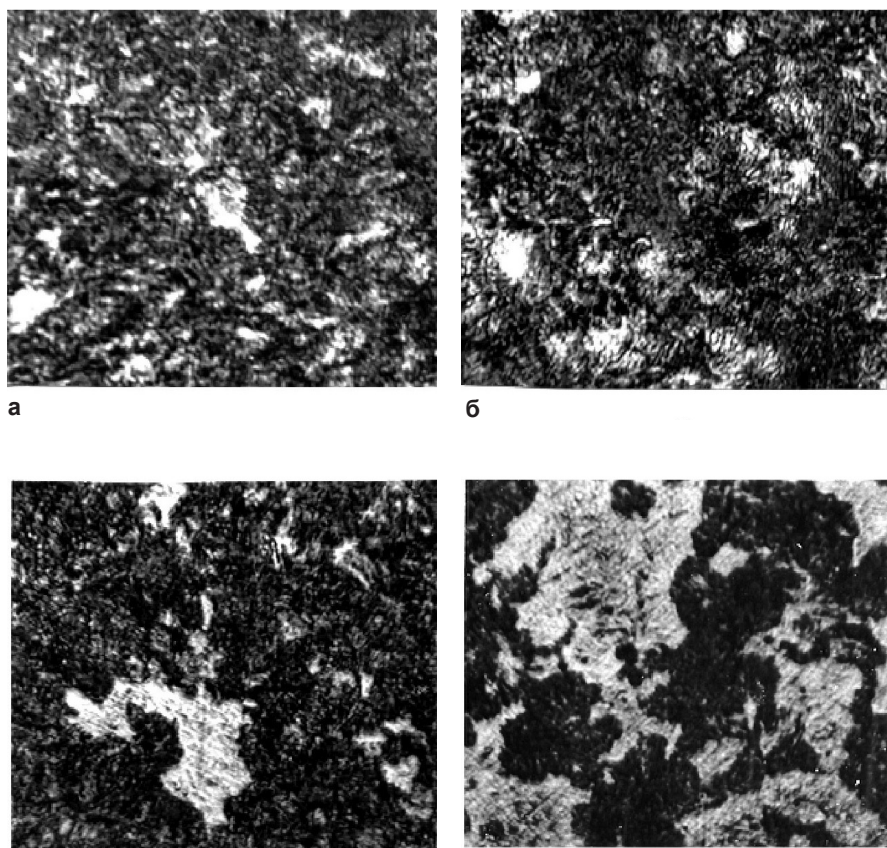


Рис. 8.

Микроструктуры стали У8 после закалки в магнитной жидкости ($\varphi_m = 0,0023$) в магнитных полях, T: а – 0; б – 0,0980; в – 0,1930; г – 0,2130

Fig. 8. The microstructures of U8 steel after quenching in a magnetic liquid ($\varphi_m = 0.0023$) in magnetic fields, T: a – 0; б – 0.0980; в – 0,1930; г – 0.2130

Как и при закалке стали 50 с уменьшением объемной доли магнитной фазы в магнитной жидкости магнитным полем удастся все более плавно управлять ходом фазовых превращений в сталях при охлаждении.

На рис. 7 а-ж представлены фотографии микроструктур стали У8, полученных в результате закалки в растворе магнитной жидкости с объемной долей магнитной фазы

$\varphi_m = 0,0159$ в магнитных полях различной интенсивности. После закалки без магнитного поля (рис. 7а) структура образцов – троостомартенсит – на фотографии видно чередование темных трооститных и светлых мартенситных областей. В связи с малой величиной зерна игольчатый характер структуры мартенсита не просматривается. С увеличением магнитного поля до значений 0,0525 Т троостинные включения в структуре все еще обнаруживаются. Указанный характер изменений отражен на рис. 7б – 7г, где приведены фотографии микроструктур стали У8, полученных в результате закалки в полях 0,0220; 0,0370 и 0,0525 Т соответственно. Как и ранее, хорошо протравленные темные области – троостит, светлый фон со слабо просматриваемой игольчатой структурой – мартенсит. При закалке в магнитном поле 0,0680 Т троостит в структурах не обнаруживается (рис. 7 д). Однако, хорошо видны последствия процесса отпуска – укрупнены игловидные образования – характерная структура мартенсита отпуска. С дальнейшим увеличением магнитного поля вновь успевают происходить диффузионные процессы, и в структуре появляются области троостита (рис. 7 е, ж). При закалке стали У8 в наиболее слабоконцентрированном растворе магнитной жидкости в полях до 0,2 Т скорость охлаждения оказывается ниже критической для данной марки стали, что не позволяет получать структуры, свободные от продуктов распада аустенита.

На рис. 8а приведена фотография микроструктуры стали У8, полученной в результате закалки в растворе магнитной жидкости с объемной долей магнитной фазы $\varphi_m = 0,0023$ в отсутствие магнитного поля. Видны светлые области – мартенсит, в различной степени протравленные области – сорбит и троостит. В отдельных местах заметны сформировавшиеся области перлита, на светлом фоне перлита параллельные пластины цементита.

Подобное многообразие фаз в структуре характерно и для образцов, закаленных в поле 0,0980Т – рис. 8б.

Последовательное уменьшение объема продуктов перлитного превращения – сорбита и троостита, как следует из фотографий микроструктур, приведенных на рис. 8 в и г, происходит в полях 0,1930 и 0,2130 Т.

В результате рентгеноструктурного анализа определены изменения в количественном содержании остаточного аустенита образцов стали У8, закаленных в растворах магнитной жидкости с различным содержанием магнитной фазы при наложении магнитных полей различной интенсивности.

На рис. 9 приведены графики зависимости интенсивности линий (002) аустенита от величины прикладываемого магнитного поля. Кривая 1 соответствует интенсивности линии (002) аустенита для образцов, закаленных в жидкости с $\varphi_m = 0,0294$. Кривая 2 характеризует изменения уровня интенсивности линии (002) аустенита для образцов, закаленных в жидкости с $\varphi_m = 0,0159$. Поведение кривой 3 соответствует изменениям интенсивности линий (002) аустенита образцов, закаленных в жидкости с $\varphi_m = 0,0023$. Кривая 4 соответс-

твует уровню интенсивности линии (002) аустенита в образцах, закаленных в воде, имеющей начальную температуру 24 °С. Видно, что наложением магнитного поля удастся управлять количеством остаточного аустенита в стали при закалке в концентрированной жидкости от уровня, меньшего, чем при закалке в воде, до большего уровня. Некоторое количество остаточного аустенита обнаруживается и при закалке в слабоконцентрированном растворе магнит-

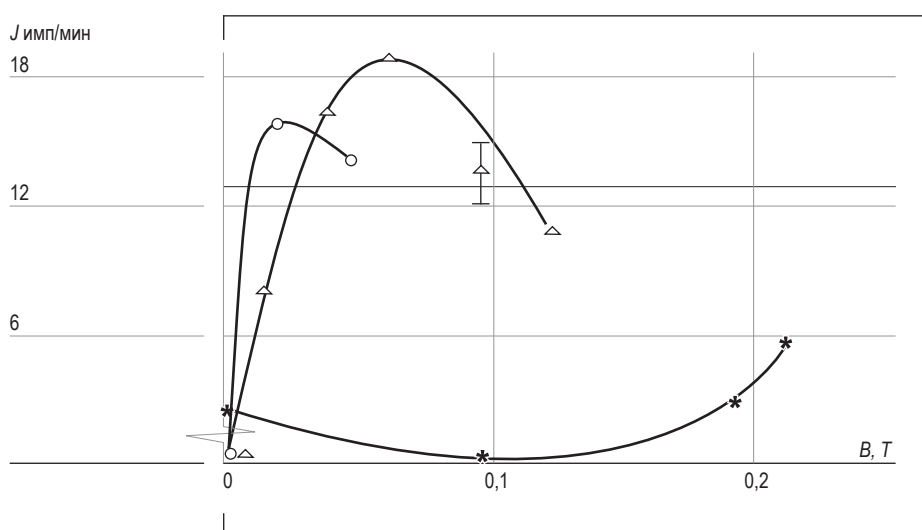


Рис. 9.

График зависимости интенсивности линии (002) аустенита на рентгенограммах от величины прикладываемого магнитного поля у образцов из стали У8, закаленных в магнитной жидкости с φ_m :

○ – 0,0294; △ – 0,0159; * – 0,0023.

Прямая линия – уровень интенсивности линии (002) аустенита у образцов, закаленных в воде.

Fig. 9. A plot of the intensity of the austenite line (002) on X-ray diffraction patterns from the magnitude of the applied magnetic field in samples of steel U8 quenched in a magnetic fluid with φ_m : ○ – 0,0294; △ – 0,0159; * – 0,0023. The straight line is the intensity level of the austenite line (002) for samples quenched in water.

ной жидкости. Более высокий уровень остаточного аустенита в образцах, закаленных в магнитной жидкости, может быть обусловлен рядом причин.

С одной стороны, более интенсивным, нежели в воде, охлаждением в интервале температур мартенситного превращения. Другим возможным механизмом увеличения ко-

личества остаточного аустенита в стали может явиться соответствующее перераспределение фазовых напряжений за счет неоднородного охлаждения, что затрудняет сдвиг атомных плоскостей в период мартенситного превращения.

Выводы

Впервые, основываясь на результатах изучения термогидродинамических явлений при охлаждении твердых тел в магнитной жидкости, предложена новая область технического использования магнитной жидкости – в качестве закалочной среды в процессах термической обработки. Возможность применения магнитной жидкости в качестве закалочной среды подтверждена экспериментами по закалке углеродистых и низколегированных сталей. Показано, что путем изменения интенсивности магнитного поля при закалке в магнитной жидкости сталей с пониженной устойчивостью переохлажденного аустенита можно добиваться как диффузионного, так и бездиффузионного механизмов превращения и, тем самым, управлять фазовым составом сталей. Найдено, что путем изменения интенсивности магнитного поля при закалке в магнитной жидкости образцов малых размеров из сталей с пониженной устойчивостью переохлажденного аустенита можно управлять их твердостью.

Результаты исследований позволили выявить новое перспективное направление при использовании магнитной жидкости в качестве закалочной среды – проведение закалочного охлаждения с заданной локальной неоднородностью. Возникновение в магнитной жидкости на поверхности закаливаемых изделий паровых полостей, положение которых обусловлено конфигурацией магнитного поля, дает основание для проведения охлаждения различных участков поверхности деталей с различной скоростью. Проведение неоднородного охлаждения поверхности по заранее заданной схеме позволит управлять распределением текущих и остаточных напряжений в изделиях, что даст основание для работы над одной из важнейших проблем машиностроения – осуществления бездеформационной закалки.

Библиографический список

1. А.С. 985076 СССР. Закалочная среда / Ставропольский пед. институт, авт.изобретение В.В.Чеканов, А.Я. Симоновский. – Заявл. 26.05.81. № 3294878/22-02; опубл.30.12.82// Б.И., 1982. №48.
2. Симоновский А.Я. Теплоперенос при закалочном охлаждении в магнитной жидкости // Магнитная гидродинамика. 1988. №2. С. 67-72.
3. Верховский С.Н., Миркин Л.И., Симоновский А.Я. Структура и свойства сталей после управляемой закалки в магнитной жидкости // Физика и химия обработки материалов. 1990. № 2. С. 127-132.

4. Гогосов В. В., Симоновский А. Я. О локально-неоднородном охлаждении при закалке в магнитной жидкости // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1989. № 2. С. 3.
5. Gogosov V. V., Simonovskii A. Ya., Smolkin R. D. Quenching and separation in magnetic fluids // JMMM. 1990. V. 85. №. 1-3. P. 227.
6. Mirkin L.I., Shesterikov S.A., Simonovski A.Y. Equipment and method for quenching steels in a magnetic liquid // 1993. V.U.Z. Mashinostr. V. 6. P. 1.
7. Блантер М.Е. Теория термической обработки стали. М.: Металлургия, 1984. 328 с.
8. Металловедение и термическая обработка стали: Справочник. Т. III. Термическая обработка металлопродукции / под ред. М.Л. Бернштейна и А.Г. Рахштадта. М.: Металлургия, 1983. – 216с.
9. Журавлев В.Н., Николаева О.И. Машиностроительные стали: Справочник. М.: Машиностроение, 1981. 391 с.
10. Металловедение и термическая обработка стали: Справочник. М.: Машиностроение, 1983. 352 с.
11. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1977. 647с.

References

1. A. C. 985076 of the USSR. The hardening environment / Stavropol PED.Institute, ed.the invention V. V. Chekanov, Y. A. Simonov. Declared. 26.05.81. No. 3294878/22-02; publ.30.12.82 // B. I., 1982. No. 48.
2. Simonovsky A. Ya. heat Transfer during quenching cooling in magnetic fluid // Magnetic hydrodynamics. 1988. №2. P. 67-72.
3. Verkhovsky S. N., Mirkin L. I., Simonov A. Y. Structure and properties of steels after controlled quenching in a magnetic fluid // physics and chemistry of materials processing. 1990. No. 2. P. 127-132.
4. Gogosov V. V., Simonovskij A. Ya. On locally inhomogeneous cooling when tempering in a magnetic fluid, Izv. USSR ACADEMY OF SCIENCES. Fluid and gas mechanics. 1989. No. 2. P. 3.
5. Gogosov V. V., Simonovskii A. Ya., Smolkin R. D. Quenching and separation in magnetic fluids // JMMM. 1990. V. 85. №. 1-3. P. 227.
6. Mirkin L.I., Shesterikov S.A., Simonovski A.Y. Equipment and method for quenching steels in a magnetic liquid // 1993. V.U.Z. Mashinostr. V. 6 P. 1.
7. Blanter M. E. Theory of heat treatment of steel. M.: Metallurgy, 1984. 328 с.
8. The metallography and heat treatment of steel: Reference book. Vol. III. Heat treatment of metal products / ed. M. L. Bernstein and A.G. Rachstadt. M.: Metallurgy, 1983. 216 с.
9. Zhuravlev V. N., Nikolaev O. I. Machine-building steel: Reference. M.: Mechanical Engineering, 1981. – 391с.
10. The metallography and heat treatment of steel: Reference book. M.: Mechanical Engineering, 1983. 352 с.
11. Gulyaev A. P. Physical Metallurgy. M.: Metallurgy, 1977.- 647с.

Благодарности: выражаем благодарность РФФИ за поддержку работы (грант № 17-01-00037).
Acknowledgments: We express our gratitude to the RFBR for the support of the work (Grant No. 17-01-00037).

**Исследование проведено в рамках гранта
РФФИ 17-01-00037.**

Об авторе:

Симоновский Александр Яковлевич,

1. профессор кафедры общей и теоретической физики ИМЭН СКФУ (355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1), доктор физико-математических наук, профессор;
2. профессор кафедры математики ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет» (355017, Россия, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический 12),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9346-8950>,
Scopus ID: 7801335487, simonovchkij@mail.ru.

About the author:

Simonovsky Alexander Yakovlevich,

1. Professor of the Department of General and Theoretical Physics, IMEN SKFU (355009, Stavropol, Pushkin Street, 1), Doctor of Physics and Mathematics, Professor;
2. Professor of the Department of Mathematics of the St. Petersburg State Agrarian University "Stavropol State Agrarian University" (355017, Russia, Stavropol, Zootechnical 12), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9346-8950>, Scopus ID: 7801335487, simonovchkij@mail.ru.

25.00.12

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ
И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 550.814:528.71

Харченко В.М.* Северо-Кавказский федеральный университет,
Лапта Д.В. г. Ставрополь, Россия *gng@ncstu.ru

НОВЫЙ СТРУКТУРНО-МЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СТРУКТУР НА НЕФТЬ И ГАЗ (на примере Нурин-Хагской площади в Калмыкии)

- Введение:** актуальность исследований по разработке нового наиболее сравнительно мало затратного метода обусловлена необходимостью повышения эффективности не только поисков и разведки, но и разработки месторождений нефти и газа в России. Предлагается новый метод выявления перспективных структур на нефть и газ, основанный на теоретических представлениях о природе структур центрального типа (СЦТ), где установлена закономерная связь радиусов СЦТ с глубинами до плотностных неоднородностей, согласно закону скалывающих напряжений.
- Материалы и методы исследований:** исходными материалами научных исследований являются космические снимки различных масштабов, данные почвенных, геоботанических, геоморфологических (ландшафтно-геоэкологических) исследований для подтверждения достоверности выделенных структур центрального типа и линиментов различного ранга. Основным методом представляется малоизвестный метод ландшафтно-геоэкологического картирования, который является логическим усовершенствованием известного метода групповой геологической съемки.
- Результаты исследований:** согласно представлениям о природе структур центрального типа (СЦТ), установлена закономерная связь радиусов СЦТ с глубинами до плотностных неоднородностей и геодинамическим центрам. Это объясняется известным в физике законом скалывающих напряжений, которые распространяются под углом 45 градусов по отношению к нормальным (вертикальным). Разработан новый метод выявления перспективных структур на нефть и газ, приводится наглядный пример использования этого метода, на одной из перспективных площадей на территории Калмыкии, где теоретическая геолого-тектоническая модель подтверждена геофизическими и геохимическими исследованиями.
- Обсуждения и заключение:** новый структурно-метрический метод является принципиально новым, сравнительно дешевым и доступным для применения, в какой-то мере существенным дополнением и развитием давно известного структурно-геоморфологического метода, и в какой-то мере аналогом структурно-метрического метода Жукова В. Т., Лазарева Г. Е. и др. (1999) [2].
- Ключевые слова:** структурно-метрический метод, космическая съемка, структуры центрального типа, закон скалывающих напряжений, геолого-тектоническая модель, Нурин-Хагская космофотоаномалия, сейсмические и геохимические исследования.

Kharchenko V.M.
Lapta D.V.

North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

**NEW STRUCTURAL-METRIC METHOD
FOR DETECTING PERSPECTIVE OIL
AND GAS STRUCTURES
(on the example of nurin-khagsky square in kalmykia)**

- Introduction:** the relevance of research on the development of the most comparatively less costly method is due to the need to increase the efficiency not only of prospecting and exploration, but also the development of oil and gas fields in Russia. A new method is proposed for identifying promising structures for oil and gas, based on theoretical ideas about the nature of central type structures (CTS), where a regular connection of CST radii with depths to geological and geophysical inhomogeneities is established, according to the law of shear stresses.
- Materials and research methods:** the source materials of scientific research are space imagery of various scales, data from soil, geobotanical, geomorphological (landscape-geoecological) studies to confirm the reliability of selected structures of the central type and liniment of various ranks. The main method is a little-known method of landscape-geoecological mapping, which is a logical improvement of the well-known method of group geological filming.
- Research results:** according to the concept of the nature of the central type structures (SCR), a regular connection has been established between the SCR radii and depths to geological and geophysical inhomogeneities and geodynamic centers. This is explained by the law of shear stresses, known in physics, which propagate at an angle of 45 degrees relative to normal (vertical). A new method for identifying promising structures for oil and gas has been developed, and a vivid example of using this method is given on one of the promising areas in Kalmykia, where the theoretical geological and tectonic model has been confirmed by geophysical and geochemical studies.
- Discussions and conclusion:** the new structural-metric method is fundamentally new, relatively cheap and available for use, to some extent a significant addition and development of the well-known structural-geomorphological method, and to some extent analogous to the structural-metric method of Zhukov V. T., Lazareva, G. E., et al. (1999) [2].
- Keywords:** structural-metric method, space imagery, structures of the central type, the law of shear stresses, geological-tectonic model, Nurin-Khag cosmo-anomaly, seismic and geochemical studies.

Введение

Предложенный структурно-метрический метод по представлениям авторов является «зеркальным отражением» известного и наиболее практически используемого в настоящее время сейсмического метода 3D. При сейсмических исследованиях, при создании разрядки импульсных полей напряжений (взрывах в приповерхностных условиях) по характеру прохождения продольных и поперечных волн регистрируют плотностные неоднородности или отражающие горизонты в земной коре и мантии. Настоящим же методом следы разрядки как импульсных, так и постоянно действующих напряжений в различных точках геолого-геофизических сред, соответствующих отражающим горизонтам или плотностным неоднородностям, фиксиру-

ются на земной поверхности, и в разной степени достоверности диагностируются на аэро- и космических снимках различного масштаба в форме кольцевых структур или дуг-концентов различного радиуса соответствующим глубинам до плотностных неоднородностей в земной коре, мантии и даже в ядре, начиная с глубин первых десятков и сотен метров.

Это происходит потому, что различные по физико-механическим свойствам пород, литологические слои (отражающие горизонты), при пульсационном режиме Земли излучают волны тектонических напряжений или сейсмические волны из различных энергогенерирующих центров преимущественно в двух направлениях: вертикально вверх – нормальные напряжения и под углом 45 градусов по отношению к нормальным – максимальные касательные напряжения (согласно данным М.В. Гзовского, 1975) [1]. Указанные напряжения создаются архимедовой силой над залежами углеводородов или другими аномалиями низкой плотности в земной коре и мантии.

Волны импульсных или постоянно действующих тектонических напряжений проявляются на земной поверхности (в ландшафтах) и соответственно на высокочувствительных фотопленках при аэро- и космофотосъемке, в виде структур центрального типа (СЦТ) или кольцевых структур округлой формы в плане с характерной центральной симметрией и формой перевернутого конуса в объёме. Максимальные «следы» тектонических напряжений проявляются как в центральных частях, так и по периферии кольцевых структур или СЦТ в соответствии с разрядкой нормальных и максимальных касательных напряжений.

Учитывая, что эти напряжения распространяются под углом 45 градусов по отношению к нормальным (вертикальным), становится очевидно соответствие радиусов кольцевых структур и глубин до энергогенерирующих центров, а также кольцевая форма аэро- и космофотоаномалий.

Как уже было сказано выше, тектонические напряжения в основном связаны с реализацией закона Архимеда в природе, т. е. с наличием разности плотностей горных пород в геологической среде: в земной коре, мантии и даже ядре. Дифференциация вещества по плотности, как известно, происходит в результате вращения Земли вокруг своей оси, вокруг Солнца и центра Галактики. В земной коре зоны разуплотнения связаны с породами кислого состава (магматические диапиры), соленосными и глинистыми толщами (соляные и глиняные диапиры) и, наконец, нефтегазовыми залежами (нефтяные диапиры) [4].

Для последних характерны особые геодинамические условия и характерные проявления на земной поверхности: особый рисунок фотоизображения и речной сети, сравнительно низкие (по сравнению с газовыми залежами) градиенты скоростей движения земной коры. Эти представления изложены в работах Н.В. Розанова (70-е гг.) и В.В. Дроздова и др. (2000 г.) [3], в последних приводятся статистические данные по Ставропольскому краю о соответствии градиентов скоростей вертикальных движений и залежей нефти или газа.

Материалы и методы исследований

Конкретный анализ СЦТ с использованием структурно-метрического метода проводился на отдельных участках опытных работ на территории Северного Кавказа и Предкавказья.

Наиболее удачным примером является комплексная интерпретация Нурин-Хагской кольцевой космофотоаномалий (ККФА) на территории Калмыкии [6].

Нурин-Хагская кольцевая космофотоаномалии впервые была выявлена при дешифрировании космических фотоснимков черно-белого изображения и фотопланов масштаба 1: 200000, при выполнении работ тематической партией треста «Калмнефтегазразведка» по теме: «Обобщение геолого-геофизических и аэрокосмических материалов, территории Калмыкии с целью прогноза нефтегазоносности структур», автор В. М. Харченко, Элиста-Саратов 1981 г.

Нурин-Хагская ККФА представляет собой структуру центрального типа с выраженной центральной частью диаметром около 8 км, к которому приурочивается соленое мелкое озеро Нурин-Хаг (по которому и получила название КФАА) и ряд параллельно-расположенных бугров длиной 1–3 км, шириной 200–300 м, высотой до 10 м (рис. 1–2). Эти резко выраженные аномальные возвышенности аналогичны буграм Бэра, имеющие распространение в основном по побережью Каспийского моря, в остальных местах они распространены локально и обычно приурочиваются к уникальным участкам, связанных со своеобразием тектоники и проявление физических полей, в частности электромагнитных. По представлению автора, бугры Бэра являются результатом избирательной эоловой седиментации при работе природного электрофилтрат-пылеуловителя. Последний, по аналогии с искусственным электрофилтрат-пылеуловителем, работает в таком же режиме при электромагнитном взаимодействии заряженных пылевых облаков с проводящими электричество земными поверхностями в зонах пересекающихся тектонических нарушений. Таким образом, бугры Бэра являются индикатором «живых» тектонических нарушений, которые приурочиваются к центральной части кольцевой космофотоаномалии.

Периферическая часть ККФА с большой достоверностью, диагностируется по системе кулисообразно расположенных тонких (до 200 м) дугообразных «полос» на космических снимках черно-белого изображения, снятых в обычном диапазоне спектра.

По мелкомасштабным КФС внешний контур Нурин-Хагской ККФА диагностируется в основном по косвенным признакам : по условным центрам мелких структур (до 8 км) центрального типа, расположенных, как правило, по главной «орбите» основной структуры , а также по системе солончаковых понижений, расположенных в целом по внешнему контуру СЦТ. Кроме того, в целом Нурин-Хагская ККФА ограничивается системой линеаментов

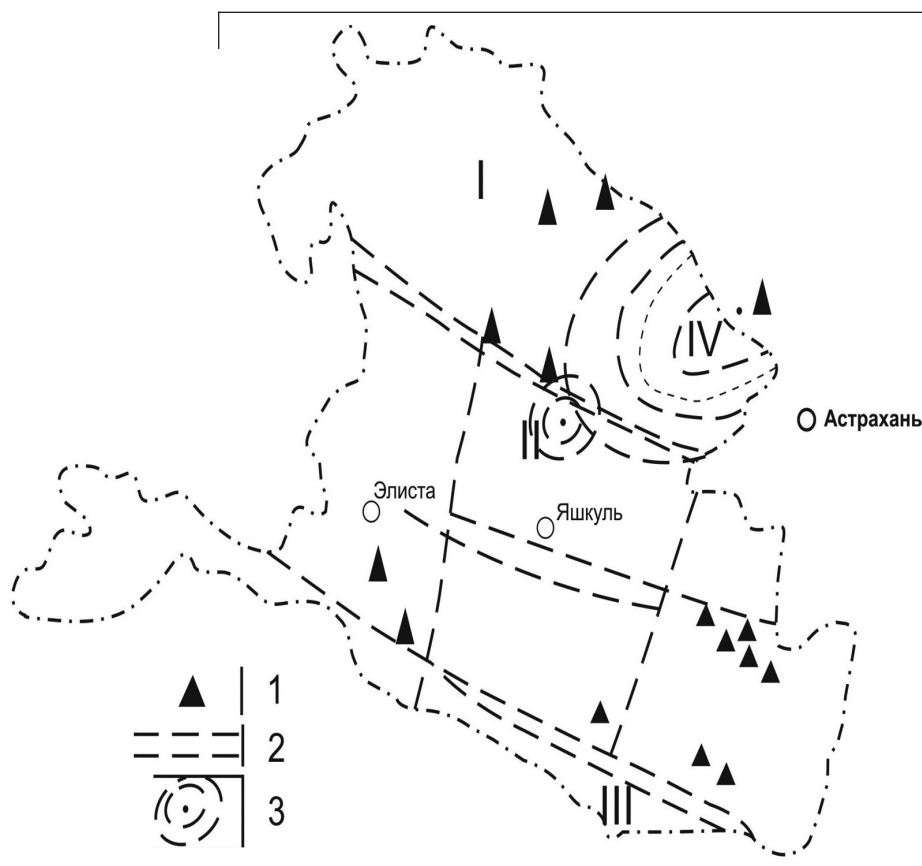


Рис. 1.

Схема расположения Нурин-Хагской космофотоаномалии на территории Калмыкии: I – Прикаспийская впадина, II – Кряж Карпинского, III – Кумо-Манычская впадина, IV – Астраханский свод. 1 – Месторождение нефти и газа, 2 – Зона тектонических нарушений, 3 – кольцевые структуры.

Fig. 1. The layout of the Nurin-Khag cosmophotoanomaly on the territory of Kalmykia: I – Caspian depression, II – Karpinsky ridge, III – Kumo-Manych depression, IV – Astrakhan arch. 1 – Oil and gas field, 2 – zone of tectonic disturbances, 3 – ring structures.

субширотного, субмеридионального, северо-западного и северо-восточного направлений, в плане составляющие своеобразный шестиугольник с длиной стороны 8–10 км. К этому шестиугольному блоку в плане и приурочивается структура центрального типа с выраженной центральной частью диаметром около 8 км. К северо-востоку от этого центра, который четко отражается на космических снимках среднего и мелкого масштаба, выделяется своеобразная морфоструктура размера около 8 км, которая представляет собой в рельефе дефляционную котловину, с характерным понижением в центральной час-



Рис. 2. Космический снимок Нурин-Хагской площади в Калмыкии.
Fig. 2. Satellite image of Nurin-Khagskaya Square in Kalmykia.

ти. Это очень редкий случай развития локальной эрозионной сети временных и постоянных водотоков на фоне аккумулятивного типа рельефа Прикаспийской низменности. Кроме того, это явный признак современной структуры растяжения в центральной части сводового неотектонического поднятия на общем фоне опускания земной поверхности в пределах Прикаспийской низменности, где, как известно, выделяется морская верхнехвалынская аккумулятивная равнина. По восточному контуру этого неотектонического поднятия располагается цепочка солончаковых понижений, центральная его часть совпадает с озером Нурин-Хаг. К северо-востоку от выделенной Нурин-Хагской ККФА имеют широкое распространение многочисленные дефляционные кот-

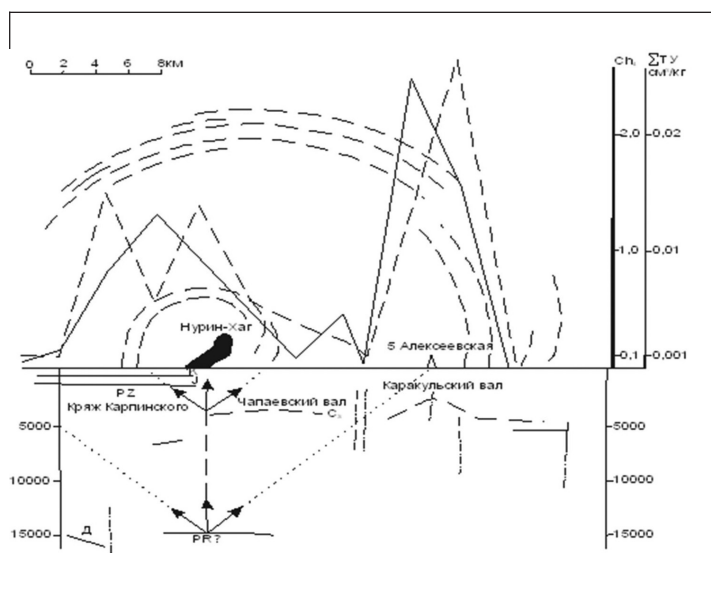


Рис. 3.

Схема приуроченности геохимических аномалий по метану и тяжелым углеводородам к космофотоаномалии и зонам тектонической трещиноватости на Нурин-Хагской площади. (Автор В.М. Харченко по материалам треста «Калмнефтегазразведка»): 1 – Контуры структур центрального типа; 2 – Распространение нормальных и максимальных касательных; 3 – Значение содержания углеводородов; 4 – Основные отражающие горизонты; 5 – Тектонические нарушения; 6 – Скважина с газопроявлением.

Fig. 3. Scheme of geochemical anomalies associated with methane and heavy hydrocarbons to cosmophotoanomaly and tectonic fracture zones in Nurin-Khag area. (Author VM Kharchenko according to the materials of the Kalmneftegazrazvedka trust): 1 – Outlines of structures of the central type; 2 – Distribution of normal and maximum tangents; 3 – The value of the content of hydrocarbons; 4 – Main reflecting horizons; 5 – Tectonic disturbances; 6 – Gas well.

ловины в отличие от описанной выше, окаймленные песчаными буграми и барханами. Они, как правило, все приурочиваются к неотектоническим поднятиям, размеры их примерно соответствуют вышеописанной (от 3 до 5 км в поперечнике), но отличаются песчаной литологической основой, а не глинистой, что характерно для нашего нового объекта, и отсутствием явно выраженной эрозионной сети. Для песчаных дефляционных котловин Калмыкии (Юстинский район) характерна приуроченность линз пресных и солоноватых вод, а в центре одной из них было открыто в 1987 г. Северо-Шаджинское газопроявление (рис. 3) в триасовых отложениях на глубинах около 3 км. В непосредственной близости от дефляционной котловины в пределах Нурин-Хагс-

кой ККФА в 70-е годы, на Алексеевской площади (скв. 5) был получен фонтан газа с глубины около 2 км, однако при бурении скв. 8 в 2 км на северо-запад от скв. 5, нефтегазопроявлений на этой глубине не обнаружено.

Согласно теоретических разработок о природе структур центрального типа, изложенных автором в указанном отчете и представленных далее на международном геологическом конгрессе в г. Москве 1984 г. и в докладах различных научных конференциях в СевКавГТУ г. Ставрополе 1999–2000 гг., была разработана геолого-тектоническая модель (рис. 4) и сделан прогноз о возможной залежи УВ в подсолевых отложениях карбона на глубинах 3,5–4,0 км. Кроме того, согласно этой концепции, о соответствии радиусов глубинам до энергогенерирующих центров и геолого-геофизических отложений неоднородностей выделены важные интервалы глубин H_1 – 2,2 км, H_2 – 3,6 км,

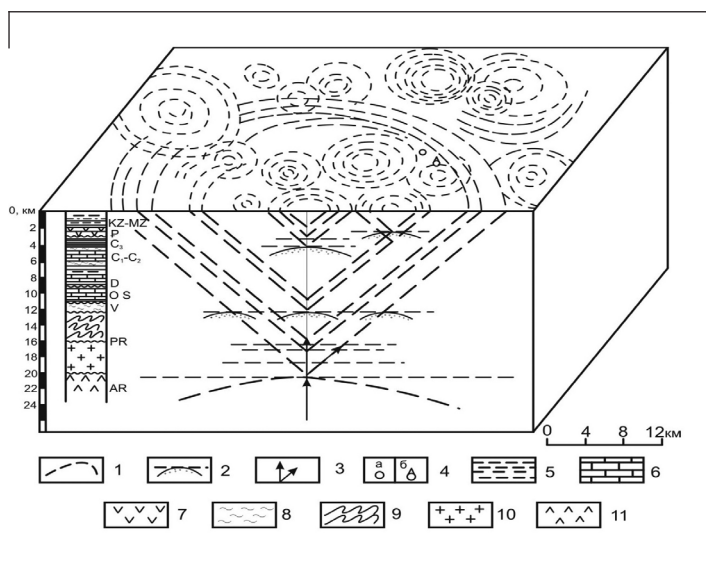


Рис. 4.

Теоретическая геолого-тектоническая модель Нурин-Хагской площади, составленная по результатам дешифрирования космических снимков и интерпретации полей напряжений: 1 – структурные линии структур центрального типа (СЦТ); 2 – геолого-геофизические разделы сред; 3 – распространение полей напряженности; 4 – скважины: а – пустая, б – газоносная; 5 – глины, аргиллиты; 6 – известняки; 7 – соли; 8 – сланцы; 9 – сложнодислоцированные породы; 10 – граниты; 11 – основные породы.

Fig. 4. Theoretical geological and tectonic model of Nurin-Khag area, compiled from the results of interpretation of satellite images and interpretation of stress fields: 1 – structural lines of the central type structures (CST); 2 – geological and geophysical sections of media; 3 – the spread of fields of tension; 4 – wells: a – empty, b – gas-bearing; 5 – clay, argillite; 6 – limestone; 7 – salts; 8 – slates; 9 – complex rocks; 10 – granites; 11 – the main breed.

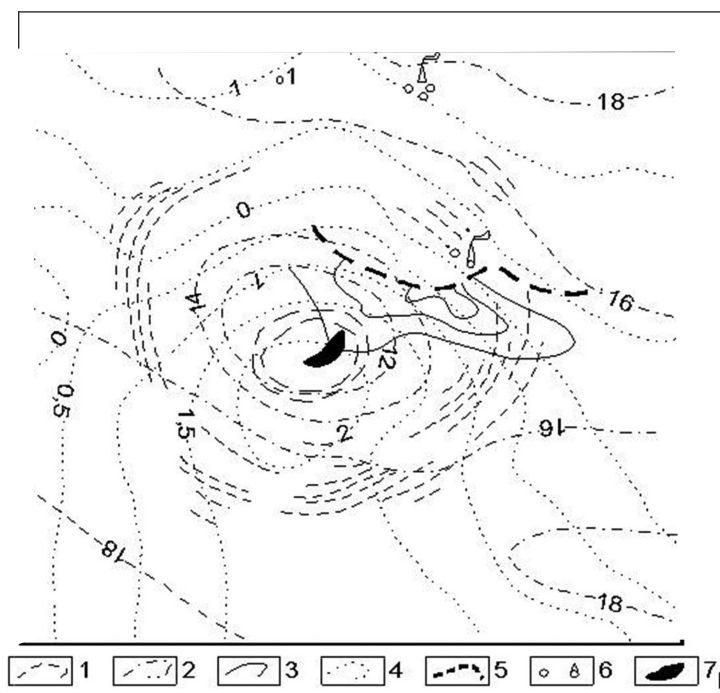


Рис. 5.

Схема сопоставления космофотоаномалии с различными геолого-геофизическими данными: 1 – структурные линии космофотоаномалии, 2 – изогипсы кровли докембрийского фундамента, 3 – изогипсы отражающего горизонта карбона (1 – п С2b), 4 – изолинии напряженности магнитного поля, 5 – разрывные нарушения (по данным геофизики), 6 – скважины: а – поисково-разведочные; б – в которых получен газ, 7 – оз. Нурин-Хаг.

Fig. 5. Diagram of comparison of cosmophotoanomaly with various geological and geophysical data: 1 – structural lines of cosmophotoanomaly, 2 – roofing isohypses of the Precambrian basement, 3 – isohypses of the reflecting carbon fiber (1 – n C2b), 4 – isolines of the magnetic field strength, 5 – discontinuous faults (according to geophysics), 6 – wells: a – exploration; b – in which gas is obtained, 7 – oz. Nurin-Hag.

H_3 – 12–13 км, H_4 – 14–16 км, H_5 – 20 км. Наиболее выражены из перечисленных радиусов и соответственно глубины являлись: 3,6–4 км, 12–13 км и максимальные 20 км.

В начальный период анализа и сопоставления выделенной Нурин-Хагской ККФА с различными геофизическими материалами (рис. 5) была отмечена плановая приуроченность центральной части ККФА с аномалией магнитного поля (значение Т–2–3 миллиэрстед на нулевом фоне и отрицательных значений), а также плановое практически полное совпадение с выступом докембрийского фундамента на глубинах 1–14 км, выявленного в результате сейсмических исследований АГЭ ПГО «Центргеофизика». Центральная часть ККФА практически совпадает с изогипсой – 12 км докембрийского фундамента, а общий контур окаймляет изогипсой минус 18 км. Делается однозначный вывод, что в целом ККФА и ее центральная часть в первую оче-

редь обусловлены горстообразным выступом кристаллического фундамента, который дополнительно подтверждается данными магнитометрии. Магнитная аномалия скорее всего связана с составом пород докембрийского фундамента (по аналогии с Украинским и Воронежским щитами), где широко развиты железистые кварциты докембрия, или наличием вулканоплутонического центра девонского возраста, приуроченного к центральной части ККФА.

В 1986–1987 гг., по инициативе автора В.М. Харченко, будучи главным геологом Калмыцкой НГРЭ совместно с Саратовским университетом были проведены площадные и профильные геохимические исследования через центр ККФА и среднюю Алексеевскую площадь.

В результате этих работ были выявлены геохимические аномалии (по содержанию метана и суммы тяжелых УВ) в центральной части ККФА и в районе Алексеевской площади, скв. 5 (рис. 6).

При бурении скв. 5 Алексеевской площади в начале 70-х годов был получен фонтан газа с глубины 1700 м с кунгурских отложений нижней перми. Газопроявление было ликвидировано по техническим причинам. Рядом, в 2 км на северо-запад, была пробурена на такую же глубину скв. 8, где газопроявление не подтвердилось.

Факт газопроявление в скв. 5 был воспринят без должного внимания, и обоснования газопроявления не последовало, потому что перспективных объектов на этом стратиграфическом уровне на соседних областях не наблюдалось, а вероятность миграции УВ по зонам пересекающихся разломов из нижележащих горизонтов, к сожалению, не рассматривалась, поэтому площадь впоследствии считалась бесперспективной.

В этот же период, опять же по инициативе автора, в результате сейсмических работ Астраханской ГЭ ПГО «Центргеофизика» в пределах контура выделенной ККФА, в непосредственной близости от ее центральной части, была выделена Чапчаевская структура по горизонту С31П (С2b), с двумя локальными поднятиями на глубинах 3,6–3,65 км.

На данную структуру составлен паспорт с рекомендациями для последующего бурения, с рекомендациями по постановке бурения поисковых скважин с учетом интерпретации Нурин-Хагской ККФА, геофизических и геохимических материалов. При последующей интерпретации сейсмических материалов на этой площади был выделен так называемый Чапчаевский вал по отражающему горизонту П (С-Р) в пределах глубин 3800 – 5000 м. Чапчаевский вал с севера и юга ограничен зонами тектонических нарушений и представляет собой вытянутую с субширотном направлении структуру, аналогичную Каракульскому, Смушковскому и др. валообразным поднятиям в зоне сочленения кряжа Карпинского и Прикаспийской впадины. Даже при беглом анализе сейсмических профилей (56.86, 6.6.86, 7.6.86, 8.6.86 и др.) очевиден изометричный плановый рисунок структуры, а не линейный, как это отражено на всех опубликованных структурных картах.

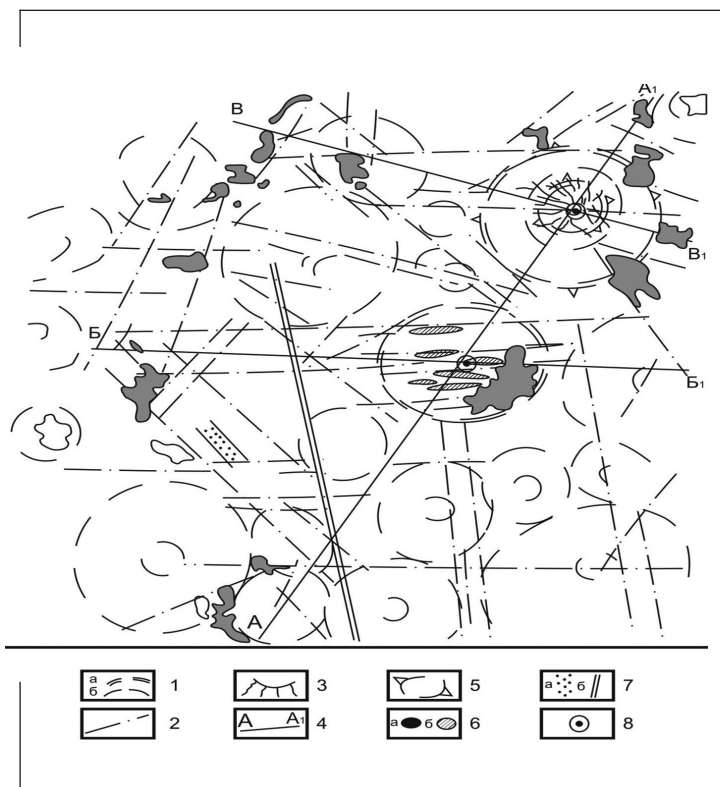


Рис. 6.

Схема дешифрирования Нурин-Хагской космофотоаномалии: 1 – контуры структур центрального типа (СЦТ): а – достоверные, б – предполагаемые; 2 – линеаменты и зоны тектонических нарушений: а – достоверные; б – предполагаемые; 3 – следы временных водотоков; 4 – рекомендуемые детальные грави- и сейсмопрофили; 5 – морфоструктура центрального типа с центростремительным рисунком гидросети (дефляционная котловина в центре); 6 – контуры: а – соленых озер и солончаков, б – бугров Бэра; 7: а – песчаный массив, б – канал Волга-Чаграй (недостроенный); 8 – рекомендуемые поисковые скважины.

Fig. 6. Interpretation scheme of the Nurin-Khag cosmophotoanomaly:

1 – the contours of the central type structures (SCR): a – reliable, b – assumed; 2 – lineaments and zones of tectonic disturbances: a – reliable; b – supposed; 3 – traces of temporary streams; 4 – recommended detailed gravity and seismic profiles; 5 – morphostructure of the central type with a centripetal pattern of the hydraulic network (deflationary depression in the center); 6 – contours: a – salt lakes and salt marshes, b – Baer hillocks; 7 – a – sand massif, b – Volga-Chagray canal (unfinished); 8 – recommended prospecting wells.

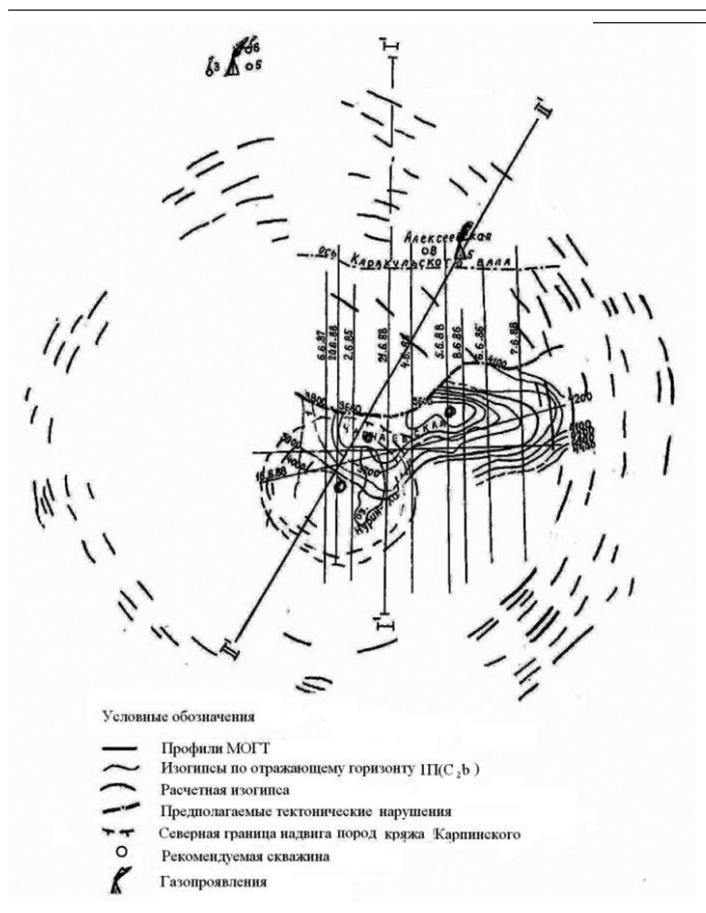


Рис. 7.

Схема приуроченности кольцевой космофотоаномалии к поднятию по отражающему горизонту IPC_2b .

Fig. 7. Scheme of confinement of the annular cosmophotoanomaly to the elevation along the reflecting horizon IPC_2b .

Следовательно, здесь выделяется брахиантиклинальная структура по отражающему горизонту $IP(C-P)$ или $C_3IP(C_2b)$ (рис. 7) размером в поперечнике около 25 км, которая унаследует структурный план докембрийского фундамента на глубинах 12–14 км.

Исходя из последних данных о нефтеносности девонских отложений в пределах Астраханского свода, залегающих там на глубинах 6 км (Володарская скв.) и их вероятного распространения по правобережью р. Волги, можно предполагать наличие нефтегазоносных залежей в пределах выделенной Нурин-Хагской космофотоаномалии, но уже на меньших глубинах, а именно: начиная с 4000 м залежи УВ могут быть приурочены как к карбонатным коллекторам девона, так и терригенно-карбонатным отложениям карбона, которые в целом образуют структуру облекания горстообразного докембрийского фундамента, выделяемого по последним данным на глубинах 8–10 км (Я.М.Бродский, Ю.Г.Юров – ГПО «Спецгеофизика», Ю.А. Волож – ГИН РАН, 1977 г.).

Покрышками предполагаемых залежей УВ в карбоне и девоне вполне могут служить соленосные отложения перми, которые вскрываются на этой площади на глубине около 2000 м.

Результаты исследований и их обсуждение

Таким образом, выделяемая Нурин-Хагская кольцевая космофотоаномалия подтверждается как перспективная структура на предмет поисков залежей нефти и газа как прямыми геохимическими, так и геофизическими, в частности сейсмическими методами исследования. Кроме того, газоносность подтверждена бурением скважины 5 Алексеевской.

Предложенный автором (Харченко В.М.) новый структурно-метрический метод, на основе трактовки механизма образования структур центрального типа, позволяет составить теоретическую геолого-тектоническую модель территории и выделить перспективные объекты на нефть и газ на конкретных глубинах, которые практически совпадают с данными геофизических и геохимических исследований.

Выводы

1. Предложенный новый структурно-метрический (сейсмоаэрокосмический) метод существенно отличается от ранее известных структурно-геоморфологического и морфо-метрического методов. Отличается основательной теоретической базой, комплексным подходом и очевидной практической значимостью.
2. По примеру предложенной интерпретации и построения геолого-тектонической Нурин-Хагской структуры возможно его применение практически во всех регионах.
3. Теоретическая модель подтверждена геофизическими и геохимическими методами.
4. На Нурин-Хагской площади в Калмыкии рекомендуется бурение скважины на нефть и газ глубиной не менее 4 км.

Библиографический список

1. Гзовский М.В.. Тектонофизика. М.: Недра, 1975.
2. Жуков В.Т.. Новое использование данных аэрокосмической съемки для прогноза месторождений нефти и газа / В.Т. Жуков, Г.Е. Лазарев, М.Н. Ломоносов, В.В. Хвостов. М.: ВИНТИ, 1999.
3. Дроздов В.В., В.П. Бигун, М.П. Голованов. Новейшая тектоника и нефтегазоносность Центрального Предкавказья. Сборник научных трудов. Серия «Тектоника и геодинамика». Вып. 1. Ставрополь, 2002. С. 8–16.
4. Смирнова С.Н. Нефтегазоносные кольцевые структуры и научно-методические аспекты их изучения. Библиотеки Дамирджани, Геология нефти и газы №9, 1997.

5. Соловьев В.В. Структуры центрального типа территории СССР по данным геолого-геоморфологического анализа. Объяснительная записка к карте морфоструктур центрального типа территории СССР, масштаб 1:1000000. Л.: 1978.
6. Харченко В.М.. Природа структур центрального типа и закономерности распространения залежей углеводородов, локальных и региональных очагов землетрясений. Ставрополь: Вестник СевКавГТУ, №2(6). 2006. С. 48–53.

References

1. Gzovsky M.W. Tectonophysics. M.: Nedra, 1975. (In Russ.)
2. Zhukov V.T. New use of aerospace survey data for forecasting oil and gas fields / V.T. Zhukov, G.E. Lazarev, M.N. Lomonosov, V.V. Tails. M.: VINITI, 1999. (In Russ.).
3. Drozdov V.V., Bigun V.P., Golovanov M.P. The newest tectonics and oil and gas potential of the Central Ciscaucasia. Collection of scientific papers. Series "Tectonics and geodynamics." Issue 1. Stavropol, 2002. P. 8–16. (In Russ.).
4. Smirnov S.N. Oil and gas ring structures and scientific and methodological aspects of their study. Damirjani Libraries, Oil and Gas Geology, No. 9, 1997. (In Russ.).
5. Solovyov V.V. The structure of the central type of the territory of the USSR according to geological and geomorphological analysis. Explanatory note to the map of morphostructures of the central type of the territory of the USSR, scale 1: 1,000,000. L.: 1978. (In Russ.).
6. Kharchenko V.M. The nature of the structures of the central type and the pattern of distribution of hydrocarbon deposits, local and regional earthquake sources. Stavropol: Herald of North Caucasus State Technical University, №2 (6). 2006. C. 48–53. (In Russ.).

Об авторах

Харченко Владимир Михайлович, Доктор геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа Северо-Кавказского федерального университета (СКФУ), 355000, г. Ставрополь, пр. Кулакова 16/1 (корпус 16). Телефон: +7(906)-468-22-64, E-mail: gng@ncstu.ru.

Лапта Денис Васильевич, аспирант кафедры геологии нефти и газа Северо-Кавказского федерального университета (СКФУ), 355000, г. Ставрополь, пр. Кулакова 16/1 (корпус 16). Телефон: +7(906)-491-34-26, E-mail: d.lapta@yandex.ru.

About the authors

Kharchenko Vladimir Mikhailovich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor at the Department of Geology of Oil and Gas, North-Caucasian Federal University (NCFU), 355000, Stavropol, 16/1 Kulakov Ave. (building 16). Phone: +7(906)-468-22-64, E-mail: gng@ncstu.ru.

Lapta Denis Vasilievich, a graduate student of the Department of Oil and Gas Geology of the North Caucasus Federal University (NCFU), 355000, Stavropol, Klakova Ave. 16/1 (building 16). Phone: +7(906)-491-34-26, E-mail: d.lapta@yandex.ru.

25.00.23

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ,
ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

УДК 551.583

**Ашабоков Б.А.^{1,2},
Ташилова А.А.¹,
Кешева Л.А.^{1*}**

1 Высокогорный геофизический институт, Россия
2 Институт информатики и проблем регионального управления
КБНЦ РАН, Россия
* kesheva.lara@yandex.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗА СНЕЖНОГО ПОКРОВА В КАВКАЗСКОМ РЕГИОНЕ МЕТОДОМ СИНГУЛЯРНО- СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Введение:

Изменения режима зимних осадков и снежного покрова могут считаться комплексным индикатором климата холодного сезона, отражающим изменения режима температуры, режима осадков, частоты оттепелей и т.д. Запасы воды в снеге играют определяющую роль при весеннем половодье, влияют на увлажнение почвы при севе яровых и росте озимых культур. Следует подчеркнуть важность знания закономерностей распределения осадков в холодный период для оценки агроклиматических ресурсов республики, к которым относится и снежный покров.

Материалы и методы исследований:

Прогноз изменений характеристик снежного покрова является не менее важной проблемой, чем прогноз изменений климата (температуры и жидких осадков). В данной работе на основе данных метеопараметров, предоставленных Северо-Кавказским УГМС, были получены осредненные ряды среднедекадной высоты снежного покрова и числа дней со снежным покровом для юга европейской территории России (ЕТР). С использованием метода сингулярно-спектрального анализа («Гусеница»-SSA) проанализирована динамика и исследованы прогностические возможности метода SSA для высоты снежного покрова и числа дней со снежным покровом на юге ЕТР. Метод SSA представляет собой инструмент для анализа и прогнозирования одномерных и многомерных временных рядов. На основе проведенного Т-теста показана эффективность применения рекуррентного R-SSA прогноза среднегодовой высоты снега и числа дней со снежным покровом.

Результаты исследований и их обсуждение:

Для всех рассмотренных метеорологических величин была получена периодичность их изменения, стандартное отклонение, максимальное отклонение и относительная ошибка. В результате подбора главных компонент (1, 3 и 13) были получены прогнозные тенденции изменения исследуемых переменных, выявлены периоды их увеличения и снижения, а также получены прогнозные значения среднедекадной высоты снежного покрова и числа дней для периода 2018-2022 гг.

Выводы:

В результате применения метода сингулярно-спектрального анализа, осуществлен прогноз таких характеристик снежного покрова юга ЕТР как среднедекадная высота снежного покрова и число дней со снежным покровом юга ЕТР на 2018-2022 гг. Выявленные общие тенденции изменения исследуемых характеристик снежного покрова юга ЕТР на период до 2022 г. позволяют характеризовать региональные изменения климата юга европейской части России как составную часть современного глобального потепления.

Ключевые слова:

высота снежного покрова, сингулярно-спектральный анализ, прогноз, главные компоненты, остатки модели, Т-тест.

Ashabokov B.A.
Tashilova A.A.
Kesheva L.A.

High Mountain Geophysical Institute, Russia

Institute of Informatics and Regional Management Problems, KBNC RAS, Russia

RESULTS OF SNOW COVER FORECAST IN THE CAUCASUS REGION USING THE METHOD OF SINGULAR-SPECTRAL ANALYSIS

- Introduction:** Changes in the mode of winter precipitation and snow cover can be considered as a complex indicator of the climate of the cold season, reflecting changes in the temperature regime, precipitation mode, the frequency of thaws, etc. Water reserves in the snow play a decisive role during the spring flood, affect soil moisture during the sowing of spring crops and the growth of winter crops. The importance of knowing the patterns of distribution of precipitation during the cold period for assessing the agro-climatic resources of the republic, which includes snow cover, should be emphasized.
- Materials and methods of research:** The forecast of changes in snow cover characteristics is no less important than the forecast of climate changes (temperature and liquid precipitation). In this work, based on the meteorological data provided by the North Caucasian UGMS, we obtained the averaged series of the average decade height of snow cover and the number of days with snow cover for the south of the European territory of Russia (ETR). Using the method of singular-spectral analysis ("Caterpillar" -SSA), the dynamics were analyzed and the prognostic capabilities of the SSA method for the height of snow cover and the number of days with snow cover in the south of ETR were investigated. The SSA method is a tool for analyzing and predicting one-dimensional and multidimensional time series. On the basis of the T-test, the effectiveness of the recurrent R-SSA forecast of the average annual height of snow and the number of days with snow cover is shown.
- Results of the study and their discussion:** For all the meteorological quantities considered, the periodicity of their changes, the standard deviation, the maximum deviation and the relative error were obtained. As a result of the selection of the main components (1, 3, and 13), prognostic trends of changes in the studied variables were obtained, periods of their increase and decrease were revealed, and predicted values of the average decade height of snow cover and the number of days for the period 2018–2022 were obtained.
- Conclusions:** As a result of the use of the method of singular-spectral analysis, the forecast of such snow cover characteristics of the southern ETR, such as the average decade height of the snow cover and the number of days with snow cover of the southern ETR for 2018–2022, was made. The identified general trends in the studied characteristics of snow cover in the south of the ETR for the period up to 2022 allow characterizing regional climate changes in the south of the European part of Russia as an integral part of contemporary global warming.
- Key words:** snow depth, singular-spectral analysis, prediction, main components, model residuals, T-test.

Введение

Изменения режима зимних осадков и снежного покрова (СП) могут считаться комплексным индикатором климата холодного сезона, отражающим изменения режима температуры, режима осадков, частоты оттепелей и т.д. Несмотря на значительные потребности в достоверной информации об изменениях характеристик зимних осадков и формирования снежного покрова в различных климатических зонах юга России, влияющего на

жизнедеятельность и продуктивность природных экосистем и сельскохозяйственных культур, региональные особенности современных климатических изменений и их последствий до настоящего времени недостаточно изучены.

На фоне глобального потепления, наблюдаемого в последние десятилетия, происходят изменения всех характеристик снежного покрова [1, 2, 3]. При потеплении климата ожидается сокращение площади снежного покрова на значительной части территории страны. Кроме того, следует подчеркнуть важность знания закономерностей распределения снежного покрова для оценки климатических ресурсов страны, к которым, несомненно, относится снежный покров. Изменения климата и вызванные этим последствия неоднородны в пространстве и по сезонам, в частности, это касается и основных характеристик снежного покрова: среднедекадной высоты снега, числа дней со СП.

Увеличение продолжительности залегания снежного покрова на европейской территории России сопровождается ростом средней за зимний период высоты снежного покрова. Тенденции роста средней за зимний период высоты снежного покрова наблюдаются на большей части территории России.

В Климатической доктрине Российской Федерации говорится, что поскольку значительная часть территории Российской Федерации находится в области максимальных (как наблюдаемых, так и прогнозируемых) изменений климата, то надо учитывать особенности Российской Федерации при решении проблемы изменений климата.

Методы и материалы исследований

Наблюдения за снежным покровом начинаются в осенний период с момента появления первого (временного) снежного покрова и продолжаются до полного его исчезновения в весенний период. **Снежный покров** наблюдается по установленным стационарно (постоянным) рейкам и с помощью снегосъемок. Число дней со снежным покровом измеряются только по постоянной рейке. Для характеристики среднедекадной высоты снежного покрова вычисляют средние ее значения по декадам месяцев холодного сезона. По отсчетам трех реек ежедневно вычисляется среднее значение снежного покрова. Значение меньше 0,5 см, записывается как 0, большее или равное 0,5 см, как 1 см. Для оценки продолжительности залегания снежного покрова используются число дней с покрытием снегом более 50 % территории вокруг метеостанции.

Объектом исследования в данной статье является прогноз характеристик снежного покрова (среднедекадная высота снежного покрова и число дней со снежным покровом) в холодный период на юге европейской территории России до 2022 года. В основу исследований положены материалы многолетних наблюдений с 1960 по 2017 гг. высоты снежного покрова и дней со снежным покровом по данным м/станций Владикавказ, Изобильный, Каменномостский, Кисловодск, Майкоп, Моздок, Нальчик, Прохладная, Ставро-

поль, Теберда, Черкесск (данные предоставлены Северо-Кавказским управлением гидрометеослужбы Российской Федерации).

Для получения среднегодового ряда усреднялись среднедекадные высоты за 7 месяцев (октябрь, ноябрь, декабрь, январь, февраль, март, апрель) холодных сезонов 1960/61–2016/17 гг. Был проведен пошаговый анализ и прогноз высоты снежного покрова и числа дней со снежным покровом методом «Гусеница SSA» для 11 м/станции [4–6]. Результатом применения метода является разложение временного ряда на простые компоненты: медленные тренды, сезонные и другие периодические или колебательные составляющие, а также шумовые компоненты. Полученное разложение может служить основой прогнозирования, как самого ряда, так и его отдельных составляющих.

Техническую основу метода сингулярно-спектрального анализа («Гусеница»-SSA) составляет сингулярное разложение матрицы, столбцами которой являются вектора – отрезки ряда длины L , основного параметра метода, называемого шириной окна. Для того, чтобы выделить какую-то составляющую ряда или отделить сигнал от шума, необходимо найти соответствующие искомым составляющей компоненты разложения, сгруппировать их и восстановлением получить искомым ряд. Метод сингулярно-спектрального анализа (SSA), используемый в работе, позволяет сделать следующее:

- выделить конечное число компонент во временных рядах, которые были рассмотрены в рассматриваемых регулярных интервалах;
- найти скрытые периодичности;
- на основе отобранных компонентов произвести сглаживание начальных данных;
- извлечь компоненты с известным периодом;
- прогнозировать будущие значения в наблюдаемой зависимости [7, 8].

Качество прогноза в нашей работе проверялось с использованием фактического ряда (1992–2012 гг.) по расчетам следующих критериев:

- 1) стандартное отклонение и максимальное отклонение прогнозных значений от фактических;
- 2) Т-тест для получения статистически значимой разницы (или равенства) между средними значениями фактического ряда (1992–2012 гг.) и прогнозного ряда на этот же период;
- 3) относительная ошибка прогноза δ (%):

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{\phi} - y_{\text{пр}}}{y_{\phi}} \right| \cdot 100\% \quad (1)$$

где $y_{\text{пр}}$ – прогнозные значения на интервале упреждения 1992–2012 гг.;
 y_{ϕ} – фактические значения на интервале 1992–2012 гг.

Результаты исследований и их обсуждение

Прогноз характеристик снежного покрова юга ЕТР, а также общие тенденции изменения исследуемых характеристик был осуществлен методом сингулярно-спектрального анализа (SSA). Был проведен пошаговый анализ и прогноз высоты снежного покрова и числа дней со снежным покровом методом «Гусеница SSA». Для исследования структуры ряда было проведено преобразование, разложение, группировка и восстановление ряда, для чего использовался вариант метода «Гусеница SSA» без центрирования матрицы наблюдений, соответствующей ряду. Была рассмотрена периодограмма среднедекадной высоты снежного покрова за исследуемый период и выделены наиболее значительные периоды ряда, соответствующие максимальным мощностям. Если временной ряд имеет спектральное разложение вида:

$$X(t) = M(x) + A_n \cos \omega_n \tau + B_n \sin \omega_n \tau \quad (2)$$

то периодограмма состоит из точек $(\omega_n; A_n^2 + B_n^2)$. Величина $P = (A_n^2 + B_n^2)$ – это квадрат модуля, характеризующий мощность соответствующей гармоники с периодом T . Большой пик в области некоторой частоты ω_n указывает на то, что в спектральном разложении автокорреляционной функции присутствует соответствующая гармоническая компонента. Чем выше и резче выделен пик, тем большая часть мощности сосредоточена около частоты ω_n и тем большую роль играет эта частота в описании соответствующего случайного процесса или временного ряда. Определены периоды изменения высоты снежного покрова на юге России, соответствующие максимальным пикам мощности: 17 лет, 10 лет, 8 лет, 5 лет.

Для анализа структуры временного ряда методом SSA были подобраны оптимальные параметры – ширина окна и количество главных компонент (ГК). Возьмем ширину окна, равную $L = 20$ ($L = 52 - 33 + 1$). Далее были определены коэффициенты для линейно-рекуррентной формулы (3), описывающей восстановленный ряд:

$$f_n = C_1 0,996^n + C_2 1,011^n \cos\left(\frac{2\pi n}{6,47} + \varphi_2\right) + C_3 0,992^n \cos\left(\frac{2\pi n}{4,89} + \varphi_3\right) + C_4 0,983^n \cos\left(\frac{2\pi n}{17,28} + \varphi_4\right) + C_5 0,978^n \cos\left(\frac{2\pi n}{2,24} + \varphi_5\right) + C_6 0,974^n \cos\left(\frac{2\pi n}{3,14} + \varphi_6\right) + C_7 0,97^n \cos 2\pi n / 3,99 + \varphi_7 \quad (3)$$

После восстановления и аппроксимации ряда линейно-рекуррентной формулой (3) провели прогнозирование ряда (жирная ломаная, рис. 1). Для проверки качества прогноза взяли упреждающий ряд с 1992 г. Используя метод сингулярно-спектрального анализа построили прогнозный ряд с 1992 по 2012 год, и продолжили прогноз на последующие десять точек по 2022 г. Вертикальная черная линия отделяет начало прогноза от фактических данных.

Для подтверждения адекватности модели исходному ряду необходимо доказать, что ряд остатков является случайным и подчиняется нормальному закону распределений. Поэтому следующее предположение состоит в

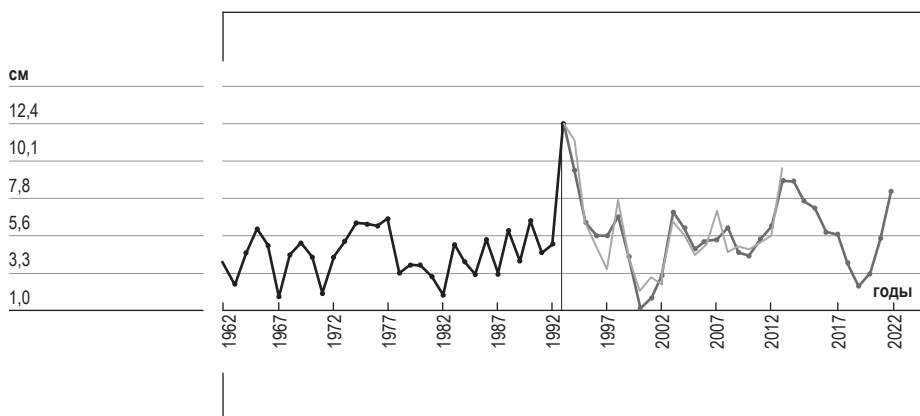


Рис. 1. Рекуррентный способ прогноза ряда среднекадной высоты снежного покрова на 1992–2022 гг. (L = 20, ГК (1–3))

Fig. 1. Recurrent method of forecasting a number of average decade height of snow cover for 1992–2022 (L = 20, GK (1–3)).

том, что ряд остатков (ошибок), на основе которого строится прогноз, должен состоять из независимых одинаково распределенных случайных величин. В этом случае мы можем пользоваться выборочной моделью для прогноза. Таким образом, остатки должны быть:

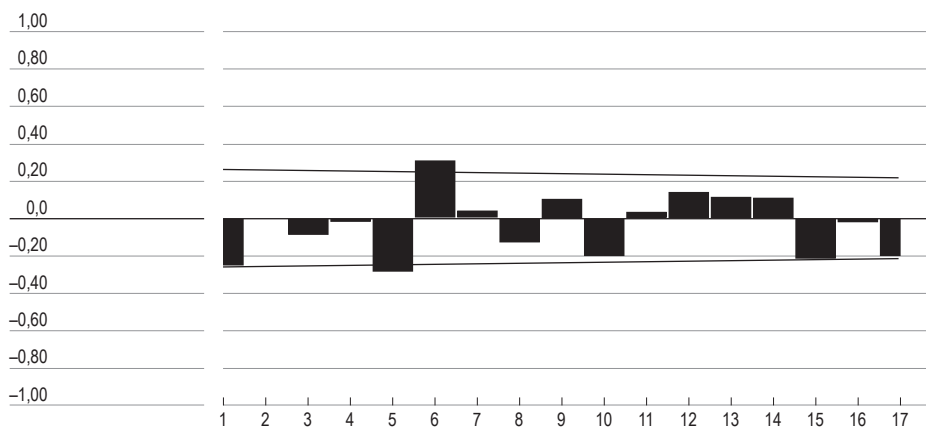
- а) некоррелированные,
- б) нормально распределены.

На рисунке 2 видно, что автокорреляционная функция в целом подтверждает некоррелированность остатков и сравнение теоретической и эмпирической функций распределения подтверждает нормальность остатков.

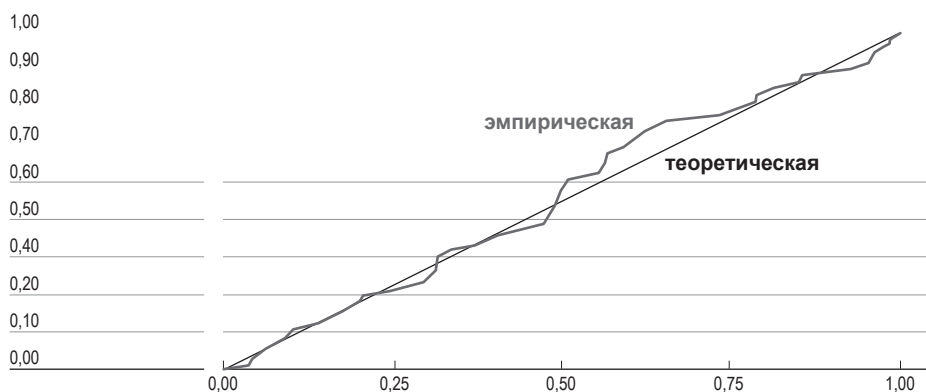
Таким образом, можно считать, что структура временного ряда выявлена и восстановлена, поэтому структура ряда была продолжена, то есть был получен прогноз (продолжение) временного ряда. Результаты прогноза представлены в таблице 1.

Точность прогноза

1. Стандартное отклонение 1,03 см;
2. Максимальное отклонение 2,05 см;
3. Относительная ошибка 17,7 %;
4. Т-тест (Sig. 0,91 > 0,05) 5,7 см (исходный) $\approx$ 5,6 см (прогнозный).



а) автокорреляция остатков
a) autocorrelation of the remains



б) нормализованный график остатков восстановленного ряда
b) the normalized schedule of the remains of the restored row

Рис. 2.

Анализ нормальных остатков.

Fig. 2. Analysis of normality of the remains.

Минимальное значение высоты снега 2,3 см придется на 2019 год. Далее ожидается увеличение высоты снега до 8,2 см в 2022 году.

При использовании одной главной компоненты получили общую положительную тенденцию тренда (рис. 3) из которой следовало, что увеличения среднедекадной высоты снега с 1992 года продолжает тенденцию, выявленную за период 1961–1991 гг.

Таблица 1. ПРОГНОЗ СРЕДНЕДЕКАДНОЙ ВЫСОТЫ СНЕЖНОГО ПОКРОВА
Table 1. Forecast of a decade height of snow cover

№ п/п	Годы	Исходный ряд, см	Прогнозный ряд, см	№ п/п	Годы	Исходный ряд, см	Прогнозный ряд, см
1	1961	3,8	–	38	1998	3,9	4,2
...	...	...	...	39	1999	2,0	1,0
32	1992	12,4	12,4	...	...	...	...
33	1993	11,4	9,5	58	2018	–	3,8
34	1994	6,3	6,3	59	2019	–	2,3
35	1995	4,6	5,5	60	2020	–	3,1
36	1996	3,4	5,5	61	2021	–	5,3
37	1997	7,8	6,6	62	2022	–	8,2

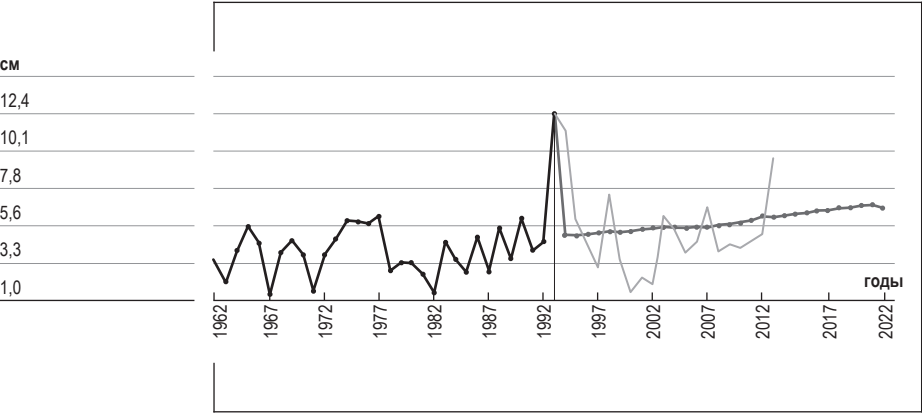


Рис. 3. Прогноз среднедекадовой высоты снежного покрова, 1992–2022 гг. (ГК1).
Fig. 3. Forecast of average decade height of snow cover, 1992–2022 (GK1).

Были проведены аналогичные исследования по прогнозу числа дней со снежным покровом на юге России (рис. 4). Выявленные периоды в ряду продолжительности залегания снежного покрова составляют 17 лет, 10 лет, 4 и 5 лет.

Точность прогноза

- 1. Стандартное отклонение 8 дней
- 2. Максимальное отклонение 15 дней
- 3. Относительная ошибка 11,6 %;
- 4. Т-тест (Sig. 0,982 > 0,05) 61,3 (исходный) ≈ 61,4 (прогнозный).

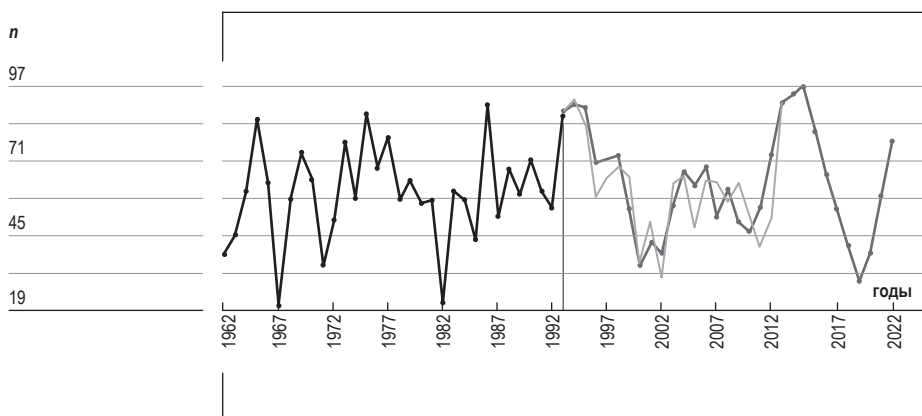


Рис. 4.

Прогноз числа дней со снежным покровом, 1992–2022 гг., (L=23, GK=10).

Fig. 4. Forecast of the number of days with snow cover, 1992–2022, (L = 23, GK=10).

Периодичность изменения ряда за исследуемый период:
4 года, 5 лет, 10 лет, 17 лет.

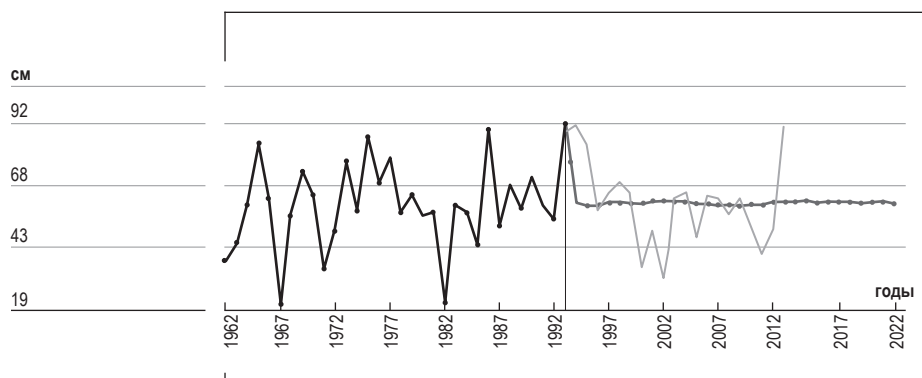
Из рисунка 5 видно, что при ГК1 имеем медленный тренд, характеризующий тенденцию снижения числа дней со снежным покровом и продолжительности залегания снежного покрова на юге ЕТР.

При выбранном количестве главных компонент, равном трем, $GK = 3$, получили прогнозную кривую близкую к синусоиде, демонстрирующую периоды увеличения и снижения тенденции числа дней со снегом. С 2005 года по 2022 год прослеживается период снижения продолжительности залегания снежного покрова на юге ЕТР.

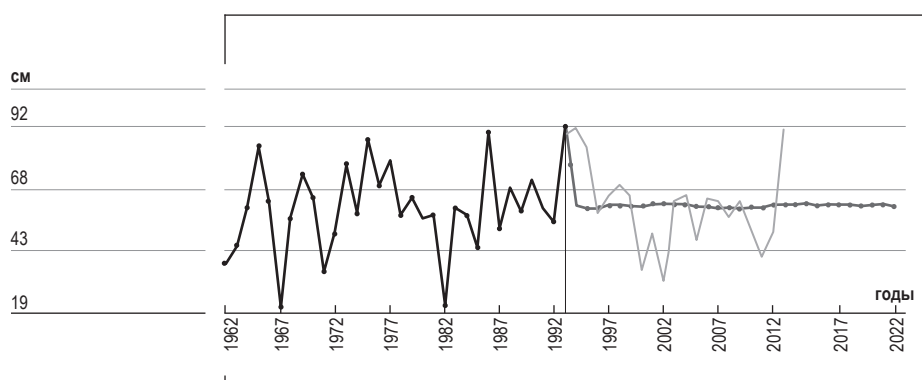
Выводы

Нелинейные тренды значений высоты снежного покрова и числа дней со снежным покровом, полученные с помощью метода SSA, демонстрируют наличие осцилляций колебаний с общими периодами порядка 17, 10 и 5 лет. Настоящий временной этап (сезоны 2018/19 гг. и 2019/20 гг.) соответствует минимуму в ожидаемых значениях высоты снежного покрова (2,3 см и 3,1 см) и числа дней (36 и 34 дня). В дальнейшем (сезон 2021/22 г.) можно ожидать периода локального похолодания с максимальной высотой снежного покрова (8,2 см) и числа дней (66 дня).

Все полученные тенденции прогнозных значений характеристик снежного покрова на 2018–2022 гг. продолжают тенденции изменений характеристик снежного покрова за 1961–2017 гг. и позволяют характеризовать региональные изменения климата юга европейской части России как составную часть современного глобального потепления.



а) восстановленный ряд числа дней со СП по одной главной компоненте (ГК1);
 б) restored series of the number of days with snow cover on one main component



а) восстановленный ряд числа дней со СП по трем главным компонентам (ГК3);
 б) restored series of days with snow cover by three main component (GK3)

Рис. 5. Тенденции изменения числа дней со снежным покровом.
 Fig. 5. Trends in the number of days with snow cover.

Библиографический список

1. IPCC. Summary for Policy-makers of the Special Report "Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation," Ed. by C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, et al. Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge, New York, USA, 2012).
2. Roshydromet's Second Assessment Report on Climate Change and its Consequences on the Territory of the Russian Federation. (2013) Rosgidromet, Moscow. 1009.
3. 16th Session of the Commission for Climatology (CCI-16), Heidelberg, Germany, 3–8 July 2014. Resource: www.ccl-16.wmo.int

4. ашилова А.А., Кешева Л.А. Анализ высоты снежного покрова в предгорной части Северного Кавказа // Международная научная конференция по региональным проблемам гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. Казань, 2012. С. 206–207.
5. Ташилова А.А., Кешева Л.А., Пшихачева И.Н., Таубекова З.А. Возможности прогнозирования временного климатического ряда с помощью метода «Гусеница» -SSA // Сборник научных трудов Международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». Ставрополь, 2013. С.86–89.
6. Структурный анализ и прогноз зимних осадков методом «Caterpillar»-SSA / А.А. Ташилова [и др.] // Доклады АМАН. 2013. №1. С. 103–106.
7. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница» -SSA Прогноз временных рядов. СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. 52 с.
8. Caterpillar-SSA Copyright © 1996-2018 GistaT Group. All rights reserved. Access mode: <http://www.gistatgroup.com> (date of application: 20.02.2018).

References

1. IPCC. Summary for Policy-makers of the Special Report "Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation," Ed. by C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, et al. Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge, New York, USA, 2012).
2. Roshydromet's Second Assessment Report on Climate Change and its Consequences on the Territory of the Russian Federation. (2013) Roshidromet, Moscow. 1009.
3. 16th Session of the Commission for Climatology (CCI-16), Heidelberg, Germany, 3-8 July 2014. Resource: www.ccl-16.wmo.int.
4. Tashilova A.A., Kesheva L.A. Analiz vysoty snezhnogo pokrova v predgornoy chasti Severnogo Kavkaza (Analysis of snow depth in the foothills of the North Caucasus)// Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya po regional'nym problemam gidrometeorologii i monitoringa okruzhayushchey sredy. Kazan', 2012. P. 206–207. (in Russ).
5. Tashilova A.A., Kesheva L.A., Pshikhacheva I.N., Taubekova Z.A. Vozmozhnosti prognozirovaniya vremennogo klimaticheskogo ryada s pomoshch'yu metoda «Gusenitsa» -SSA (The predictive ability of the temporary climatic series using the method of "Caterpillar"-SSA) // Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii s elementami nauchnoy shkoly «Innovatsionnyye metody i sredstva issledovaniy v oblasti fiziki atmosfery, gidrometeorologii, ekologii i izmeneniya klimata». Stavropol', 2013. P. 86–89. (in Russ).
6. Strukturnyy analiz i prognoz zimnikh osadkov metodom «Gusenitsa»-SSA (Structural analysis and prediction of winter precipitation method "Caterpillar"-SSA) / A.A. Tashilova [i dr.] // «Doklady AMAN». 2013. №1. P. 103–106. (in Russ).

7. Golyandina N.E. Metod «Gusenitsa»-SSA Prognoz vremennykh ryadov. (The method of "Caterpillar"-SSA Forecast time series). SPb: Izd-vo SPbGU, 2004. 52 p. (in Russ).
8. Caterpillar-SSA Copyright © 1996-2018 GistaT Group. All rights reserved. Access mode: <http://www.gistatgroup.com> (date of application: 20.02.2018).

Об авторах

- Ашабоков** Борис Азреталиевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом физики облаков Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт» (ФГБУ «ВГИ»), заведующий отделом математических методов исследования сложных систем и процессов ФГБУН «Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН». Scopus ID: 6505916110 Researcher ID: K-4299-2015, Телефон (928) 707-29-52, E-mail: ashabokov.boris@mail.ru.
- Ташилова** Алла Амарбиевна, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела физики облаков ФГБУ «ВГИ». Scopus ID: 57191577384, Researcher ID: K-4321-2015, Телефон (928) 692-46-29, E-mail: tashilovaa@mail.ru.
- Кешева** Лара Асировна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела физики облаков ФГБУ «ВГИ». Scopus ID: 57191577471, Researcher ID: K-4261-2015, Телефон (903) 490-47-75, E-mail: kesheva.lara@yandex.ru.

About the authors

- Ashabokov** Boris Azretaliyevich, doctor of physical and mathematical sciences, professor, head of department of physics of clouds of Federal state budgetary institution "High-Mountain Geophysical Institute", head of department of mathematical methods of a research of difficult systems and processes of FGBUN "Institute of Computer Science and Problems of Regional Management, Kabardino-Balkaria Research Center, Russian Academy of Sciences". Scopus ID: 6505916110 Researcher ID: K-4299-2015, Phone: (928) 707-29-52, E-mail: ashabokov.boris@mail.ru.
- Tashilova** Alla Amarbiyevna, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, senior research associate of department of physics of clouds of Federal state budgetary institution "High-Mountain Geophysical Institute", Scopus ID: 57191577384 Researcher ID: K-4321-2015, Phone: (928) 692-46-29, E-mail: tashilovaa@mail.ru.
- Kesheva** Lara Asirovna, candidate of physical and mathematical sciences, senior research associate of department of physics of clouds of Federal state budgetary institution "High-Mountain Geophysical Institute". Scopus ID: 57191577471 Researcher ID: K-4261-2015, Phone: (903) 490-47-75, E-mail: kesheva.lara@yandex.ru.

25.00.24

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, ПОЛИТИЧЕСКАЯ
И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

УДК: 911.3

Ткачева Т.А.

Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия
tatianasurneva@yandex.ru

ТУРИСТСКИЙ ОБРАЗ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА В ПРЕДСТАВЛЕНИЯХ НАСЕЛЕНИЯ РОССИИ

Введение:

Обоснована актуальность исследования туристского образа Северного Кавказа в представлениях населения России. С помощью историко-географического метода выделены четыре основных этапа в трансформации образа исследуемого макрорегиона: «Кавказ – новая территория и молодой курорт», «Северный Кавказ – житница и здравница», «Северный Кавказ – горячая точка», «Северный Кавказ – туристский центр».

Материалы и методы
исследования.

Информационную базу исследования составили материалы контент-анализа средств массовой информации и социологического опроса населения. Контент-анализ основан на мониторинге СМИ информационно-аналитической системы Медиалогия. Соцопрос проводился в он-лайн режиме, всего в нем приняли участие триста респондентов из девятнадцати субъектов России. В качестве интегральной характеристики восприятия географического пространства введен коэффициент отношения населения к территории (КОНТ).

Результаты исследования

и их обсуждение:

Проведенный контент-анализ позволил выявить географию публикаций о Северном Кавказе и о его туристской отрасли. Исследование показало, что туристский образ Северного Кавказа в медиапространстве очень многогранен и складывается из большого числа элементов, которые разделяются на следующие группы: природные особенности, культурная среда, бренды, туристская инфраструктура и сервис. Проведенный социологический опрос показал насколько деформированы представления населения России о Северном Кавказе. Представлены ментальные карты границ Северного Кавказа, его наиболее популярных курортов, и карта наиболее распространенных ассоциаций с субъектами СКФО. Проведен анализ позитивных, нейтральных и негативных ассоциаций, выявлены их географические закономерности. Интегрируя ответы населения, на основе коэффициента отношения населения к территории, была составлена типология регионов России по характеру восприятия туристского образа Северного Кавказа.

Выводы:

На основе проведенного исследования сделан ряд выводов о структуре, элементах и особенностях туристского образа Северного Кавказа, его месте федеральном и региональном медиапространстве России. Установлена географическая детерминанта в восприятии населением туристского образа Северного Кавказа.

Ключевые слова:

география образов, образ территории, туристский образ территории, имидж территории, Северный Кавказ, аттрактивность территории.

Tkacheva T.A.North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia
tatianasumeva@yandex.ru**TOURIST IMAGE OF THE NORTHERN CAUCASUS
IN THE REPRESENTATIONS OF THE POPULATION
OF RUSSIA**

Introduction. The relevance of the study of the tourist image of the North Caucasus in the views of the Russian population is substantiated. With the help of the historical-geographical method, four main stages in the transformation of the image of the studied macro-region are highlighted: «Caucasus is new territory and young resort», «North Caucasus is the breadbasket and health resort», «North Caucasus is hot spot», «Northern Caucasus is tourist center».

**Materials and research
methods:**

The information base of the research consists of content analysis of the mass media and a sociological survey of the population. Content analysis is based on media monitoring of the information-analytical system Medialogia. The poll was conducted online; in total, three hundred respondents from nineteen subjects of Russia took part in it. As an integral characteristic of the perception of geographic space, the ratio of population to territory has been introduced.

Results and discussion: Conducted content analysis revealed the geography of publications about the North Caucasus and its tourism industry. The study showed that the tourist image of the North Caucasus in the media space is very multifaceted and consists of a large number of elements that are divided into the following groups: natural features, cultural environment, brands, tourist infrastructure and service. A sociological survey showed how distorted the perception of the Russian population about the North Caucasus. Presented are mental maps of the borders of the North Caucasus, its most popular resorts, and a map of the most common associations with subjects of the North Caucasus Federal District. The analysis of positive, neutral and negative associations was carried out, their geographical patterns were revealed. Integrating the responses of the population, based on the ratio of the population to the territory, a typology of Russian regions was compiled by the nature of the perception of the tourist image of the North Caucasus.

Findings:

Based on the study, a number of conclusions were made about the structure, elements and features of the tourist image of the North Caucasus, its place in the federal and regional media space of Russia. The geographical determinant in the perception by the population of the tourist image of the North Caucasus is established.

Keywords:

geography of images, image of the territory, tourist image of the territory, image of the territory, the North Caucasus, attractiveness of the territory.

ВВЕДЕНИЕ

Представления об окружающем пространстве формируются в процессе приобретения человеком жизненного опыта и составляют информационную базу для принятия решений. Сложившиеся образы той или иной территории во многом определяют ее аттрактивность, порождают желание ее посетить, влияют на объемы, структуру и географию туристских потоков. При этом образ территории – это сложная и подвижная категория, в его структуре имеются как более или менее устойчивые, так и быстро меняющиеся под влиянием экономических, социальных, геополитических и др. факто-

ров элементы. Важным индикатором таких изменений являются представления населения.

По мере освоения территории Северного Кавказа и присвоению ему различных функций, а также по мере происходящих на его территории событий, изменялся и образ Северного Кавказа [7]. В трансформации образа исследуемого макрорегиона можно выделить четыре основных этапа:

1. *«Кавказ – новая территория и молодой курорт»*

(период присоединения Кавказа к России). В характеристике образа Кавказа, еще не поделенного ментально на Северный и Южный, Предкавказье и Закавказье, можно выделить основные черты: Уже тогда складывалось понимание особой важности данной территории для безопасности Российской Империи; природа Кавказа представлялась диковинной, непривычной и даже устрашающей; основная культурная составляющая образа Кавказа – это его разнообразный этнический состав. Туристский образ Кавказа в представлениях русского общества ассоциировался, главным образом, с Горячими Водами, которые уже тогда считались «целебной землей» и имели преимущественно положительный образ.

2. *«Северный Кавказ – житница и здравница»*

(Советский период). Именно этот образ культивировался на национальном уровне в умах советских граждан. Здесь создавалось большое количество курортов, которые остаются популярными по сей день. В горах было проложено множество туристических маршрутов. Активно развивается туристская инфраструктура – строятся турбазы, санатории, гостиницы, канатные дороги. В стране пропагандируется здоровый образ жизни, а туризм представляется как его неотъемлемая часть. Туристский образ Северного Кавказа выходит за пределы Кавказских Минеральных Вод и распространяется по всем предгорным и горным территориям.

3. *«Северный Кавказ – горячая точка»*

(начало постсоветского периода – 1990-е – первое десятилетие 2000-х гг.). После распада СССР Северный Кавказ снова приобретает статус приграничного. В республиках дестабилизируется политическая обстановка, особенно в Чечне. Представления россиян о Северном Кавказе надолго «испорчены» террористическими актами, захватами заложников, транспортным бандитизмом. В целом Северный Кавказ в этот период является самым проблемным в геополитическом отношении регионом России.

4. *«Северный Кавказ – туристский центр» (с 2010 года).*

В региональной политике возрождаются стратегии развития туристско-рекреационной отрасли. В качестве головной управленческой

структуры появляется ОАО «Курорты Северного Кавказа». Планируется создание серии особых экономических зон туристско-рекреационного типа¹. С этого времени начинает формироваться образ Северного Кавказа как туристской территории новой России.

Строительство новых курортов, привлечение инвестиций совмещалось с началом работы по созданию положительного имиджа Северного Кавказа как туристического центра России. За последние восемь лет произошли заметные сдвиги в развитии туристской инфраструктуры. В рамках Федеральной целевой программы «Развитие внутреннего и въездного туризма в Российской Федерации» (2011–2018) реализовано девять крупномасштабных туристских инвестиционных проектов, общей стоимостью 9508,11 млн руб. [1]. Вместе с тем, разнообразные факторы негативного восприятия Северного Кавказа (окраинное географическое положение, неоднородный этнический и религиозный состав, социально-экономическая нестабильность, а главное, их активное тиражирование СМИ) сохраняют свое воздействие и нивелируют привлекательность колоссального природного и культурно-исторического туристско-рекреационного потенциала, определяют неоднозначность и зачатую амбивалентность образных характеристик макрорегиона. Следовательно, возникает необходимость детального анализа сложившегося образа Северного Кавказа в представлениях населения России с целью выработки рекомендаций по его позитивной трансформации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Информационную базу исследования составили материалы контент-анализа средств массовой информации и социологического опроса населения.

Контент-анализ основан на мониторинге СМИ информационно-аналитической системы Медиалогия [4].²

Автоматизированная система Медиалогия состоит из двух основных частей:

1. База данных средств массовой информации, которая насчитывает более сорока тысяч источников.
2. Автоматизированный аналитический модуль, состоящий из двух частей:

1 Постановление правительства Российской Федерации от 14 октября 2010 г. № 833 «О создании туристического кластера в Северо-Кавказском федеральном округе, Краснодарском крае и Республике Адыгея».

2 Медиалогия – это автоматизированная информационно-аналитическая система, которая производит мониторинг средств массовой информации и медиа анализ. Работа производится в круглосуточном режиме [4].

- 1) работа поисковой системы;
- 2) автоматическая система распознавания и анализа контента.

Система позволяет получать данные по любым СМИ и устанавливать различного рода фильтры, отбирая информацию, например по уровню или типу СМИ, географии или контексту сообщений, расширять или сужать тематику исследования.

В данном исследовании автоматизированная система «Медialogия» использовалась для проведения контент-анализа средств массовой информации различного уровня и типа по запросам «Северный Кавказ» и «Туризм на Северном Кавказе».

Методика заключалась в следующем: на странице запроса веб-интерфейса Медialogии выбирались все необходимые параметры, такие как территория, временной отрезок, суть запроса, уровень (федеральный или региональный) и тип средств массовой информации. Автоматизированная система выводила все сообщения по заданным параметрам, проводя мониторинг более чем 40 000 источников информации. Далее мы проанализировали и визуально отобразили полученную информацию в графо-картографическом виде.

Вторым важным источником получения информации был социологический опрос населения, который проводился в он-лайн режиме. Всего в опросе приняли участие триста респондентов из девятнадцати субъектов Российской Федерации. Анкета включала четыре группы вопросов: вопросы на знания; вопросы на ассоциации; вопросы о пребывании и сложившихся представлениях и предпочтениях, личные вопросы. По результатам анкетирования созданы ментальные карты, которые являются, по мнению Д.Н. Замятина, графическим инвариантом словесной модели географического образа, одним из инструментов изучения имиджевых ресурсов территории [3].

В качестве интегральной характеристики восприятия географического пространства предлагается использовать коэффициент отношения населения к территории (КОНТ).

$$\text{КОНТ} = n/N \times 100,$$

где, n – количество негативных ответов из данного региона,
 N – общее количество ответа из данного региона.

В итоге все регионы страны были разделены на группы по трем градациям – с преобладанием позитивного образа ($\text{КОНТ} > 66$), с преобладанием нейтрального образа ($33 < \text{КОНТ} < 65$), с преобладанием негативного образа ($\text{КОНТ} < 33$).

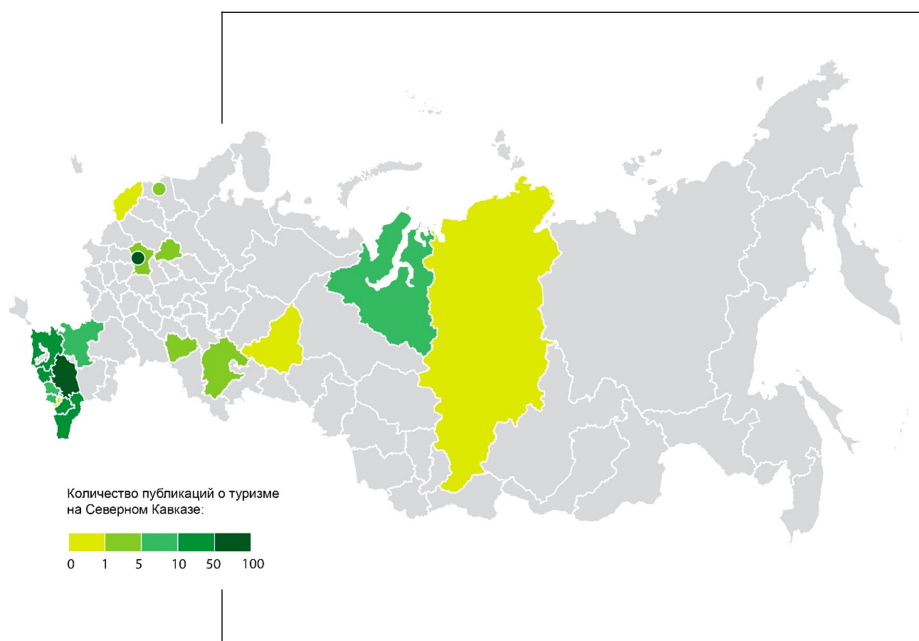


Рис. 1. География публикаций о туризме на Северном Кавказе [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Туристский образ Северного Кавказа в российских СМИ

Средства массовой информации – мощный инструмент формирования образа территории, доброжелательного или недоброжелательного отношения к тому или иному месту. Зачастую именно за счет СМИ создаются и распространяются массовые стереотипы о регионе и его населении [2].

Северный Кавказ, в силу ряда объективных причин, является достаточно уязвимым объектом для информационного воздействия СМИ. О нем пишут достаточно много. Так только за 2018 г. территория была упомянута в более чем семидесяти тысячах публикаций, при этом о приоритетной отрасли развития – туризме информация содержалась только в 240 публикациях. Симптоматично, что половина сообщений о туризме имела нейтральный характер, а треть – негативный и не способствовали возникновению положительных эмоций у потенциальных туристов.

География публикаций о туризме в СКФО достаточно широка, но преобладают федеральные издания и издания регионов Юга Европейской час-

ти России. Из других региональных издательств интерес к туризму на Северном Кавказе проявляли Ханты-Мансийский АО, Санкт-Петербург, Республика Башкортостан, Красноярский край, Самарская, Свердловская, Псковская области. (рис. 1).

Туристский образ Северного Кавказа в медиапространстве очень многогранен и складывается из большого числа элементов, которые можно разделить на следующие группы: природные особенности, культурная среда, бренды, туристская инфраструктура и сервис.

Природная среда.

Чаще всего из природных особенностей упоминаются горы (наибольшей популярностью пользуется Эльбрус), а также горы как ресурс развития горнолыжного туризма. Реже встречаются замечания о минеральных источниках, других гидрографических объектах.

Культурная среда.

Информация об историко-культурном наследии достаточно многолика. Интерес проявляется к следам раннего христианства, одному из древнейших российских городов Дербенту, Лермонтовским местам. Из современных культурных феноменов приоритет принадлежит новой городской архитектуре и религиозным объектам Грозного. Большое внимание уделяется этнографическим особенностям и их туристско-рекреационному потенциалу (например, гостеприимство, пестрота этнокультурных традиций, специфическая кухня). Одновременно довольно упорно продолжают продвигаться негативные ассоциации, например, «кавказцы = террористы».

Бренды.

К наиболее часто упоминаемым брендам относятся ОАО «Курорты Северного Кавказа», Архыз, гора Эльбрус, кавказская кухня (в частности, осетинские пироги, шашлык, хычины, сыр), лезгинка, минеральная вода «Ессентуки» и «Нарзан». Среди северокавказских личностных брендов лидируют М.Ю. Лермонтов и Р. Кадыров.

Туристская инфраструктура и сервис.

Преобладает мнение о неразвитости туристской инфраструктуры и низком уровне сервиса. Но при этом, учитывая большое количество сообщений об инвестициях в инфраструктуру, заключениях соглашений с крупными компаниями, строительстве новых современных курортов, складывается представление о том, что инфраструктурная составляющая динамично развивается. Однако специальной информации об этой проблематике мало, в основном преобладают косвенные сведения.

Туристский образ Северного Кавказа по материалам социологического исследования

Полученные данные свидетельствуют о низком уровне информированности населения России о туризме на Северном Кавказе. Прежде всего, большая доля россиян (около 80%) имеют деформированное представление о составе и границах СКФО. Многие знают только о нескольких субъектах, а некоторые «включают» в его состав соседние регионы и даже территории соседних стран Южного Кавказа. Так около 5% респондентов ответили, что в СКФО входят Грузия, Абхазия, Армения и Азербайджан, приблизительно столько же россиян считают, что Ростовская область и Республика Калмыкия – это тоже СКФО. Особенно интересен тот факт, что, «отделенные» волевым решением от Кавказа в 2010 г., Краснодарский край и Республика Адыгея, в представлениях десятой доли респондентов остались кавказскими регионами и входят в состав СКФО. Только лишь небольшая часть населения (20%) смогли верно назвать регионы округа. Далеко не все россияне имеют представления о реальных субъектах СКФО. Самыми популярными регионами являются Чеченская Республика и Дагестан (их назвали более 80% респондентов), около половины вспомнили о Ставропольском крае, Ингушетии и Карачаево-Черкесии, а вот Кабардино-Балкария и Северная Осетия оказались самыми «забытыми», их упомянули лишь треть опрошенных (рис. 2).

Не смотря на активное развитие туристской отрасли в последние годы, в представлениях жителей России Северный Кавказ не вернул себе пока образа полноценной туристской дестинации. Только 4% респондентов назвали туризм в качестве ведущей отрасли. Многие россияне уверены, что кроме горнолыжного и спортивного видов туризма, здесь не развиты никакие другие. Только треть опрошенных указали лечебно-оздоровительный туризм, и лишь некоторые считают, что в СКФО имеются объекты для культурно-познавательного туризма. Респонденты не смогли назвать ни одного курорта или туристского места на территориях Республик Северная Осетия-Алания и Ингушетия. Мало кто вспомнил о туристских возможностях Чечни и Дагестана. Самой большой туристско-рекреационной известностью обладают регион Кавказских Минеральных вод, Эльбрус, Архыз, Домбай (рис. 3).

Довольно неожиданные результаты были получены в ходе анализа ассоциативных рядов населения. Прежде всего приятно удивило низкое число негативных ассоциаций. Только 13% опрошенных связывают Северный Кавказ с отрицательными образами («терроризм», «конфликты», «бедность», «чеченская война», «преступность»). Наибольшее число негативно настроенных респондентов оказалось в Калининградской, Томской, Мурманской областях, наименьшее – в Воронеже и Волгограде. Из позитивных ассоциаций самые популярные – «красивая природа», «гостеприимство», «чистый воздух», «хорошая кухня», «лезгинка», 80% всех опрошенных ассоциируют Северный Кавказ с горами, что тесно коррелирует с данными контент-анализа.

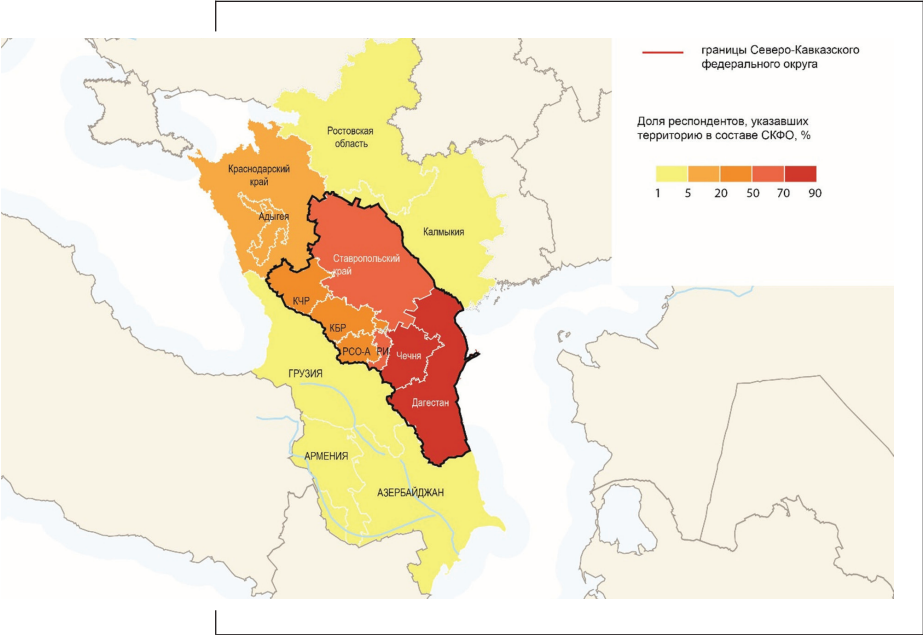


Рис. 2. Ментальные границы Северо-Кавказского федерального округа.

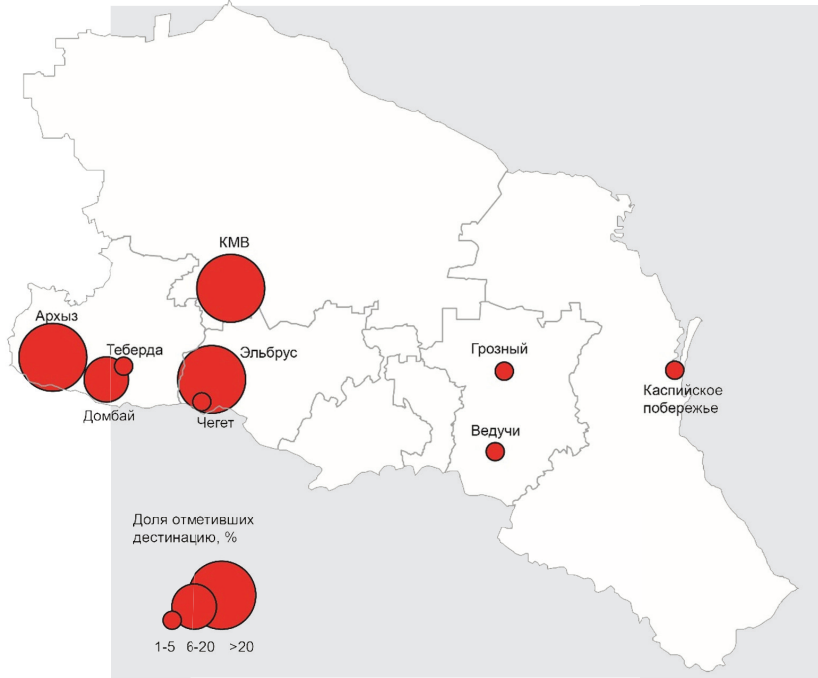


Рис. 3. Наиболее известные туристические места Северо-Кавказского федерального округа.



Рис. 4. Наиболее распространенные ассоциации с субъектами Северо-Кавказского Федерального округа (по данным социологического опроса).

Неоднозначны ассоциации, связанные с населением округа. Нередко со словосочетанием «население Северного Кавказа» возникают такие ассоциации, как «вспыльчивость», «терроризм», «страх», «высокомерие», «конфликтность». Много таких ответов дали респонденты из Калининграда, Санкт-Петербурга и Ленинградской обл. Среди положительных представлений преобладают «гостеприимство», «дружелюбие», «интересные традиции». Несмотря ни на что, большинство россиян считают, что по отношению к туристам кавказское население настроено дружелюбно.

Среди брендовых товаров Северного Кавказа лидируют ожидаемые позиции – «вино и коньяк», «минеральная вода», «овцы и шерсть». Ответы, касающиеся ассоциаций, связанных с отдельными субъектами Северного Кавказа, показали достаточно высокую зависимость ментальных представлений от процессов стереотипизации в СМИ. Так со Ставропольским краем связаны «хлеб» (65%), «поля» (17%), «Кавказские Минеральные Воды» (9%), с Карачаево-Черкесской Республикой – «горы» (71%), «черкесы» (19%), «хычины» (7%). С Республикой Кабардино-Балкария ассоциируются «Эльбрус» (57%), «лезгинка» (23%), «яблоки» (5%), с Республикой Северная Осетия – Алания – «пироги» (81%), «Терек» (9%), «осетинское пиво» (3%), с Республикой Дагестан – «море» (47%), «коньяк» (21%), «Махачкала» (13%), «множество народов» (7%), «лезгинка» (3%). При мысли о Чеченской Республике первыми в голову респондентам приходят «Кадыров» (66%), «Грозный-Сити» (17%),



Рис. 5. Типология регионов России по характеру восприятия населением туристского образа Северного Кавказа

«Мечеть Сердце Чечни» (16%), а при мысли об Ингушетии – «террористы» (53%), «Магас» (7%). В каждом из субъектов СКФО можно выделить преобладающие «ассоциации-лидеры» (рис. 4).

Более 40% опрошенных хотя бы раз посещали Северный Кавказ, у 80% из них осталось хорошее впечатление от поездки, и они хотели бы приехать сюда еще раз. Следует отметить, что практически 90% тех, кто не был на Кавказе, выразили желание побывать здесь с туристическими целями. Среди сдерживающих или ограничивающих туристские поездки факторов названы: «высокая стоимость отдыха» (больше всего таких ответов из Смоленска и Томской обл.), «нехватка времени» – (Москва), «страх за собственную безопасность» – (Калининград, Санкт-Петербург, Томская обл.). Для увеличения туристической привлекательности респонденты советуют «улучшить инфраструктуру» – 61%, «повысить уровень безопасности» – 57% и «рекламировать отдых на Кавказе» – 52%. Более 30% респондентов оценили уровень сервиса как низкий и очень низкий. Такие оценки преобладают среди жителей Калининграда, Санкт-Петербурга, Ленинградской обл., Мурманской обл. и Москвы, несмотря на то, что большинство из них на Северном Кавказе не были. Одновременно, многие из них хотели бы сюда поехать. К числу положительных качеств сервисной составляющей отнесены «радушие», «гостеприимство», «уют».

Интегрируя ответы населения, на основе коэффициента отношения населения к территории, была составлена типология регионов России по харак-

теру восприятия туристского образа Северного Кавказа (регионы с позитивным, нейтральным и негативным восприятием). Наиболее негативный образ Северного Кавказа сформировался у населения г. Санкт-Петербурга, Ленинградской, Мурманской, Калининградской и Томской областей. Положительный образ сформировался у регионов Южного федерального округа, некоторых регионов Центра и Севера Европейской части РФ (рис. 5).

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование позволило выявить некоторые особенности современного туристского образа Северного Кавказа.

1. В медиа пространстве СМИ Северный Кавказ присутствует достаточно активно, как общие, так и региональные тенденции развития. Однако, публикации о туризме в часто остаются «потерянными» в большом потоке сообщений, а наибольшее внимание к себе притягивают политическая и криминогенная тематика.
2. Туристский образ Северного Кавказа, «рисуемый» СМИ, состоит из самых разнообразных элементов, с характерным преобладанием природно-ресурсной составляющей и, прежде всего, горным рельефом.
3. В ментальных представлениях жителей российских регионов сформировался интегральный образ Северного Кавказа, включающий несколько «слоев»:
 - природный (красивая нетронутая природа, горы, чистый воздух, море и минеральная вода);
 - культурно-исторический (этноконфессиональное разнообразие, традиционный образ жизни, гостеприимство и национальная кухня, древнейшие памятники истории и культуры; одним из главных культурных символов Северного Кавказа остается М.Ю. Лермонтов;
 - брендовый (в числе основных брендов Северного Кавказа оказались курорт «Архыз», минеральные воды «Нарзан», «Ессентуки», Кавказские Минеральные Воды, Эльбрус);
 - криминальный (Чеченские войны, терроризм, коррупция, опасность, страх, личная безопасность);
 - инфраструктурно-сервисный (проблемы с качеством обслуживания, недостаток современных инфраструктурных объектов).
5. Общий уровень информированности населения России о состоянии туристской отрасли на Северном Кавказе низкий. Идущие преобразования и принимаемые меры по раз-

витию туризма остаются незамеченными в большинстве регионов и не отражаются в ментальных представлениях населения. Преобладают стереотипизированные и не переосмысленные образы.

6. Выявленные ассоциации неоднозначны и асимметричны. Наиболее позитивные ассоциации связаны с природой Северного Кавказа, а наиболее негативные – с его населением. В целом положительные ассоциации преобладают, однако сохраняется большое число отрицательных, отражающих неблагоприятное отношение к территории и развитию на ней внутреннего туризма.
7. Установлена географическая детерминанта в восприятии населением туристского образа Северного Кавказа. Негативные настроения преобладают в западно-восточном направлении, позитивные – в северном. Важное значение для формирования положительного образа имеет фактор соседства. Максимальный положительный образный потенциал сосредоточен в регионах-соседях первого и второго порядка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Атлас инвестиционных проектов в сфере туризма, реализуемых в субъектах Российской Федерации: информационное издание. М.: Федеральное агентство по туризму, 2017. 270 с.
2. Грибков М.В. Анализ формирования образов регионов России в федеральных информационных программах телевидения с помощью ГИС: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2009. 146 с.
3. Замятин Д.Н. Гуманитарная география: пространство, воображение и взаимодействие современных гуманитарных наук // Социологическое обозрение. 2010. №3. С. 26-51.
4. Информационно-аналитический портал «Медialogия». <http://www.mlg.ru> (дата обращения 01.07.2018)
5. Никанорова Е.В. Формирование туристского образа территории (на примере Ростовской области: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2009. 166 с.
6. Распоряжение Правительства РФ от 6 сентября 2010 г. №1485-р «О Стратегии социально-экономического развития Северо-Кавказского федерального округа до 2015 г.» [Электронный ресурс]. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант-плюс».
7. Чихичин В.В. Географический анализ образов городов Ставропольского края: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Ставрополь, 2006. 150 с.
8. Чихичин В.В. Образ региона как фактор развития туризма (на примере Ставропольского края) // География и туризм: сборник научных трудов. Пермь: 2008. С. 38–53.

REFERENCES

1. Atlas of investment projects in the field of tourism, implemented in the subjects of the Russian Federation: informational publication. Moscow: Federal Agency for Tourism, 2017. 270 c.
2. Fungus M.V. Analysis of the formation of images of regions of Russia in the federal information programs of television using GIS: author. dis. Cand. geogr. sciences. Moscow, 2009. 146 p.
3. Zamyatin D.N. Humanitarian geography: space, imagination and interaction of modern humanities // Sociological Review. 2010. №3. pp. 26–51.
4. Information and analytical portal Medialogia. <http://www.mlg.ru> (date of appeal 01.07.2018).
5. Nikanorova E.V. Formation of the tourist image of the territory (on the example of the Rostov region: Abstract of thesis. Candidate of Geographical Sciences. Moscow: 2009. 166 c.
6. Order of the Government of the Russian Federation of September 6, 2010 No. 1485-p "On the Strategy of Social and Economic Development of the North Caucasus Federal District until 2015" [Electronic resource]. Access from the referral legal system "Consultant Plus".
7. Chikhichin V.V. Geographical analysis of images of cities in the Stavropol Territory: author. dis. Cand. geogr. sciences. Stavropol: 2006. 150 p.
8. Chikhichin V.V. The image of the region as a factor in the development of tourism (on the example of the Stavropol Territory) // Geography and tourism: a collection of scientific papers. Perm: 2008. pp. 38-53.

Об авторе

Ткачева Татьяна Александровна, аспирант кафедры социально-экономической географии, геоинформатики и туризма Северо-Кавказского федерального университета, тел.: 8-988-862-20-05, Email: tatianasurneva@yandex.ru

About the author

Tkacheva Tatiana Alexandrovna, Postgraduate Student of the Department of Socio-Economic Geography, Geoinformatics and Tourism of the North Caucasus Federal University, 8-988-862-20-05, Email: tatianasurneva@yandex.ru

25.00.24

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, ПОЛИТИЧЕСКАЯ И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

УДК

314.72 (470.6)

ЩИТОВА Н.А.*,
СОЛОВЬЕВ И.А.,
БЕЛОЗЕРОВ В.С.

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

ДАГЕСТАН: МОДЕЛЬ МЕЖКУЛЬТУРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПОЛИЭТНИЧНОМ РЕГИОНЕ*

Введение:

В последние десятилетия в России резко актуализировалась проблема межэтнических отношений. Дагестан, как один из наиболее пестрых в этнокультурном отношении регионов России, представляет особый интерес для изучения межэтнической среды. Цель исследования – проанализировать направления современных этнических процессов в Дагестане и выявить основные межэтнические проблемы.

Материалы и методы исследования:

Статья подготовлена на основе материалов полевых исследований, проведенных авторами в 2018 г. Основными инструментами исследования явились массовое интервьюирование местного населения, экспертные опросы представителей властных структур, интеллигенции, научного и бизнес-сообществ, а также визуальные наблюдения. Полученные в ходе полевых исследований отдельные данные корреспондировались с данными официальной статистики. В исследовании был применен метод ключевых территорий.

Обсуждение результатов исследования:

Главным рефреном всех опросов является суждения населения об отсутствии в Дагестане межэтнических проблем и невозможности возникновения межэтнических противостояний, что подтверждается отсутствием ксенофобских настроений, распространением практик толерантного поведения, позитивные установки по поводу межэтнических браков. Одновременно прослеживается сохранение этнического самосознания и отвергается идея межэтнической консолидации и формирования единой дагестанской нации. В полиэтничных городских сообществах развиваются интеграционные межэтнические процессы, и формируется городская идентичность. Установлено два вида интеграционных моделей.

Выводы:

Результаты исследования свидетельствуют о формировании в Дагестане своеобразной полиэтничной системы, находящейся в стадии достаточно равновесного этнокультурного состояния. Этнические процессы проявляются в виде внутриэтнических дезинтеграции на локальные поселенческие общности. В больших городах явно выражены интеграционные тенденции и распространение городских форм идентичности.

Ключевые слова:

Республика Дагестан, межэтнические отношения, социологический опрос, поселенческая локальная идентичность, субэтническая группа, интеграционные модели, религиозность, этнические проблемы.

*

Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ 16-06-00179 «Разработка и апробация системы геоинформационного мониторинга этнодемографических процессов (на примере регионов Северного Кавказа)».

Schitova N.A.
Soloviev I.A.
Belozеров V.S.

North Caucasus Federal University,
Stavropol,
Russia

Dagestan – a model of intercultural interaction in a polyethnic region

- Introduction:** The recent decades Russia has seen a sharp rise in the issue involving interethnic relations. Dagestan, as one of Russia's most diverse regions from the ethnic & cultural stance, is of particular interest when it comes to studying the interethnic environment. The purpose of this study is to analyze the course of the ethnic processes that are underway in Dagestan nowadays, and to identify the major interethnic issues.
- Materials and methods:** The article is based on the data from field research carried out in 2018. The main research tools included interviews among the local population, expert surveys involving the authorities, intellectuals, scientific and business communities, as well as visual observations. The individual data obtained through the fieldwork were compared to the official statistics. The study involved the method of key territories.
- Discussion:** The major feature through all the polls was the opinion expressed by the local population stating there are no interethnic issues in Dagestan and no potential grounds for any interethnic confrontation, which is confirmed through lack of any xenophobic attitudes, the spread of tolerant practices, and positive attitudes towards interethnic marriages. At the same time, it is obvious that ethnic identities can be traced clearly along with the idea rejecting interethnic consolidation and the development of a single Dagestan nation. Polyethnic urban communities reveal interethnic processes going on as well as the formation of an urban identity. Two types of integration models have been identified.
- Conclusions:** The outcomes of the study reveal the development of a specific polyethnic system shaping in Dagestan, whereas the system remains rather balanced ethnically & culturally. The ethnic processes reveal themselves through internal ethnic disintegration in local communities. Larger urban areas demonstrate clear integration trends and the spread of urban types of identity.
- Keywords:** Republic of Dagestan, interethnic relations, sociological survey, local settlement identity, subethnic group, integration models, religiosity, ethnic problems.

Введение

Проблема межнациональных и межконфессиональных отношений приобретает в начале XXI в. особую актуальность. Во всем мире идут поиски новых концепций регулирования этнических взаимодействий и эффективных инструментов национальной политики. Актуальность данной проблематики растёт и в российской политической повестке дня, подогреваемая эпатажными выступлениями националистически агандированных деятелей политики и культуры и часто односторонними публикациями в средствах массовой информации, подающими не всегда точные факты без аналитического сопровождения.

Среди российских регионов Республика Дагестан выделяется своей многонациональностью. Кроме крупных по численности этносов здесь проживают большое число малых этнических и субэтнических групп, с разными лингвистическими и культурологическими особенностями [1]. По переписи населения 2010 г. было учтено более 30 этносов, говорящих на дагестанских

языках. К числу других многочисленных народов республики относятся кумыки, азербайджанцы, русские, ногайцы (табл. 1). Вместе с тем, следует отметить, что материалы переписи дают лишь самое общее представление об этнической структуре населения республики, а точность некоторых данных сомнительна.

Гипотеза нашего исследования состояла в том, что полиэтничность выступает в качестве фактора усложнения сценариев межкультурного и межкули профессионального взаимодействия. Таким образом, выбор Дагестана в качестве пилотного региона очевиден. Цель исследования состояла в выявлении основных межэтнических проблем в Республике Дагестан

Таблица 1.

ЭТНИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА РЕСПУБЛИКИ ДАГЕСТАН
ПО ДАННЫМ ПЕРЕПИСИ 2010 Г.

Table 1. Ethnic structure of the Republic of Dagestan (census, 2010)

Этносы	Численность, чел.	Удельный вес, %	Субэтносы	Численность, чел.	Удельный вес, %
1. Аварцы	850011	29,2	1. Дидойцы*	11623	0,4
2. Даргинцы	490384	16,8	2. Андийцы*	11448	3,9
3. Кумыки	431736	14,8	3. Ахвахцы*	7923	0,3
4. Лезгины	385240	13,2	4. Бежтинцы*	5956	0,2
5. Лакцы	161276	5,5	5. Каратинцы*	4761	0,2
6. Азербайджанцы	130919	4,5	6. Ботлихцы*	3508	0,1
7. Русские	104020	3,6	7. Гунзибцы*	918	–
8. Ногайцы	40407	1,4	8. Казаки****	688	–
9. Агулы	28054	1,0	9. Тиндалы*	634	–
10. Табасараны	11884	0,4	10. Хваршины*	526	–
11. Рутульцы	2784	0,1	11. Гинухцы*	439	–
12. Цахуры	977	–	12. Годоберинцы*	426	–
13. Горские евреи	196	–	13. Кубачинцы**	101	–
14. Таты	45	–	14. Чамалалы*	16	–
Другие народы и лица, не указавшие национальность	223324	7,68	15. Чеченцы-аккинцы***	15	–
Всего	2910249	100	16. Арчинцы*	6	–
			17. Кайтагцы**	4	–

* – аварские субэтносы

** – даргинские субэтносы

Составлено по: [2]

*** – чеченские субэтносы

**** – русские субэтносы

Материалы и методы исследования

Информационной основой данной статьи являются данные официальной статистики и материалы полевых этнографических исследований, проведенных в ходе экспедиции по Дагестану летом 2018 г.

Данное исследование было направлено на анализ индивидуальных мнений, представлений, оценок разных этнических категорий населения, что обусловило необходимость разработки программы конкретного социологического обследования в ключевых территориях. В качестве территорий – ключей были выбраны три города (Кизляр, Махачкала и Дербент), а также сельские политические поселения Кизлярского района, моноэтнические поселения Гунибского (с преобладанием аварцев), Дахадаевского (с преобладанием даргинцев) и Докузпаринского района (с преобладанием лезгинов). Использовались методы выборочного опроса населения и экспертного опроса. Население опрашивалось методом демоскопического интервью. Интервьюер имел структурированный вопросник, включавший вопросы преимущественно открытого и частично закрытого типа. При беседе интервьюер вовлекал респондента в более откровенный разговор, пытаясь понять истинную точку зрения и получить полные и развернутые ответы по теме исследования, не ограничиваясь рамками вопросника. Это позволило перевести исследование в качественную плоскость и получить представление о глубинных процессах и специфике исследуемой территории. Ответы в опросный лист записывал интервьюер со слов респондента, что позволило при сравнительно небольших объемах выборки повысить достоверность полученной информации. Всего было получено 62 интервью. Среди респондентов были представители разных этнических групп – аварцы, даргинцы (в том числе, кубачинцы), кумыки, лезгины, русские, лакцы, табасараны, азербайджанцы, ногайцы, рутульцы, евреи.

Метод экспертного опроса удачно дополнил результаты опроса населения и позволил установить взаимосвязи между отдельными явлениями и интерпретировать их в контексте общих проблем территории. В качестве экспертов выступили деятели официальной власти – главы или заместители глав городских и сельских администраций, а также представители разных профессий из числа старожильческого населения (начальник отдела казачьего центра, директор школы, музейный работник, экскурсовод, юрист, ученый-регионовед, представитель еврейской религиозной общины, частный предприниматель, студент-политолог). Всего опрошено 13 экспертов. С каждым из них работа велась индивидуально. Опрос проводился в виде личного интервью по заранее составленному сценарию с частичной формализацией. Содержание интервью записывалось на диктофон или в регистрационный лист.

Поставленные вопросы имели цель выявить влияние полиэтничности на ход социально-экономических процессов, состояние взаимоотношений между людьми разных национальностей, оценку населением уровня этнической напряженности и конфликтогенности в местах проживания, роли этни-

ческих элит в формировании межнационального климата, состояния национальной политики в республике и стране, понять соотношение между этническим и религиозным сознанием людей.

Отдельная группа вопросов была направлена на установление степени сплоченности регионального социума как целостного организма, действующего во благо своего места жительства – поселения, района, республики.

Обсуждение результатов исследования

Прежде всего, следует отметить, что в Дагестане сложилась уникальная межэтническая система, в которой причудливо сочетаются интернационализм и сохранение этнокультурной самобытности, что проявляется в следующих процессах:

1. Широкое распространение стратегий толерантного поведения. В разговорной речи отсутствуют некорректные выражения, не артикулируются этнокультурные особенности. На вопрос «Испытываете ли Вы неприятные ощущения, когда в Вашем присутствии говорят на непонятном для Вас языке?» положительно ответили менее 1% всех респондентов. Наиболее типичное отношение проявилось в ответе: «Дагестан многонациональная республика и понимаю, что выразить мысль при общении на своем языке гораздо легче».
2. Отсутствие бытовых проявлений ксенофобий и этнофобий. 70,4% респондентов никогда не испытывали пренебрежительное отношение к себе причиной которого являлась национальность, ни в быту, ни на работе, ни в общественной жизни.
3. Личностная установка и готовность к межэтническим контактам в разных сферах взаимодействия. 85,2% респондентов выразили готовность заводить дружбу, быть соседями, коллегами по работе с представителями других национальностей.
4. Распространение межэтнических браков. Почти половина опрошенных допускают для себя или своих близких возможность вступать в межэтнические браки. 18,5% имеют реальные брачные отношения с представителями других национальностей, 14,5% – родились в смешанных браках.
5. Межэтнические проблемы выражены достаточно слабо или носят латентный характер. Большинство респондентов (более 80%) указали на их отсутствие в местах проживания, примерно 11% затруднились ответить на этот вопрос и только 7,4% считают, что межэтнические обострения случаются изредка. Несколько выше доля лиц (22,2%), считающих, что редкие межнациональные проблемы бывают или

Таблица 2.

ЭКСПЕРТНЫЕ МНЕНИЯ О НАЛИЧИИ МЕЖЭТНИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

Table 2. Expert opinion on interethnic problems

№	Место интервьюирования	Цитаты из интервью
1.	Дербент	«На уровне молодежи иногда возникают конфликты, раньше было часто, сейчас нет...»
2.	Кизляр	«В Дагестане особо нет[межэтнических] проблем, возле церкви [в Кизляре] был теракт, но он не связан с конфликтом между этносами. Это была акция устрашения людей вообще...»
3.	Кизляр	«Никогда не было, и нет. Надеюсь, что не будет. Воспитание такое, что младшие уважают старших, и все дружат друг с другом. Теракт (нападение на прихожан церкви) – это фанатик (психически больной), а не межэтнические отношения...»
4.	Махачкала	«Межэтнических проблем у нас нет...»
5.	Махачкала	«Нет проблем. Единственно – наличие определенных групп лиц, которые пытаются раскачать ситуацию в своих политических целях»
6.	Кизлярский район	«По Дагестану, в общем, кое-где возникают, но в нашем селе таких проблем нет»

возможны в соседних населенных пунктах. Многие эксперты так же подтвердили мнение о неактуальности возникновения каких-либо проблем между разными этническими группами в Республике (табл. 2).

6. Вместе с тем, этническая идентичность явно выражена, все четко осознают свою принадлежность к конкретной этно-национальной общности, причем преобладает нормальный тип идентичности с положительным отношением к своей этнической группе, но без преувеличения ее значимости. Распространено мнение об яркой самобытности отдельных дагестанских народов, поэтому возможность их интеграции и образование единой дагестанской нации однозначно отвергается.

Этнические процессы, тем не менее, идут в разных направлениях. С одной стороны, в сельской местности с моноэтническим составом населения наблюдается «этническая диссимилиация», а в полиэтнических городах проявляются интеграционные процессы.

В горных селениях четко выражена локальная территориальная (поселенческая) идентичность населения (чувство места, привязанность к мес-

Таблица 3. ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МЕСТНЫХ ЖИТЕЛЕЙ О ЛОКАЛЬНОЙ ИДЕНТИЧНОСТИ
Table 3. Residents' ideas on local identity

№	Место интервьюирования	Цитаты из интервью
1.	Гуниб	«Аварцы все разные. Чохцы – очень гордые, согратлинцы – хитрые и прижимистые, а гунибцы – обладатели сильного и независимого характера... [подтверждает свою реплику сжатым кулаком]»
2.	Куруш	«Здесь живут курушцы, по национальности лезгины»
3.	Согратль	«...Важнее не дагестанец или аварец, а согратлинец, т.к. у нас богатая история, и мы более объединенные и имеем свою общину...»

Таблица 4. ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МЕСТНЫХ ЖИТЕЛЕЙ ОБ ЭТНИЧЕСКОЙ САМОИДЕНТИФИКАЦИИ
Table 4. Residents' ideas on ethnic self-identification

Место интервьюирования	Цитаты из интервью
Кубачи	«Если поеду в Москву назову себя кубачинцем, т.к. даргинцы молодые [студенты], когда едут в Россию, всегда себя называют кубачинцами. Потому что доверие к ним больше, потому что даргинцев много и с разных регионов, и с разным характером. У акушинцев один характер, у кайтагцев – другой. Кубачинцы никогда не будут участвовать в ненужных делах, в стычках... К ним больше доверия, и характер хороший. Поэтому некоторые даргинцы записываются как кубачинцы. Если поеду в Париж назовусь тоже кубачинцем, т.к. для Парижа или за границы, если я скажу кубачинец, то меня лучше поймут, чем даргинца. Кубачи намного известнее, ну может быть ещё дагестанцев там знают...»
Согратль	«...Аварцы делятся, на аварцев, цумадинцев, ахвазцев, ботлихцев. У нас разные языки, мы вообще друг друга не понимаем»

ту), которая нередко превалирует над этнической идентификацией. Жители, в первую очередь, позиционируют себя гунибцами, чохцами, согратлинцами, акушинцами, кубачинцами, курушцами и только во вторую – ассоциируют себя с аварцами, даргинцами, лезгинами и лишь потом дагестанцами и россиянами. Они не только осознают свою идентичность, но и придают ей большое субъективное значение (табл. 3).

В отдельных случаях локальная идентичность приобретает прогрессирующий характер, в результате чего формируются субэтнические образования (табл. 4). Яркий пример – кубачинцы не считают себя даргинцами. У них свой, особый образ жизни, язык, этический кодекс. Даже одежда кубачинцев имеет свои отличия, а в традиционном исламе можно заметить черты до-

исламских верований (маски на свадьбе, праздник «Воды», выбор невесты у родника и т.п.). Кубачинцы – творцы, многовековые навыки художественной обработки металлов живы и передаются от поколения к поколению.

В городах, куда стекаются миграционные потоки с гор, и где сформировался очень пестрый состав населения, наблюдаются процессы межэтнической интеграции (табл. 5).

Выделяются две интеграционные модели: махачкалинская (мультикультурная) и дербентская (симбиотическая).

Махачкалинская модель

Махачкала – самый крупный город в СКФО. Здесь проживают представители, практически, всех коренных дагестанских народов. По вероисповеданию преобладают мусульмане, но есть и большие православная и еврейская общины. В нулевые годы произошел резкий скачок численности населения. Приток был обусловлен внутренними миграциями из сельской местности. Таким образом, современное население города представлено, в значительной степени, горожанами в первом и втором поколениях, являющихся носителями, преимущественно, сельского образа жизни. Махачкалу можно назвать неким огромным «резервуаром», в котором скапливаются и взаимодействуют большое число разнообразных этнокультурных групп, каждая из которых сохраняет свою этническую память. Значимость общегородской идентичности по сравнению с этнической, понижена. Русский язык широко используется как инструмент межэтнического взаимодействия, но не более. Этнические группы разнообразны, но равноправны в плане слабой укоризненности. Ни у кого нет оснований, да и необходимости в подчеркивании своей исключительности, педалировании этнокультурной исключительности. Нет «главных» и «второстепенных» народов, нет «хозяев» и «гостей».

Дербентская модель

Этническая структура населения Дербента еще более разнообразна, чем в Махачкале. Если в Махачкале преобладают дагестанские народы, то в Дербенте традиционно велика доля азербайджанцев, повышены (несмотря на отрицательные миграции) доли армян и евреев (табл. 6). Здесь на основе многовекового смешения различных культур и этносов в условиях постоянных внешних угроз сформировалось своеобразное городское сообщество, в котором личная этноконфессиональная идентичность подчинена городской принадлежности.

Горожане отмечают свою непохожесть, отстраненность от остального Дагестана (табл. 7). По их мнению, Дербент – это, наверное, единственное место в мире, где не просто мирно живут и общаются азербайджанцы и армяне, евреи, русские и разные северокавказские народы, но образуют уникальное сообщество – «дербентский народ» со своим особым, неторопли-

Таблица 5.

ЭТНИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА НАСЕЛЕНИЯ МАХАЧКАЛЫ ПО ДАННЫМ
ПЕРЕПИСИ 2010 Г.

Table 5. Ethnic structure of Makhachkala population (census, 2010)

Этносы	Численность, чел.	Удельный вес, %
1. 1. Аварцы	149 623	26,14
2. Даргинцы	88 573	15,47
3. Кумыки	86 503	15,11
4. Лезгины	84 479	14,70
5. Лакцы	79 906	13,90
6. Русские	35 908	6,27
7. Табасараны, рутуль- цы, агулы, цахуры и др. горские этносы	29626	5,14
8. Другие, недагестанс- кие народы	18572	3,24
Всего	572 076	100

Составлено по: [3]

вым, с восточным колоритом и чайными посиделками образом жизни. Русский язык – больше, чем инструмент общения, это язык «дербентского народа». Самыми большими ценностями считаются образованность, приверженность собственному укладу жизни, традициям и обычаям, открытость, гостеприимство. По свидетельству старожилов, в 1990- гг. в Дербенте появились полукриминальные группировки «ребят с гор», которые вели себя по-другому. В городе они не прижились – и то ли уехали, то ли ассимилировались, но в настоящее время они не выделяются.

В России довольно широко распространено мнение о том, что Дагестан – один из самых исламизированных регионов страны. Внешне это выглядит действительно так. Огромное количество мечетей, молельных комнат, разнообразные рекламные продукты с цитатами из Корана – повсеместные элементы современных культурных ландшафтов Республики. Во многих поселениях бережно охраняются захоронения выдающихся суфиев – зияраты, которые являются объектами паломничества верующих из других регионов РФ. Однако, в ряде случаев, религиозность носит внешний характер. Многие жители, особенно молодые, говорили о своей причастности к религии не по глубокому убеждению, а потому, что «так надо», «так делают большинс-

Таблица 6. ЭТНИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА НАСЕЛЕНИЯ ДЕРБЕНТА
ПО ДАННЫМ ПЕРЕПИСИ 2010 Г.
Table 6. Ethnic structure of Derbent population (census, 2010)

Этносы	Дербент	
	Численность, чел.	Удельный вес, %
1. Лезгины	40188	33,7
2. Азербайджанцы	38523	32,3
3. Табасараны	18839	15,8
4. Даргинцы	6692	5,6
5. Русские	4450	3,7
6. Агулы	3775	3,2
7. Армяне	1367	1,2
8. Горские евреи/евреи	1345	1,1
9. Рутульцы	921	0,8
10. Аварцы, кумыки, лакцы	1486	1,2
11. Другие народы	1614	1,4
Всего	119200	100

Составлено по: [3]

Таблица 7. ВЫСКАЗЫВАНИЯ ЭКСПЕРТОВ О ДЕРБЕНТЕ
Table 7. Expert opinion on Derbent

Место интервьюирования	Цитаты из интервью
Дербент	«...Я люблю Дербент не из-за того, что он российский или табасаранский... Для меня дербентец важнее. Вы нигде в России не найдете такого города. Море, горы, культура, все родное»
Дербент	«Культура дербентцев другая, больше восточная. Здесь был торговый город, люди мягче, хорошо общаются. В Махачкале больше горская культура, другая культура, более грубая...»

тво», «все горцы должны быть мусульманами», «горцы хотят показать какие они религиозные» и т.п. Даже посещение мечети превращается иногда в демонстрацию лояльности. Один из молодых образованных людей так выразил свое отношение к исламу: «...к этому надо прийти, чтобы молиться, должна быть в этом потребность. Я пока не готов». Довольно терпимо относятся дагестанцы к внешним атрибутам ислама. Молодежь одевается по-европейски, многие горожанки не носят головные уборы, хиджабы встречаются достаточно редко. Женщины и мужчины вместе находятся на пляжах в обычных купальных костюмах.

Некоторые межэтнические проблемы все же были обнаружены. Условно их можно обозначить как «лакско-чеченская», «кумыкская», «лезгинская» и «русская». Эти проблемы хорошо известны экспертному сообществу [4]. Большинство из них связаны не столько с межэтническими, сколько с территориальными и земельными отношениями. Первая из них, наиболее «застарелая» связана с незавершенностью территориальной реабилитации депортированных чеченцев-аккинцев, Процесс тянется более 25 лет, но до сих пор далек от завершения. В настоящее время принята очередная Государственная программа республики Дагестан «Переселение лакского населения Новолакского района на новое место жительства и восстановление Ауховского района» на период 2018–2025 годов [5; 6].

«Кумыкская» проблема спровоцирована земельным конфликтом и переселением горцев на равнинные территории с преобладанием кумыкского населения. Особенно остра проблема в прибрежных пригородах Махачкалы, которые интенсивно застраиваются частными виллами и предприятиями рекреационной инфраструктуры. Проблема активно политизируется и переводится в этническую плоскость идеологами националистического движения «Тенглик», хотя, в данном случае вопрос упирается в правовую неурегулированность земельных отношений.

«Лезгинская» проблема возникла после передачи в 2010–2011 гг. двух анклавных лезгинских аулов Азербайджану и перераспределения водных ресурсов р. Самур, что привело к возмущению местного населения вплоть до проведения протестов [7].

Проблема «Русских» в Дагестане связана с сокращением доли русского населения. Действительно, особенно в 1990-е гг. наблюдались массовые миграции русских, по известным причинам. В настоящее время абсолютное большинство местных жителей жалеют об исходе русских. Несмотря на это проблемы преследования русского населения периодически поднимают в различных публикациях (например, статья Ю. Сошина о снижении роли терских казаков в политической, экономической и общественной жизни Кизляра [8]). В то же время сами казаки из Республиканского казачьего центра в г. Кизляре этого не ощущают, а ведут большую работу по развитию межэтнических и межконфессиональных связей. По их мнению, «в Дагестане казаков уважают».

Выводы

1. Многолетний опыт совместного проживания различных в этнокультурном, социальном и конфессиональном отношениях групп населения позволил выстроить в Дагестане уникальную систему продуктивного межэтнического взаимодействия.
2. Состояние этнических процессов характеризуется проявлением интеграционных и дезинтеграционных тенденций. В сельских моноэтнических сообществах происходит дробление единого этноса на локальные поселенческие идентичности. Городские сообщества испытывают интеграционное развитие. Установлено два типа интеграционных моделей: мультикультурная, махачкалинская и «симбиотическая» дербентская,
3. Религиозность в современном Дагестане приобретает демонстративно-поведенческий характер, появились группы людей, для которых значимость религиозных убеждений в системе ценностей уходит на второй план.
4. Этнические проблемы в Дагестане не редко являются следствием непродуманных или ошибочных управленческих решений местных и федеральных властей и отсутствием взвешенной национальной политики.

Библиографический список

1. Тишков В., Степанов В. Россия в этническом измерении // Население и общество. Информационный бюллетень Центра демографии и экологии человека Института народохозяйственного прогнозирования РАН. М., 2004. №81.
2. Итоги Всероссийской переписи населения 2010 года в отношении демографических и социально-экономических характеристик отдельных национальностей. Приложение 2 (Национальный состав населения по субъектам Российской Федерации). URL: http://www.gks.ru/free_doc/new_site/perepis2010/croc/results2.html (дата обращения: 30.10.2018)
3. Итоги Всероссийской переписи населения 2010г. Т. 3: Национальный состав и владение языками, гражданство / Территориальный орган федеральной службы госстатистики по Республике Дагестан. Махачкала, 2013. 474 с.
4. Межэтнические и конфессиональные отношения в Северо-Кавказском федеральном округе. Экспертный доклад / Под ред. В.А. Тишкова, В.В. Степанова. М., 2013. 98 с.
5. Государственная программа Республики Дагестан «Переселение лакского населения Новолакского района на новое место жительства и восстановление Ауховского района» (2018–

2025). <http://docs.cntd.ru/document/450357432> (дата обращения: 30.10.2018).

6. Мудуев Ш.С. Социально-экономические последствия вынужденных миграций населения (Новолакский район Республики Дагестан) // Миграционные процессы: проблемы адаптации и интеграции мигрантов: сб. материалов IV Международной научно-практической конференции / под ред. В.С. Белозерова. Ставрополь, 2018. С. 80–87.
7. Дагестанские села передали Азербайджану вместе с жителями (18.06.2013 г.). URL: <http://flnka.ru/digest-analytics/2785-dagestanskije-sela-peredali-azerbaydzhanu-vmeste-s-zhitelyami.html> (дата обращения: 30.10.2018).
8. Сошин Ю. Дерусификация северного Дагестана в свете кизлярского расстрела. URL: <https://terskiykazak.livejournal.com/913691.html> (дата обращения: 30.10.2018).

References

1. Tishkov V., Stepanov V. Russia in the Ethnic Dimension // Population and Society. Newsletter of the Center for Demography and Human Ecology, Institute for National Economic Forecast at the Russian Academy of Sciences. M., 2004. #81.
2. The results of the Russian National Census (2010) in relation to the demographic and socio-economic specifics of individual ethnicities. Appendix 2 (National composition of the population by regions of the Russian Federation). URL: http://www.gks.ru/free_doc/new_site/perepis2010/croc/results2.html (referral date: 10/30/2018)
3. The results of the Russian National Census (2010), Volume 3: National composition and language proficiency, citizenship / Territorial body of the Federal State Statistics Service for the Republic of Dagestan. Makhachkala, 2013. 474 p.
4. Interethnic and confessional relations in the North-Caucasus Federal District. Expert Report / Ed. V.A. Tishkova, V.V. Stepanova. M., 2013. 98 p.
5. The state program of the Republic of Dagestan "Relocation of the Laki population of the Novolaksky district to a new place of residence and restoration of the Aukhovsky district" (2018–2025). <http://docs.cntd.ru/document/450357432> (referral date: 10/30/2018).
6. Muduev Sh.S. Socio-economic effects of forced migration (Novolaksky district of the Republic of Dagestan) // Migration processes: problems of adaptation and integration of migrants: Volume of the IV International Research Conference / ed. V.S. Belozarov. – Stavropol, 2018. p. 80–87.
7. Dagestani villages given to Azerbaijan together with residents (06/18/2013). URL: <http://flnka.ru/digest-analytics/2785-dagestanskije-sela-peredali-azerbaydzhanu-vmeste-s-zhitelyami.html> (referral date: 30.10.2018).
8. Soshin Yu. Derusification of Northern Dagestan in the light of the Kizlyar massacre. URL: <https://terskiykazak.livejournal.com/913691.html> (access date: 10/30/2018).

Об авторах

1. Щитова Наталия Александровна, доктор географических наук, профессор кафедры социально-экономической географии, геоинформатики и туризма Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (905)466-91-20; E-mail: stavgeo@mail.ru.
2. Соловьев Иван Алексеевич, кандидат географических наук, доцент кафедры социально-экономической географии, геоинформатики и туризма Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (905)415-56-24; E-mail: soloivan@mail.ru.
3. Белозеров Виталий Семенович, доктор географических наук, профессор кафедры социально-экономической географии, геоинформатики и туризма Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: (962)451-77-88; E-mail: vsbelozеров@yandex.ru.

About the authors

1. Schitova Natalia Aleksandrovna, Doctor of Geographical Sciences, NCFU. Phone: (905)466-91-20; E-mail: stavgeo@mail.ru.
2. Soloviev Ivan Alekseevich, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, NCFU. Phone: (905)415-56-24; E-mail: soloivan@mail.ru.
3. Belozarov Vitaly Semenovich, Doctor of Geographical Sciences, NCFU. Phone: (962)451-77-88; E-mail: vsbelozеров@yandex.ru.

25.00.24

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, ПОЛИТИЧЕСКАЯ
И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

УДК 314.9

Черкасов А.А.Северо-Кавказский федеральный университе),
г. Ставрополь, Россия. cherkasov_stav@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ВОВЛЕЧЕНИЯ В УРБАНИЗАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ЭТНОСОВ В РОССИИ

Введение:

Территориальное развитие урбанизации в России, выражается в региональных диспропорциях, накладывает свои особенности на вовлеченность разных этносов в урбанизационные процессы. С одной стороны, одна часть этносов была вовлечена в данные процессы на более ранних этапах (русские, украинцы, белорусы и т.д.), другая часть этносов оставалась на «периферии» урбанизации, чаще всего сохраняя традиционный ареал расселения, ведения традиционного образа жизни (например, титульные народы Северного Кавказа). С научной точки зрения данное обстоятельство требует особого внимания, так как важно знать, какие из этносов были вовлечены в урбанизационные процессы на начальных этапах промышленного освоения страны, значительно увеличив свой удельный вес в структуре городского населения являясь «локомотивом» урбанизации и какова их роль в урбанизационных процессах, а с другой стороны, важно понять, какие этносы включаются в данные процессы в более поздний период и на современном этапе.

Материалы и методы исследования: автором в качестве ключевых критериев определены: уровень урбанизированности этносов, который выражается в показателе удельного веса городского населения этноса от общей его численности; урбанизационный переход этносов, под которым понимается преодоление доли городского населения этноса в 50% от общей его численности. В ходе работы применяется метод статистического анализа, и сравнительные методы которые позволяют наиболее качественно проанализировать количественные показатели. Отдельное место занимает применение картографического метода, позволяющий оценить пространственно-временных особенностей развития урбанизации в стране в том числе с учетом особенностей расселения различных этносов. В качестве исходной статистической информации исследования нами использованы данные переписей населения (РСФСР 1939, 1959, 1970, 1979, 1989, РФ 2002, 2010 гг.).

Результаты исследований и их обсуждение: в работе предложена типология этносов по уровню урбанизированности и урбанизационному переходу. По характеру участия в урбанизационном процессе этносы делятся на следующие типы: первый тип – этносы с ранним урбанизационным переходом, у которых урбанизационный переход был зафиксирован переписью населения 1959 г. и ранее (русские, украинцы, белорусы, грузины, узбеки, армяне, молдаване, азербайджанцы, латыши, литовцы); второй тип образуют этносы, у которых показатель более 50,0% проживающих в городах был зафиксирован переписями населения 1970 и 1979 гг. (осетины, татары, лакцы, балкарцы, немцы); третий тип – этносы с поздним урбанизационным переходом. Урбанизационный переход зафиксирован переписями населения 1989, 2002 и 2010 гг. (мордва, лезгины, кумыки, калмыки); Четвертый тип - этносы с несостоявшимся урбанизационным переходом к 2010 году: а) этносы, приблизившиеся к урбанизационному переходу – доля городского населения составляет от 45,1 до 49,9% (адыгейцы, кабардинцы, удмурты, буряты, башкиры и др.); б) этносы с удельным весом городского населения менее 45,0% (марийцы, ингуши, чеченцы, даргинцы, казахи, якуты и др.).

Основные выводы и дискуссия: в силу ряда географических, исторических и социально-экономических причин одни этносы включались в орбиту городской жизни раньше, другие позже. Общей для всех народов являлась тенденция все большего вовлечения в урбанизационные процессы, при этом на современном этапе выделяется целая группа этносов, с низким уровнем данного показателя.

Ключевые слова:

Урбанизация, урбанизационный переход, урбанизированность этносов, городское население, Россия.

Cherkasov A.A.North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia
Cherkasov_stav@mail.ru

PECULIARITIES OF INVOLVING THE URBANIZATION PROCESSES OF ETHNOSES IN RUSSIA

Abstract:

territorial development of urbanization in Russia, expressed in regional disparities, imposes its own characteristics on the involvement of different ethnic groups in urbanization processes. On the one hand, one part of the ethnic groups was involved in these processes at earlier stages (Russians, Ukrainians, Belarusians, etc.), the other part of the ethnic groups remained on the "periphery" of urbanization, often preserving the traditional area of settlement, traditional way of life (for example, the titular ethnoses of the North Caucasus). From a scientific point of view, this fact requires special attention, as it is important to know which ethnic groups were involved in the urbanization processes in the early stages of industrial development of the country, significantly increasing its share in the structure of the urban population as a "locomotive" of urbanization and what their role in urbanization processes, and in the other hand, it is important to understand which ethnic groups are involved in these processes in the later period and at the present stage.

Materials and methods
of research:

the author defines as the key criteria: the level of urbanization of ethnic groups, which is expressed in the indicator of the proportion of the urban population of the ethnic group from its total population; urbanization transition of ethnic groups, which means overcoming the proportion of the urban population of the ethnic group in 50% of its total population. In the course of the work the method of statistical analysis, and comparative methods that allow the most qualitative analysis of quantitative indicators. A special place is occupied by the use of the cartographic method, which allows to assess the spatial and temporal features of the development of urbanization in the country, including taking into account the peculiarities of the settlement of different ethnic groups. We used census data (Soviet Union) as the initial statistical information of the study 1939, 1959, 1970, 1979, 1989, and RF 2002, 2010).

The results of the
research and their
discussion:

the paper proposes a typology of ethnic groups according to the level of urbanization and urban transition. By the nature of participation in the urbanization process, ethnic groups are divided into the following types: the first type – ethnic groups with an early urbanization transition, whose urbanization transition was recorded by the census of 1959 and earlier (Russians, Ukrainians, Belarusians, Georgians, Uzbeks, Armenians, Moldovans, Azerbaijanis, Latvians, Lithuanians); the second type form ethnic groups, in which the rate of more than 50.0% of living in cities was recorded by the censuses of 1970 and 1979. (Ossetians, Tatars, laktsy, Balkars, Germans); the third type - ethnic groups with late urbanization transition. The urbanization transition was recorded by the population censuses of 1989, 2002 and 2010 (Mordvins, Lezgins, Kumyks, Kalmyks); the Fourth type - ethnic groups with failed urbanization transition by 2010: a) ethnic groups approaching the urbanization transition – the share of the urban population is from 45.1 to 49.9% (Adyghe, Kabardians, Udmurts, Buryats, Bashkirs, etc.); b) ethnic groups with a specific weight of urban population less than 45.0% (Mari, Ingush, Chechens, Dargins, Kazakhs, Yakuts, etc.). The main conclusions and discussion: due to a number of geographical, historical and socio-economic reasons, some ethnic groups were included in the orbit of urban life earlier, others later. Common to all peoples was the tendency of increasing involvement in urbanization processes, while at the present stage a whole group of ethnic groups with a low level of this indicator is allocated.

Key words:

Urbanization, urbanization transition, urbanization of ethnic groups, urban population, Russia.

Введение

Развития урбанизации в России имеет свои географические особенности, выражающиеся в неравномерном индустриальном (промышленном) развитии регионов. Итоги развития урбанизации наиболее наглядно демонстрируют количественные показатели, в частности рост и соотношение удельного веса городского населения [1]. В России достаточно быстро доля горожан увеличивалась в регионах активного хозяйственного освоения, в том числе Дальнего Востока, Сибири, Урала и Севера [4]. Это связано с тем, что данные территории в период активизации индустриализации в стране (1930 е гг.) не обладали достаточно развитой сетью сельских поселений, а строительство новых городов и развитие имеющихся промышленных центров кардинально менял соотношение удельного веса городского и сельского населения.

Так к 1959 году регионами лидерами по удельному весу городского населения были на Севере Мурманская область, Урале Свердловская и Челябинская области, Сибири Кемеровская область, Дальнем Востоке Магаданская область, Хабаровский и Камчатский край, Еврейская ОА. Здесь доля горожан в структуре населения значительно превышала общестрановой показатель (в данных регионах показатель составлял более 80%). В последующие годы отмечался рост данного показателя в большинстве регионов страны, что привело к так называемому выравниванию региональных диспропорций урбанизированности регионов. На этом фоне в начале XXI века остаются регионы, в которых доля городского населения значительно ниже чем в среднем в стране и не превысила показателя в 50%: это национально-территориальные образования Северного Кавказа (Ингушетия, Чечня, Дагестан, КЧР) а также Республика Алтай [9].

Территориальное развитие урбанизации в России, выражается в региональных диспропорциях, прямым образом влияла на вовлеченность этносов в урбанизационные процессы [6]. С одной стороны, одна часть этносов была вовлечена в урбанизационные процессы на более ранних этапах (русские, украинцы, белорусы и т.д.), другая часть этносов оставалась на «периферии» урбанизации, чаще всего сохраняя традиционный ареал расселения и ведя традиционный образ жизни (например, титульные народы Северного Кавказа).

Как отмечает Г.М. Лаппо в научной статье «Процессы и результаты урбанизации в России в XX веке»: «...в целом, высокие темпы урбанизации в России в большей или меньшей степени затронули каждый из народов страны» [3]. С научной точки зрения данное обстоятельство требует особого внимания, так как важно знать, какие из этносов были вовлечены в урбанизационные процессы на начальных этапах промышленного освоения, значительно увеличив свой удельный вес в структуре городского населения являясь «локомотивом» урбанизации, а с другой стороны, важно определить, какие этносы включались в процессы в более поздний период и на современном этапе.

Материалы и методы исследования

В работе в качестве ключевых критериев определены:

- 1) уровень урбанизированности этносов, который выражается в показателе удельного веса городского населения этноса от общей его численности;
- 2) фиксирование урбанизационного перехода у этносов, под которым понимается преодоление доли городского населения этноса в 50% от общей его численности [5, 8].

В работе применяется метод статистического анализа, позволивший провести оценку количественных показателей, характеризующих особенности уровня урбанизированности этносов в России. Важное место занимает сравнительный метод, позволивший сопоставить особенности урбанизированности различных этносов в России начиная с 1939 по 2010 год.

Использование картографического метода позволила подготовить серию карт, способствующих более детальному анализу рассматриваемого процесса, в том числе выявляя пространственно-временные особенности.

В качестве исходной статистической информации использованы данные переписей населения (РСФСР 1939, 1959, 1970, 1979, 1989, РФ 2002, 2010 гг.) [11]. (Республика Крым и город Севастополь в работе не учитывались). Данная информации систематизирована в рамках геоинформационной системы «ГИС – Этнический атлас России»* [2].

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ количественных характеристик соотношения среди этносов городского и сельского населения в России, позволил выделить типы этносов, по уровню урбанизированности и урбанизационному переходу. Важно отметить, что целом в России урбанизационный переход состоялся в 1958 г., перепись населения 1959 г. зафиксировала долю городского населения в стране на отметке 52,2%. С точки зрения исследования, данный статистический факт имеет важное значение, т.к. позволил констатировать о том, что население страны в своем большинстве стала проживать в городских населенных пунктах. Таким образом хронологический ряд предлагаемой типологии мы начинаем с 1959 года.

Первый тип – этносы с ранним урбанизационным переходом, у которых показатель более 50% проживающих в го-

родах был зафиксирован переписью населения 1959 г. и ранее (русские, украинцы, белорусы, грузины, узбеки, армяне, евреи, молдаване, азербайджанцы, латыши, литовцы, поляки, корейцы, греки). Перепись населения выявила, что

* Белозеров В.С., Черкасов А.А. «ГИС – Этнический атлас России» // ИНИПИ РАО ОФЭРНИО № 18412 от 26 июня 2012 года.

русские, наиболее активно участвовавшие в урбанизационном процессе, преодолели урбанизационный переход [7]. Среди факторов, повлиявших на раннее участие русских и других этносов в урбанизационных процессах является активная политика государства по переселению в районы нового освоения Сибири и Дальнего Востока, участие в индустриализации страны и др. Ареалы основного расселения большинства этносов с ранним урбанизационным переходом складывались в регионах первой волны промышленного освоения. Следует отметить, что в целом урбанизационный переход в стране состоялся за счет активного переселения русских в города. В 1959 г. доля русских в этнической структуре населения России составляла 83,3%, а в этнической структуре городского населения 87,2%.

К 1959 г. урбанизационный переход преодолело большинство титульных народов бывших союзных республик: грузины, узбеки, армяне, белорусы, молдаване, украинцы, азербайджанцы, латыши, литовцы, а также греки, финны, корейцы и таты. Доля этих народов в этнической структуре населения страны в тот период были различной. В 1959 г. украинцы, белорусы и евреи являлись крупными по численности этносами и составляли: украинцы – 3359 тыс. чел., евреи – 875 тыс. чел., белорусы – 844 тыс. чел. Численность остальных этносов была меньше, но значительная их часть проживала в городах. К народам, уровень урбанизированности которых в целом соответствовал среднему ходу урбанизации, относились русские, латыши, азербайджанцы, греки, украинцы. Доля городского населения у них не превышала 60%, а у остальных народов превышала данный показатель. Наиболее урбанизированными в России в 1959 г. являлись евреи и таты, доля городского населения соответственно составляла 94,8%, 95,4%. При этом евреи по численности входили в первую десятку народов страны. Отметим что в 1959 г. на долю этносов, относящихся к первому типу, приходилось 88,5% населения страны.

Второй тип образуют этносы, у которых урбанизационный переход зафиксирован переписями населения 1970 г. (осетины) и 1979 г. (татары, лакцы, балкарцы, немцы, карелы) – в этот период в урбанизационные процессы вовлекаются титульные этносы национальных территориальных образований – республик (русские составляли в 1979 г. 86,7% городского населения страны).

К 1970 г. критерий урбанизационного перехода достигли осетины, среди которых доля городского населения составляла 54,8%. В значительной мере было обусловлено ростом численности населения республиканской столицы – г. Владикавказа, в котором проживало в 1970 г. 42,7% населения республики.

К 1979 г. урбанизационный переход преодолели татары, второй по численности этнос страны. Доля городского населения среди татар составляла в

том же году 58,3%. Рост показателя связан в первую очередь с активной индустриализацией в регионах основного их ареала расселения: республики Татарстан, Чувашия, Марий Эл, Удмуртия, Самарская, Ульяновская область, Пермском крае. Особое влияние на урбанизационный переход оказало и то, что численность татар увеличивалась в регионах, где происходили активные урбанизационные процессы связанные с освоением газовых и нефтяных месторождений Западной Сибири.

Урбанизационный переход у представителей северокавказских республик во многом состоялся за счет формирования новых городов на территории национальных образований. Так к концу 1970-х гг. урбанизационный переход был зафиксирован у лакцев и балкарцев.

Состоялся урбанизационный переход в 1979 г. и у немцев, среди которых доля горожан составила 51,0%. Немцы, проживающие в России, традиционно расселены на значительных территориях и довольно широко представлены в регионах, где в тот период была высокая урбанизационная активность (Поволжье, Западная Сибирь, Северный Кавказ) что в совокупности способствовало преодолению урбанизационного перехода этноса.

Преодолели урбанизационный переход и карелы (54,1%), повысив долю городского населения в межпереписной период с 1970 по 1979 г. на 10,4%.

В целом же народы, составившие данный тип, продолжали отставать от среднего уровня урбанизированности в России, где доля городского населения в 1979 г. составила 69,1%. Отметим что в 1979 г. народы первого и второго типа вместе составляли 91,8% населения страны.

Третий тип образуют этносы с поздним урбанизационным переходом. Урбанизационный переход зафиксирован переписями населения 1989 г. (мордва), 2002 и 2010 гг. (лезгины, кумыки, калмыки).

Отметим, что начиная с 1989 г. рост городского населения в России стабилизировался, что подтверждают итоги последующих переписей населения. Доля городского населения в 1989 г. в России составила 73,4%.

В 1989 г. урбанизационный переход преодолели мордвы. Среди мордвы доля городского населения составляла в 1989 г. 52,2%. Подчеркнем, что на территории Республики Мордовия урбанизационные процессы происходили достаточно активно, в то же время основную часть городского населения республики составляли русские.

Перепись населения 2002 года не зафиксировала урбанизационного перехода не у одного из этносов, но к 2010 г. его преодолели лезгины, кумыки и калмыки, немного превысили показатель в 50,0%. Отметим, что в целом рост урбанизированности у них наблюдается на протяжении всего исследуемого периода. Среди калмыков он стал возможен в основном за счет роста численности населения г. Элисты. Лезгины и кумыки имеют высокий показатель го-

родского населения в границах Республики Дагестан, также основного ареала расселения. При этом важно отметить активные миграции кумыков и лезгин, в последние десятилетия в регионы с высоким уровнем городского населения, прежде всего регионы Западной Сибири. В совокупности данные тенденции способствовали росту городского населения среди данных народов и преодолению урбанизационного перехода.

Активное участие в урбанизационных процессах всех народов вызывает изменение соотношения доли каждого из этносов в составе городского населения. В частности, доля русских в составе городского населения до 1989 г. росла и составила 85,2%, а в последующие годы сокращалась, в 2002 г. до 83,6%, в 2010 г. 81,0%. При этом в составе городского населения увеличивается доля других народов. Так, с 1990-х по 2000 г. этническая структура городского населения России активно дополнялась за счет титульных народов закавказских государств – армян, азербайджанцев, грузин. С начала 2000-х годов увеличился приток в города народов Северного Кавказа (чеченцы, даргинцы, кумыки и др.), а также значительно увеличилась доля в структуре городского населения представителей народов Средней Азии (узбеки, таджики и киргизы).

Четвертый тип образуют этносы с несостоявшимся урбанизационным переходом к 2010 году:

- а) этносы, доля городского населения у которых близка к урбанизационному переходу, с показателем от 45,1 до 49,9% (адыгейцы, кабардинцы, удмурты, буряты, башкиры);**
- б) этносы, с удельным весом городского населения менее 45,0% (марийцы, ингуши, чеченцы, аварцы, якуты, казахи и др.) (рис. 1).** Важно отметить, что темпы роста численности городского населения среди этносов данной группы высока, отмечая условия стабилизации роста урбанизации в стране к 2010 г. Так, с 1959 по 1989 г. доля городского населения выросла в стране на 21,2%, а с 1989 по 2010 г. всего на 0,3%.

В настоящее время на долю этносов, относящихся к первому типу, приходится 81,5% населения страны. Вместе с народами II и III типа, у которых состоялся урбанизационный переход, составляют 87,9% населения России. **Особенности современного этапа урбанизации характеризуются активным влиянием на урбанизационные процессы народов, в том числе имеющих относительно высокий естественный прирост, у которых растет миграционная активность, вместе с тем отмечается невысокий уровень урбанизированности, то есть среди мигрантов значительную часть составляют сельские жители.**

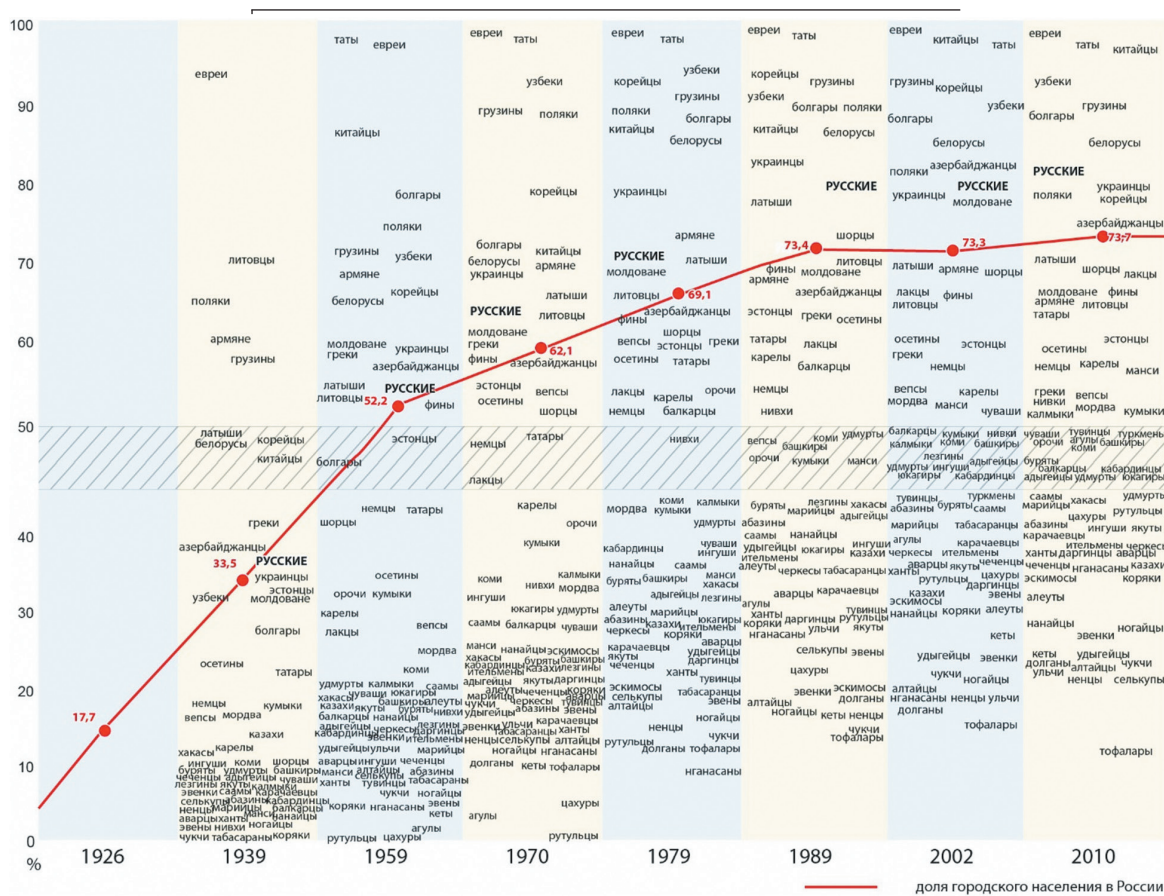


Рис. 1. Уровень урбанизированности и урбанизационный переход этносов в России.

Отметим что тип этносов, с приблизившихся к урбанизационному переходу – доля городского населения составляет от 45,1 до 49,9%, состоит из значительного числа народов. К данному типу относятся ряд титульных народов республик Северного Кавказа: адыгейцы, кабардинцы, балкарцы, табасаранцы, агулы, а также чувашы, башкиры, коми, тувинцы, буряты, туркмены, орочи, юкагиры. Этноты относящиеся к этому типа выделяются по численности: так численность в 2010 г. у башкир составляет 1584 тыс. чел, у чувашей 1435 тыс. чел., кабардинцев 516 тыс. чел. В целом на долю этносов данного типа приходится в 2010 г. 8,3% населения России.

Группу этносов с удельным весом городского населения менее 45,0% составляют представители северокавказских республик: рутульцы, цахуры, абазинцы, ингуши, карачаевцы, черкесы, аварцы, даргинцы, чеченцы, ногайцы, а также малых народов Севера, Сибири и Дальнего Востока: ханты, саамы, ительмены, коряки, нганасаны, эвенки, эскимосы, алеуты, нанайцы, яку-

ты, мари́йцы и др. Наименьший уровень урбанизированности в России – менее 30,0% – отмечается у алтайцев, ногойцев, а также малых народов Севера, Сибири и Дальнего Востока: нанайцев, эвенков, кетов, удэгейцев, чукчей, долганов, ненцев, ульчий, селькупов, тофалар.

Основные выводы и дискуссия

В силу ряда географических, исторических и социально-экономических причин одни этносы включались в орбиту городской жизни раньше, другие позже. По характеру участия в урбанизационных процессах этносы делятся на следующие типы:

- первый тип – этносы с ранним урбанизационным переходом, у которых урбанизационный переход был зафиксирован переписью населения 1959 г. и ранее (русские, украинцы, белорусы, грузины, узбеки, армяне, евреи, молдаване, азербайджанцы, латыши, литовцы, поляки, корейцы, греки);
- второй тип образуют этносы, у которых показатель более 50,0% проживающих в городах был зафиксирован переписями населения 1970 (осетины) и 1979 гг. (татары, лакцы, балкарцы, немцы, карелы);
- этносы с поздним урбанизационным переходом. Урбанизационный переход зафиксирован переписями населения 1989 г. (мордва), 2002 и 2010 гг. (лезгины, кумыки, калмыки);
- этносы с несостоявшимся урбанизационным переходом к 2010 году:
 - а) этносы, приблизившиеся к урбанизационному переходу – доля городского населения составляет от 45,1 до 49,9% (адыгейцы, кабардинцы, удмурты, буряты, башкиры и др.);
 - б) этносы с удельным весом городского населения менее 45,0% (мари́йцы, ингуши, чеченцы, даргинцы, казахи, якуты и др.).

Данная типология достаточно наглядно отражает вовлеченность этносов в урбанизационные процессы и дает основание говорить о том, что урбанизация в России обеспечивается за счет поэтапного включения этносов в урбанизационные процессы.

Библиографический список

1. Белозеров, В.С. Этнические аспекты урбанизации на Ставрополье // Вопросы географии / Моск. филиал ГО СССР / Русское геогр. об-во. М., 2013. С. 464–473.
2. Белозеров, В.С., Черкасов, А.А. ГИС-мониторинг этнических процессов в России // Наука. Инновации. Технологии. 2013. №1. С. 157–161.
3. Лаппо, Г.М. Процессы и результаты урбанизации в России в XX веке // Территориальная справедливость, региональные конфликты и региональная безопасность. Международная научная конференция. Ч. I. Смоленск: Изд-во Смоленского гуманитарного университета, 1998. 186 с.
4. Лаппо, Г.М. Урбанизация в России // Экология урбанизированных территорий №1. 2006. С. 6–12.
5. Попов, Р. Урбанизованность регионов России во второй половине XX века // Россия и ее регионы в XX веке: территория – расселение – миграция // под ред. О. Глезер, П. Поляна. М.: ОГИ, 2005. С. 215–245.
6. Трейвиш, А.И. Город, район, страна и мир. Развитие России глазами страноведа. М.: Новый хронограф, 2009. 372 с.
7. Черкасов А.А. Этнические аспекты урбанизации в России. Ставрополь: изд-во ФОК-Юг, 2016. 240 с.
8. Черкасов А.А. Мониторинг этнических аспектов урбанизации в России на основе ГИС-технологий // автореферат дис. ... кандидата географических наук: 25.00.24 / Северо-Кавказский федеральный университет. Ставрополь, 2013. 23 с.
9. Щербакова, Е. Городское население России на начало 2010 года – 103,8 миллиона человек, или 73,1% от общего числа россиян / Е. Щербакова. URL: <http://www.demoscope.ru/weekly/2010/0407/barom01.php>.
10. Charles M. Becker, S. Joshua Mendelsohn, Kseniya A. Benderskaya Russian urbanization in the Soviet and post-Soviet eras – London. 2012. 128 с.
11. Федеральная служба государственной статистики. URL: <http://www.gks.ru/>.

References

1. Belozarov, V.S. Etnicheskie aspekty urbanizacii na Stavropol'e // Voprosy geografii (Ethnic aspects of urbanization in the Stavropol region) / Mosk. filial GO SSSR / Russkoe geogr. ob-vo. M., 2013. P. 464–473. (in Russ)
2. Belozarov, V.S., Cherkasov, A.A. GIS-monitoring ehnticheskikh processov v Rossii (GIS monitoring of ethnic processes in Russia) // Nauka. Innovacii. Tekhnologii. 2013. № 1. P. 157–161. (in Russ)

3. Lappo, G.M. Processy i rezul'taty urbanizacii v Rossii v XX veke (Processes and results of urbanization in Russia in the XX century) // Territorial'naya spravedlivost', regional'nye konflikty i regional'naya bezopasnost'. Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya. CH. I. Smolensk: Izd-vo Smolenskogo gumanitarnogo universiteta, 1998. 186 p. (in Russ).
4. Lappo, G.M. Urbanizaciya v Rossii (Urbanization in Russia) // Eh-kologiya urbanizirovannyh territorij. №1. 2006. P. 6-12. (in Russ).
5. Popov, R. Urbanizovannost' regionov Rossii vo vtoroj polovine XX veka (Urbanization of Russian regions in the second half of the 20th century) // Rossiya i ee regiony v XX veke: territoriya – rassele-nie – migraciya // pod red. O. Glezer, P. Polyana. M.: OGI, 2005. P. 215–245. (in Russ).
6. Trejvish, A.I. Gorod, rajon, strana i mir. Razvitie Rossii glazami stranoveda. (City, district, country and world. Development of Russia through the eyes of a country historian). M.: Novyj hronograf, 2009. 372 p. (in Russ).
7. Cherkasov A.A. Ehtnicheskie aspekty urbanizacii v Rossii (Ethnic Aspects of Urbanization in Russia). Stavropol': izd-vo Fok-Yug, 2016. 240 p. (in Russ).
8. Cherkasov A.A. Monitoring ehtnicheskikh aspektov urbanizacii v Rossii na osnove GIS-tekhnologij avtoreferat (Monitoring of ethnic aspects of urbanization in Russia based on GIS technologies // abstract of thesis. ... candidate of geographical sciences) dis. ... kandidata geograficheskikh nauk: 25.00.24 / Severo-Kavkazskij federal'nyj universitet. Stavropol', 2013. 23 p. (in Russ).
9. Shcherbakova, E. Gorodskoe naselenie Rossii na nachalo 2010 goda – 103,8 milliona chelovek, ili 73,1% ot obshchego chisla rossiyan (The urban population of Russia at the beginning of 2010 was 103.8 million people, or 73.1% of the total number of Russians) / E. Shcherbakova – URL: <http://www.demoscope.ru/weekly/2010/0407/barom01.php> (in Russ).
10. Charles M. Becker, S. Joshua Mendelsohn, Kseniya A. Benderskaya Russian urbanization in the Soviet and post-Soviet eras – London. 2012. 128 p.
11. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj statistici (Federal state statistics service). URL: [http:// www.gks.ru/](http://www.gks.ru/). (in Russ).

Об авторах

Черкасов Александр Александрович, кандидат географических наук, доцент кафедры социально-экономической географии, геоинформатики и туризма Северо-Кавказского федерального университета. Scopus ID: 57192379694, Researcher ID: 57192379694. Телефон: +7(906) 460-99-98. E-mail: cherkasov_stav@mail.ru.

About the author

Cherkasov Alexander Alexandrovich, Candidate of geographical sciences, associate professor of the department of socio-economic geography, geoinformatics and tourism of the North-Caucasus federal university. Scopus ID: 57192859694, Researcher ID: 57192379694. Phone: +7(906) 460-99-98. E-mail: cherkasov_stav@mail.ru.

Исследование выполнено в рамках Гранта РФФИ 18-35-00173 «Полимасштабный геоинформационный мониторинг трансформации этнической структуры населения городской и сельской местности в России».

25.00.25

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Бадахова Г.Х.^{1,2*},
Лашманов Ю.К.¹
Шмигельский В.А.²

УДК 551.594
Ставропольский центр по гидрометеорологии и мониторингу
окружающей среды, г. Ставрополь, Россия
Институт математики и естественных наук Северо-Кавказского
федерального университета, г. Ставрополь, Россия
badahovag@mail.ru

ДИНАМИКА И СОВРЕМЕННЫЙ РЕЖИМ ГРОВОЙ АКТИВНОСТИ НАД ЦЕНТРАЛЬНЫМ ПРЕДКАВКАЗЬЕМ

Введение:

В Центральном Предкавказье, которое представляет Ставропольский край, наиболее часто отмечаются такие опасные метеорологические явления как гроза, град, сильный ливень, сильный ветер, жара, засуха. Ввиду высокой повторяемости гроз, которые к тому же зачастую сопровождаются интенсивными ливнями и выпадением града, исследование как современного режима грозовой активности, так и его динамики представляет особый интерес. При решении задач мониторинга грозовой активности анализ многолетних данных визуальных наблюдений за грозами на сегодняшний день не имеет альтернативы.

Материалы и методы:

Анализ современного режима грозовой активности в регионе проводился по данным ежесуточных восьмисуточных наблюдений шестнадцати метеорологических станций Ставропольского края. Анализировались как ежесуточные данные – время развития грозового процесса, фактическая продолжительность отдельной грозы, число гроз в течение суток, так и ежемесячные и ежегодные данные наблюдений – число дней с грозой, суммарная годовая и сезонная продолжительность гроз, средняя продолжительность грозы в день с грозой. Кроме того, рассчитывались и анализировались характеристики грозовой активности, осредненные за различные многолетние периоды наблюдений. Кроме того, проанализирован никогда не рассматривавшийся другими исследователями аспект посуточного распределения дней с грозой – отдельных дней с грозой и периодов с ежедневными грозами.

Результаты
исследования:

Анализ полувекового ряда данных метеонаблюдений показал, что в целом Центральное Предкавказье является районом довольно высокой грозовой активности. При этом различия в уровне грозовой активности над низменной, равнинной, возвышенной и предгорной частями региона достаточно велики. В предгорьях дней с грозой отмечается за теплый период года вдвое больше, чем над центральной, возвышенной частью региона, и втрое больше, чем над северной, равнинной низменной частью.

Обсуждение и
заключение:

Несмотря на отмечающееся некоторое снижение грозовой активности на большей части территории, Центральное Предкавказье по-прежнему остается районом повышенной грозовой активности, о чем свидетельствуют как достаточно высокая повторяемость грозоградовых процессов в целом, так и масштабность и интенсивность отдельных процессов. Снижение грозовой активности отмечается в равнинной части Центрального Предкавказья, в центральных районах существенных изменений режима гроз не зафиксировано, в то время как в предгорной зоне имеет место значительное повышение грозовой активности, выражающееся в увеличении как числа дней с грозой, так и суммарной продолжительности гроз. При этом средняя продолжительность отдельного грозового процесса, в среднем за полвека увеличившаяся на 25 минут, в последние годы на большей части территории даже уменьшилась. Имеет место тенденция уменьшения одиночных дней с грозой и увеличение повторяемости периодов с ежедневными грозами. Возросла также повторяемость ночных гроз.

Ключевые слова:

грозовая активность, повторяемость, продолжительность, изменение климата, орография, конвекция, циркуляция атмосферы.

Badakhova G.Kh.,
Lashmanov Yu.K.,
Shmigelsky V.A.

Stavropol Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring
Wednesdays, Stavropol, Russia
"North-Caucasian Federal University", Stavropol, Russia,
badahovag@mail.ru

Dynamics and modern regime of thunderstorm activity over Central Precaucasus territory

Introduction:

In the Central Ciscaucasia, which represents the Stavropol Territory, such dangerous meteorological phenomena as thunderstorms, hail, heavy rain, strong wind, heat, and drought are most often observed. Due to the high frequency of thunderstorms, which are also often accompanied by intense downpours and hail, the study of both the modern thunderstorm mode and its dynamics is of particular interest. When solving the tasks of monitoring thunderstorm activity, the analysis of multi-year data of visual observations of thunderstorms has no alternative today.

Materials and methods:

The analysis of the current mode of thunderstorm activity in the region was carried out according to daily eight-term observations of sixteen meteorological stations in the Stavropol Territory. Analyzed as daily data – the time of development of the thunderstorm process, the actual duration of an individual thunderstorm, the number of thunderstorms during the day, and monthly and annual observational data – the number of days with thunderstorms, the total annual and seasonal duration of thunderstorms, the average duration of thunderstorms per day with thunderstorms. In addition, the characteristics of thunderstorm activity, averaged over various long-term observation periods, were calculated and analyzed. In addition, the aspect of the daily distribution of days with a thunderstorm — separate days with a thunderstorm and periods with daily thunderstorms, which was never considered by other researchers, was analyzed.

Results of the research:

An analysis of a half-century series of meteorological data showed that, in general, the Central Pre-Caucasus is an area of rather high thunderstorm activity. At the same time, the differences in the level of thunderstorm activity above the lowland, flat, elevated and foothill parts of the region are quite large. In the foothills of days with a thunderstorm, for the warm period of the year, twice as many as above the central, elevated part of the region, and three times more than over the northern, lowland lowland.

Discussion and conclusion:

Despite a slight decrease in thunderstorm activity in most parts of the territory, Central Ciscaucasia still remains an area of increased thunderstorm activity, as evidenced by both the relatively high frequency of thunderstorm processes in general and the scale and intensity of individual processes. A decrease in thunderstorm activity is noted in the flat part of the Central Ciscaucasia, in the central regions there are no significant changes in the thunderstorm regime, while in the foothill zone there is a significant increase in thunderstorm activity, manifested in an increase in the number of thunderstorms and the total duration of thunderstorms. At the same time, the average duration of a separate thunderstorm process, which has increased by 25 minutes on average over half a century, has even decreased over most of the territory in recent years. There is a tendency to decrease single days with thunderstorms and an increase in the frequency of occurrence of periods with daily thunderstorms. The frequency of night thunderstorms has also increased.

Keywords:

thunderstorm activity, frequency, duration, climate change, orography, convection, atmospheric circulation.

Введение

Происходящее в настоящее время изменение климата, которое вначале позиционировалось только как глобальное потепление, привело к значительному росту повторяемости и интенсивности экстремальных погодных явлений. Последствия этих явлений варьируют от катастрофических до относительно небольшого ущерба в той или иной отрасли экономики, но всегда негативны. Это, как правило, мезомасштабные явления, поэтому их анализ и прогноз должны основываться на результатах региональных климатических исследований.

В Центральном Предкавказье, которое представляет Ставропольский край, наиболее часто отмечаются такие опасные метеорологические явления как гроза, град, сильный ливень, сильный ветер, жара, засуха. Ввиду высокой повторяемости гроз, которые к тому же зачастую сопровождаются интенсивными ливнями и выпадением града, исследование как современного режима грозовой активности, так и его динамики представляет особый интерес. При решении задач мониторинга грозовой активности анализ многолетних данных визуальных наблюдений за грозами на сегодняшний день не имеет альтернативы.

Материалы и методы исследования

Анализ современного режима грозовой активности в регионе проводился по данным ежесуточных восьмисрочных наблюдений шестнадцати метеорологических станций Ставропольского края. Анализировались как ежесуточные данные – время развития грозового процесса, фактическая продолжительность отдельной грозы, число гроз в течение суток, так и ежемесячные и ежегодные данные наблюдений – число дней с грозой, суммарная годовая и сезонная продолжительность гроз, средняя продолжительность грозы в день с грозой. Кроме того, рассчитывались и анализировались характеристики грозовой активности, осредненные за различные многолетние периоды наблюдений. Кроме того, проанализирован никогда не рассматривавшийся другими исследователями аспект посуточного распределения дней с грозой – отдельных дней с грозой и периодов с ежедневными грозами.

Построены графики полувекового хода основной характеристики грозовой активности в регионе – годового числа дней с грозой и определены тренды изменения этой характеристики в различных физико-географических зонах Центрального Предкавказья.

Территория региона характеризуется резко выраженной неоднородностью рельефа, который по абсолютным высотам можно разделить на низменный (менее 100 м), возвышенный (до 500 м) и среднегорный (более 500 м). Вследствие этого на территории имеет место большое разнообразие ландшафтов – от полупустынь до остепненных лугов среднегорий – со своими климатическими особенностями.

Во избежание излишней громоздкости материала в статье представлены результаты анализа для трех метеостанций региона, максимально разнесенных по широте на территории края, но находящихся примерно на одном меридиане и располагающихся на наиболее характерных для территории Центрального Предкавказья высотах над уровнем моря: Дивное (45°55′ с.ш., 43°21′ в.д.; 86 м), Благодарный (45°06′ с.ш., 43°28′ в.д.; 161 м), Кисловодск (43°53′ с.ш., 42°46′ в.д.; 943 м).

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ полувекового ряда данных метеонаблюдений показал (табл. 1), что в целом Центральное Предкавказье является районом довольно высокой грозовой активности. При этом различия в уровне грозовой активности над низменной, равнинной, возвышенной и предгорной частями региона достаточно велики. В предгорьях дней с грозой отмечается за теплый период года вдвое больше, чем над центральной, возвышенной частью региона, и втрое больше, чем над северной, равнинной низменной частью.

Рассчитанное среднее многолетнее значение годового числа дней с грозой по всем станциям региона [8] за период 1961–2000 гг. позволило определить его зависимость от высоты местности в условиях Центрального Предкавказья (рис. 1). Указанный период был выбран для того, чтобы сравнить полученные результаты с результатами, полученными по расчетам за этот же период для другого района Северного Кавказа.

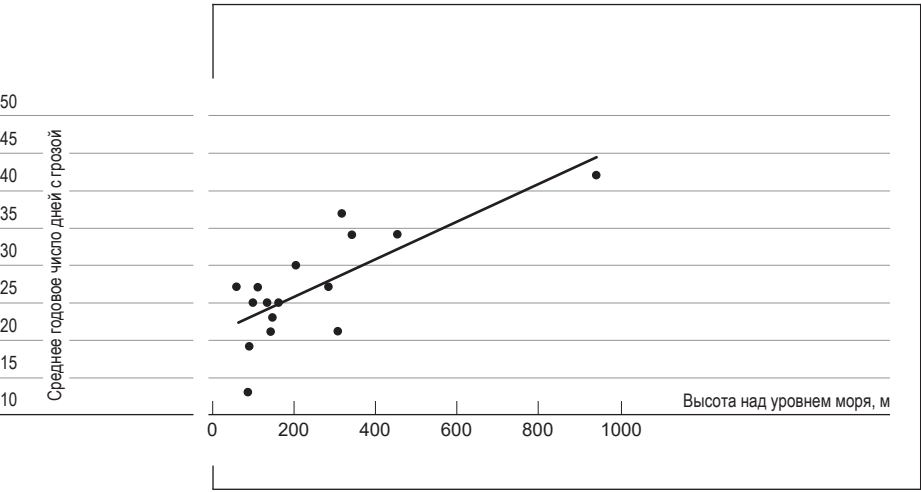


Рис. 1. Зависимость среднего годового числа дней с грозой от высоты местности для Центрального Предкавказья.
Fig. 1. Correlation between average annual amount of thunderstorm days and terrain elevation.

Получено уравнение

$$y = 0.0251x + 20.788,$$

в целом хорошо согласующееся с ранее полученным для этого же периода в [1] для предгорной зоны Северного Кавказа.

Таблица 1. ПОМЕСЯЧНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ДНЕЙ С ГРОЗОЙ
Table . Monthly distribution of thunderstorm days

Станция	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	ТП
Дивное	1	3	4	4	3	2	0	17
Благодарный	1	5	7	5	5	2	*	25
Кисловодск	2.5	9	13	10	10	5	0.5	50

Абсолютное большинство гроз отмечается в теплый период года, точнее – с апреля по сентябрь. В октябре грозы бывают редко, да и то лишь в возвышенной части региона. На холодный период приходится менее 0.5 % годового числа дней с грозой. Суммарная продолжительность гроз также ожидаемо возрастает по мере увеличения абсолютной высоты местности (табл. 2), от 25–30 часов за теплый сезон по разным метеостанциям северной части края до 100 часов в верхней части Ставропольской возвышенности и в предгорьях Кавказа.

Таблица 2. ПОМЕСЯЧНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ГРОЗ (ЧАС)
Table 2. Monthly distribution of the thunderstorm total duration (h)

Станция	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	ТП
Дивное	1	5	8	6	5	3	0	28
Благодарный	1	7	10	8	8	3	*	37
Кисловодск	2.5	19	30	21	19	8	0.5	100

Средняя продолжительность одной грозы в целом по региону варьирует от 1.5 до 2 часов. Самые долгие грозы бушуют в Ставрополе и Кисловодске, как правило, в июне. Нередко складываются условия благоприятные для регенерации грозовых процессов, и тогда в течение суток отмечается несколько периодов грозовой активности. Самые короткие грозы бывают в апреле [8].

В Предкавказье отмечаются как одиночные дни с грозой, так и достаточно длительные периоды с ежедневными грозами (табл. 3). Однако если в равнинной зоне на одиночные дни приходится более 60% всех гроз, то в возвышенной части – менее половины, а в предгорной зоне – чуть более четверти.

Таблица 3. ДОЛЯ ДНЕЙ С ГРОЗОЙ (%), ВХОДЯЩИХ В N-ДНЕВНЫЕ ПЕРИОДЫ (2001–2018 гг.)
Table 3. Proportion of thunderstorm days within n-day periods

Станция	Продолжительность периода, дней						
	1	2	3	4	5	6	7
Дивное	60.8	24.6	11.5	3.1	–	–	–
Благодарный	43.5	27.1	18.6	6.8	–	–	4.0
Кисловодск	26.9	27.4	18.3	8.1	12.7	3.0	3.6

Анализ динамики грозовой активности региона за последние полвека (в сравнении с многолетними данными до 1966 г. [11]) показал, что на фоне наличия значительной межгодовой изменчивости грозовой активности можно все же выделить некоторые общие тенденции.

На севере региона повторяемость гроз за последние 50 лет снизилась, в центральных районах практически не изменилась, а на юге, в предгорьях, заметно увеличилась (табл. 4, рис. 2). За первые 18 лет нового века в Дивном отмечено 379, в Благодарном – 533, в Кисловодске – 1014 дней с грозой.

Таблица 4. ДИНАМИКА ГОДОВОГО ЧИСЛА ДНЕЙ С ГРОЗОЙ ПО 10-ЛЕТИЯМ
Table 4. Dynamics of year quantity of thunderstorm days within ten-year periods

Период	Дивное			Благодарный			Кисловодск		
	ср.	макс	мин	ср.	макс	мин	ср.	макс	мин
До 1966	20	30		25	36		34	49	
1966-1975	22	32	15	24	34	17	38	52	28
1976-1985	19	27	11	24	33	18	43	57	33
1986-1995	10	18	3	23	31	11	43	56	26
1996-2005	16	29	7	25	33	19	45	56	36
2006-2015	17	32	10	25	29	17	50	66	31

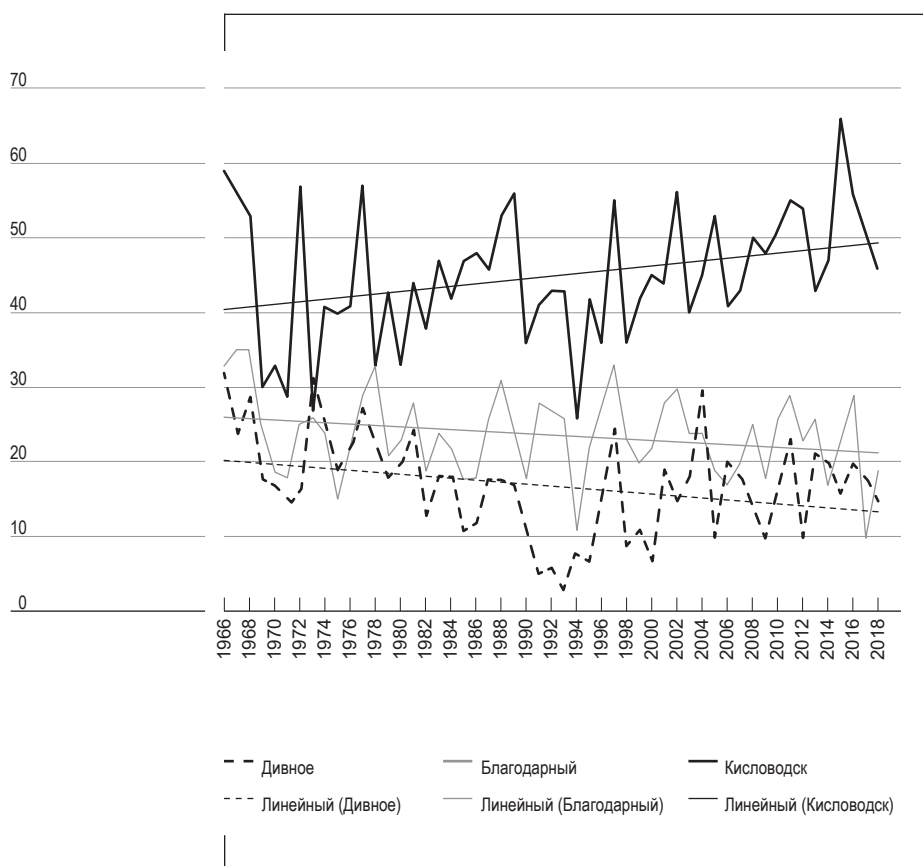


Рис. 2.

Полувековой ход годового числа дней с грозой.

Fig. 2. Annual variability of thunderstorm days quantity within a half-century period.

На основе анализа многолетнего хода годового числа дней с грозой получены уравнения трендов:

для	Дивного	$y = -0.1164x + 20.295;$
для	Благодарного	$y = -0.09x + 26.165;$
для	Кисловодска	$y = 0.1685x + 40.488.$

Что касается средней продолжительности гроз, то эта характеристика грозовой активности в Справочнике по климату СССР [11] приведена лишь для трех станций Ставропольского края. Однако на основе этих данных, а также данных по всем станциям Центрального Предкавказья, приведенным в [8], можно сделать вывод, что суммарная продолжительность гроз также сократилась в северной, равнинной части региона, несколько увеличилась в центральной, возвышенной части и вдвое возросла в предгорной

зоне. Так, в Кисловодске в первой половине XX века она составляла 51 час, во второй половине – 91 час, в 2001–2018 гг. – уже 104 часа. За первые 18 лет XXI века наибольшая суммарная продолжительность гроз в течение теплого периода отмечена в 2012 году в Кисловодске (131 час), наименьшая – в 2006 году в Рожино (12 часов).

Анализ суточных данных о продолжительности гроз показал, что средняя продолжительность одной грозы на юге рассматриваемой территории увеличилась на полчаса по сравнению с периодом до 1966 года и за последние полвека составила по десятилетиям от 2,0 до 2,2 часа. При этом отмечается увеличение числа дней с грозами, охватывающими большую территорию. На фоне повышения минимальных суточных температур возросла повторяемость ночных гроз. Отмеченная в [3] тенденция увеличения повторяемости многодневных периодов с грозами в целом сохраняется. Так, в первой половине XX века в Кисловодске было отмечено 11 периодов продолжительностью более 5 дней каждый, в 1961–2001 гг. таких периодов было отмечено уже 47 [4], а за 18 лет нового века – около 30.

Начало периода грозовой активности приходится 15–25 апреля. В среднем в 10 % лет отмечается гроза в марте. В связи с потеплением осени возрастает повторяемость сентябрьских и октябрьских гроз, хотя октябрьские грозы – все же явление редкое. На юге региона возросла повторяемость гроз, сопровождающихся выпадением града. На севере, напротив, возросла повторяемость «сухих» гроз.

Одной из причин отмеченных изменений режима грозовой активности является, конечно же, потепление климата. Повышение температур, в том числе и в теплый период года, более существенно в северных и северо-восточных, районах рассматриваемой территории. При этом прирост температур превышает прирост осадков, и в целом эти районы становятся более засушливыми [6]. В центральной части региона в многолетнем плане изменения вышеуказанных характеристик климата примерно сбалансированы. В предгорных и среднегорных районах повышение температуры теплого периода не столь значительно, а увеличение количества осадков и дней с осадками, в том числе и с грозами, более заметно, что в огромной степени обусловлено рельефом местности [5].

Именно характер взаимодействия фронтальной поверхности с рельефом обуславливает характер мезомасштабной циркуляции, которая может как стимулировать конвекцию, так и гасить её, трансформируя общий фоновый процесс. Для территории Центрального Предкавказья, как и для всего Северного Кавказа вообще, в целом характерно широтное (в основном с запада и северо-запада) перемещение атмосферных фронтов, обуславливающих развитие конвективной облачности и формирование ливневых осадков.

При приближении к горам атмосферный фронт получает добавочную вертикальную составляющую скорости:

$$w_h = U \frac{\partial h}{\partial x} + V \frac{\partial h}{\partial y},$$

где h – высота горного хребта,
 U и V – горизонтальные составляющие скорости ветра.

Она существенно зависит от формы и высоты гор. В отдельных случаях она составляет 8–13 м/с, что на порядок превышает вертикальные движения воздушных масс на поверхности фронтального раздела.

Под влиянием рельефа изменяется не только скорость, но и направление движения. Так, над Северным Кавказом северо-западное перемещение часто трансформируется в северное, поскольку юго-западный участок атмосферного фронта достигает горных препятствий раньше центральной части, а тем более северо-восточной периферии. При этом юго-западный участок фронта начнет деформироваться, в то время как его центральная и северо-восточная части будут перемещаться над равниной, не претерпевая изменений [12]. Активная облако- и осадкообразующая деятельность отмечается в той части края, где наблюдается оптимальное сочетание динамических, температурных и влажностных характеристик в нижней тропосфере.

Динамические характеристики нижней тропосферы в определенной степени также зависят от рельефа, поскольку орографические условия играют исключительно важную роль в формировании струи восходящего воздуха и последующего развития процесса облакообразования. В [7] получено выражение для определения скорости движения воздуха W в зависимости от температуры и давления вне струи и внутри ее (обозначены индексами i и e соответственно):

$$\frac{W^2(Z)}{2} = g \int_{Z_i}^Z \frac{T_i - T_e}{T_e} dZ + \frac{p_e - p_i}{\rho_e},$$

откуда следует, что скорость потока в струе зависит не только от силы плавучести, определяемой разностью температур в струе и вне ее, но и от разности давлений в окружающей среде и в облаке. При значительной величине разности давлений $p_e - p_i > 0$, которая в зрелом кучево-дождевом облаке достигает ~ 10 гПа, воздух может подниматься в нижней части струи, даже если он холоднее окружающего, т. е. при $\Delta T = T_e - T_i > 0$.

В этой же работе проведена оценка термодинамических параметров воздуха в струе (T_i , p_i , ρ_i) на различных уровнях. Получено, что на верхнем уровне

$$\frac{W^2(Z_2)}{2} = g \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{T_i - T_e}{T_e} dZ = 0,$$

то есть при стационарном течении процесса и отсутствии трения суммарная удельная

механическая энергия при прохождении воздуха от нижнего уровня до верхнего равна нулю. Таким образом, из последнего уравнения следует, что струя включает в себя области, где воздух как теплее ($\Delta T > 0$), так и холоднее ($\Delta T < 0$) окружающего атмосферного воздуха. Ниже уровня Z_1 (при $Z_1 \gg 0$) и выше уровня Z_2 температура в облаке ниже, чем в окружающей атмосфере.

Таким образом, в нижней части струи температура поднимающегося воздуха меньше, чем в окружающей атмосфере ($\Delta T < 0$), давление также меньше ($\Delta p < 0$), а плотность воздуха – больше ($\Delta \rho > 0$). В верхней части мощной восходящей струи наблюдается аналогичная картина, а в центре струи температура воздуха больше, а плотность и давление меньше, чем в окружающей атмосфере [7]. При этом баланс разностей температур в целом в струе нулевой.

Из вышеизложенного следует, что при отрицательной плавучести в основании облака развитие восходящих потоков, т.е. конвекции, возможно за счет динамического фактора. Полученный теоретический результат объясняет формирование конвективной облачности и выпадения ливневых осадков в предгорной и среднегорной части территории при относительно невысоком температурном фоне.

Исследования Института географии РАН [9] показали, что росту повторяемости гроз способствовали изменения атмосферной циркуляции, необычайно высокая активность южных циклонов, связанная с повышенной теплоотдачей океана в атмосферу в тропических широтах. В конце XX века произошел резкий скачок продолжительности меридиональных южных процессов. При этом продолжительность меридиональной северной группы осталась по-прежнему высокой, а все остальные группы циркуляций заметно сократились. Такая перестройка атмосферной циркуляции благоприятствует беспрепятственному прохождению вторгающихся с севера воздушных масс через открытые для них равнинные северные районы Предкавказья, частично стимулированию конвекции в центральных районах, равно прикрытых орографически как широтно, так и меридионально, и значительному усилению конвекции в предгорной зоне на фоне снижения широтного переноса.

Выводы

Несмотря на отмечающееся некоторое снижение грозовой активности на большей части территории, Центральное Предкавказье по-прежнему остается районом повышенной грозовой активности, о чем свидетель-

ствуют как достаточно высокая повторяемость грозоградовых процессов в целом, так и масштабность и интенсивность отдельных процессов. Снижение грозовой активности отмечается в равнинной части Центрального Предкавказья, в центральных районах существенных изменений режима гроз не зафиксировано, в то время как в предгорной зоне имеет место значительное повышение грозовой активности, выражающееся в увеличении как числа дней с грозой, так и суммарной продолжительности гроз. При этом средняя продолжительность отдельного грозового процесса, в среднем за полвека увеличившаяся на 25 минут, в последние годы на большей части территории даже уменьшилась. Имеет место тенденция уменьшения одиночных дней с грозой и увеличение повторяемости периодов с ежедневными грозами. Возросла также повторяемость ночных гроз.

Важнейшими причинами изменения режима грозовой активности являются потепление климата и, в особенности, изменения атмосферной циркуляции, тип которой обуславливает характер взаимодействия атмосферных фронтов с рельефом и возникновение мезомасштабной циркуляции. Трансформация динамической структуры фронтальных поверхностей в условиях Центрального Предкавказья происходит при их продвижении к югу и по мере перехода рельефа от равнинного к горному обуславливает определенную трансформацию полей метеоэлементов в нижней тропосфере, которая инициирует развитие конвекции или тормозит ее.

Теоретически показано, что рельефу как динамическому фактору принадлежит исключительно важная роль в процессе формирования и развития конвективных процессов в атмосфере, вплоть до возникновения конвективных движений в условиях отрицательной плавучести. Произошедшие изменения атмосферной циркуляции усилили действие динамического фактора, что привело к повышению грозовой активности в южных и юго-западных районах Центрального Предкавказья, в условиях относительно больших высот и значительной расчлененности рельефа.

Библиографический список

1. Аджиев А.Х. Климатологические и статистические характеристики гроз на Кавказе // Тр. ВГИ. 1999. Вып. 90. С. 64–70.
2. Аджиев А.Х., Аджиева А.А., Тумгоева Х.А. Влияние орографии на характеристики грозовой активности деятельности // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2008. № 3. С. 109-112.
3. Аджиев А.Х., Бадахова Г.Х. Динамика грозовой активности в регионе Кавказских Минеральных Вод в XX веке//Физика облаков

и активные воздействия на гидрометеорологические процессы: Доклады Всероссийской конференции. Москва, 2008. С. 206–213.

4. Бадахова Г.Х., Акопов Г.А. Вековой мониторинг грозовой активности в предгорной зоне Центрального Предкавказья // Теоретические и практические аспекты научной мысли в современном мире: Сб. статей международной научно-практической конференции в 4 частях. Оренбург, 2017. С. 25–29.
5. Бадахова Г.Х., Байрамкулова Б.О., Гаджимурадова З.М., Джандубаева Т.З. Мониторинг современных климатических изменений на территории Предкавказья // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2013. № 2 (23). С. 109–115.
6. Бадахова Г.Х., Барекова М.В., Каплан Г.Л. Особенности изменчивости регионального климата сухостепных ландшафтов Ставропольского края // Известия вузов Северного Кавказа. Естественные науки. 2014. № 2. С. 81–85.
7. Бадахова Г.Х., Гораль Г.Г., Каплан Л.Г., Федченко Л.М. Роль термического и динамического факторов в разрешении энергии неустойчивости атмосферы // Тр. ВГИ. 1990. Вып. 81. С. 84–91.
8. Бадахова Г.Х., Кнутас А.В. Ставропольский край: современные климатические условия. Ставрополь: Краевые сети связи, 2007.
9. Кононова Н.К. Изменения циркуляции атмосферы Северного полушария в XX–XXI столетиях и их последствия для климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. Т. 1. № 1. С. 133–162.
10. Раков В.А., Дульзон А.А. О широтных особенностях грозовой деятельности // Метеорология и гидрология. 1984. № 1. С. 52–57.
11. Справочник по климату СССР. Вып. 13. Ч. 5. Облачность и атмосферные явления. Л.: Гидрометеиздат, 1968.
12. Федченко Л.М. Влияние рельефа Северного Кавказа на трансформацию метеорологических элементов и локализацию конвективных процессов // Метеорология и гидрология. 1987. № 6. С. 55–64.

References

1. Adzhiev A.H. Klimatologicheskie i statisticheskie harakteristiki groz na Kavkaze // Tr. VGI. 1999. Vyp. 90. S. 64–70.
2. Adzhiev A.H., Adzhieva A.A., Tumgoeva H.A. Vliyaniye orografii na harakteristiki grozovoy aktivnosti deyatel'nosti // Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennyye nauki. 2008. № 3. S. 109–112.
3. Adzhiev A.H., Badahova G.H. Dinamika grozovoy aktivnosti v regione Kavkazskih Mineral'nyh Vod v XX veke // Fizika oblakov i aktivnie vozdejstviya na gidrometeorologicheskie process: Doklady Vserossiyskoj konferencii. Moskva, 2008. S. 206–213.

4. Badahova G.H., Akopov G.A. Vekovoj monitoring grozovoj aktivnosti v predgornoj zone Central'nogo Predkavkaz'ya // Teoreticheskie i prakticheskie aspekty nauchnoj mysli v sovremennom mire: Sb. statej mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii v 4 chastyah. Orenburg. 2017. S. 25-29.
5. Badahova G.H., Bajramkulova B.O., Gadzhimuradova Z.M., Dzhandubaeva T.Z. Monitoring sovremennyh klimaticheskikh izmenenij na territorii Predkavkaz'ya//Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki. 2013. № 2 (23). S. 109–115.
6. Badahova G.H., Barekova M.V., Kaplan G.L. Osobennosti izmenchivosti regional'nogo klimata suhostepnyh landshaftov Stavropol'skogo kraja// Izvestiya vuzov Severnogo Kavkaza. Estestvennye nauki. № 2, 2014. S. 81-85.
7. Badahova G.H., Goral' G.G., Kaplan L.G., Fedchenko L.M. Rol' termicheskogo i dinamicheskogo faktorov v razreshenii energii neustojchivosti atmosfery// Tr. VGI. 1990. Vyp. 81. S. 84-91.
8. Badahova G.H., Knutas A.V. Stavropol'skiy kraj: sovremennye klimaticheskie usloviya. Stavropol': GUP SK «Kraevye seti svyazi», 2007.
9. Kononova N.K. Izmeneniya cirkulyacii atmosfery Severnogo polushariya v XX–XXI stoletiyah I ih posledstviya dlya klimata // Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya. 2015. T. 1. № 1. S. 133–162.
10. Rakov V.A., Dul'zon A.A. O shirotnyh osobennostyah grozovoj deyatel'nosti // Meteorologiya i gidrologiya. 1984. № 1. S. 52-57.
11. Spravochnik po klimatu SSSR. Vyp. 13. Ch. 5. Oblachnost' i atmosferynye yavleniya. L.: Gidrometeoizdat, 1968.
12. Fedchenko L.M. Vliyanie rel'efa Severnogo Kavkaza na transformatsiyu meteorologicheskikh elementov i lokalizatsiyu konvektivnyh protsessov // Meteorologiya i gidrologiya. 1987. № 6. S. 55-64.

Об авторах

Бадахова Галина Хамзатовна, ведущий метеоролог Ставропольского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, ст. преподаватель кафедры общей и теоретической физики ИМЕН СКФУ. Телефон: 8-918-787-56-25.
E-mail: badahovag@mail.ru.

Лашманов Юрий Константинович, зам. начальника Ставропольского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Телефон: 8-962-40-56-13 E-mail: skylab2003@mail.ru.

Шмигельский Владимир Андреевич, аспирант кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета. Телефон 8(906) 470-57-25, E-mail: shmigelskiy.92777@mail.ru, ResearcherID is: Q-3869-2018

About the authors

Badakhova Galina Khamzatovna, leading meteorologist of the Stavropol Center on hydrometeorology and environmental monitoring, art. Lecturer, Department of General and Theoretical Physics, NAME SKFU. Phone: 8-918-787-56-25. E-mail: badahovag@mail.ru.

Lashmanov Yury Konstantinovich, deputy. Head of the Stavropol Center on hydrometeorology and environmental monitoring. Phone: 8-962-40-56-13 E-mail: skylab2003@mail.ru.

Shimelsky Vladimir Andreevich, post-graduate student of the Department of General and Theoretical Physics of the North Caucasus Federal University, Phone 8 (906) 470-57-25 E-mail: shmigelskiy.92777@mail.ru, ResearcherIDis: Q-3869-2018

25.00.29

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

ДАНИЛОВА Н.Е.,
СЕМЕНОВА Ю.А.,
СМЕРЕК Ю.Л.,
ЗАКИНЯН Р.Г.

УДК 551.513.22
Северо-Кавказский федеральный университет,
г. Ставрополь, Россия
zakinyan@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ПОДОБЛАЧНОЙ КОНВЕКЦИИ НА РАЗВИТИЕ ОБЛАЧНОЙ КОНВЕКЦИИ

Введение:

Облачная конвекция является причиной опасных явлений погоды [23]. Так сильные дожди и последующие наводнения являются прямым следствием конвективных штормов. Явления шторма часто сильно локализованы, поэтому прогнозирование того, почему, где и когда шторм развивается, является одной из самых сложных проблем в прогнозе погоды [10]. На сегодняшний день оперативные численные модели часто не могут предсказать местоположение и время начала облачной конвекции при инициировании ее процессами в подоблачном слое, поскольку эти процессы недостаточно хорошо представлены в моделях. Однако влияние этих процессов на инициирование облачной конвекции часто отмечается в исследованиях [25, 39], так что для прогнозирования начала облачной конвекции требуется знание термодинамики и динамики подоблачного слоя.

Материалы и методы:

Для прогноза параметров облачной конвекции используются данные радиозондирования, которые наносятся на аэрологическую диаграмму. Как правило, при этом делается допущение, что скорость восходящих потоков и перегрев на уровне конденсации равны нулю. Но это не всегда так. Поэтому представляется важным определить, как параметры приземного слоя влияют на значения параметров облачной конвекции на уровне конденсации.

Результаты
исследования:

в статье разработана математическая модель конвекции влажного подоблачного слоя атмосферы. Математическая модель представляет собой систему уравнений движений, теплопроводности и неразрывности, записанные в двумерной вертикальной плоскости. Получено аналитическое решение указанной системы. Установлены выражения для уровня конвекции, уровня максимальной скорости, для профиля вертикальной и горизонтальной составляющей скорости, вертикальное распределение температуры. Из указанных выражений выведен критерий развития подоблачной конвекции. Полученные выражения позволяют в свою очередь вывести выражения для параметров конвекции на уровне конденсации. А это в свою очередь позволяет вывести критерий развития облачной конвекции. Установлено, что развитие облачной конвекции зависит, как от абсолютных значений дефицита точки росы в приземном слое, так и в большей степени от вертикального градиента массовой доли водяного пара. В частности при критическом значении вертикального градиента массовой доли водяного пара наблюдается «взрывной рост» конвекции.

Обсуждение и
заключение:

Получены аналитические выражения для дефицитов точки росы в приземном слое, определяющие значения функции перегрева и скорости восходящих потоков на уровне конденсации. Показано, что на развитие подоблачной конвекции существенное влияние оказывает значение массовой доли водяного пара. Установлено, что при значениях градиента массовой доли водяного пара, приближающихся к критическому значению, наблюдается «взрывной» рост конвективных ячеек в подоблачном слое. Также показано, что существует критическое значение градиента массовой доли водяного, способствующее развитию облачной конвекции.

Ключевые слова:

приземный слой атмосферы, подоблачная конвекция, уровень конденсации, облачная конвекция, двумерная модель конвекции, аналитическое решение/

Danilova N.Ye.,
Semyonova Yu.A.,
Smerek Yu. L.,
Zakinyan R.G.

North-Caucasian Federal University,
Stavropol, Russia,
zakinyan@mail.ru

Influence under-cloudy convections on development of a cloudy convection

- Introduction:** Cloud convection causes hazardous weather [23]. So heavy rains and subsequent floods are a direct consequence of convective storms. Storm phenomena are often highly localized, so predicting why, where and when a storm develops is one of the most difficult problems in weather forecasting [10]. Today, operational numerical models often cannot predict the location and time of the onset of cloud convection when it is initiated in the skid layer, since these processes are not well represented in the models. However, the influence of these processes on the initiation of cloud convection is often noted in studies [25, 39], so that to predict the beginning of cloud convection requires knowledge of the thermodynamics and dynamics of the sub-cloud layer.
- Materials and methods:** To predict the parameters of cloud convection, radiosonde data is used, which are plotted on the upper-air diagram. As a rule, it is assumed that the rate of ascending flows and overheating at the level of condensation are zero. But it's not always the case. Therefore, it is important to determine how the parameters of the surface layer affect the values of the parameters of cloud convection at the level of condensation.
- Results:** In the article the mathematical model of a convection moist under-cloud layer atmosphere is developed. The mathematical model represents system of the equations of movements, heat conductivity and the continuity, recorded in a two-dimensional vertical plane. The analytical solution of the indicated system is received. Expressions for level of convection, level of the maximum velocity, for vertical and horizontal components of velocity, vertical distribution of temperature are established. From the indicated expressions the criterion of development under cloudy convections is derived. The received expressions allow derived in turn expressions for convection parameters on a condensation level. And it in turn allows derived criterion of development of a cloudy convection. It is established that development of a cloudy convection depends, as from absolute values of deficit of dew point in a ground layer, and in a greater degree from a vertical gradient of a mass fraction of a water vapor. In particular at critical value of a vertical gradient of a mass fraction of water vapor «explosive growth» convections is observed.
- Discussion and conclusion:** Analytical expressions are obtained for the dew point deficiencies in the surface layer, which determine the values of the overheating function and the ascending flow rate at the condensation level. It has been shown that the development of subliminal convection is significantly affected by the value of the mass fraction of water vapor. It has been established that with the values of the gradient of the mass fraction of water vapor approaching the critical value, there is an "explosive" growth of convective cells in the sub-layer. It is also shown that there is a critical value of the gradient of the mass fraction of water, contributing to the development of cloud convection.
- Keywords:** surface layer of atmosphere, under-cloudy convection, a condensation level, a cloudy convection, two-dimensional model of convection, the analytical solution

Введение

Очевидно, что характеристики приземного слоя влияют на развитие конвекции в подоблачном слое, что в свою очередь сказывается на развитии облачной конвекции. Вопрос заключается в том, какие характеристики приземного слоя в большей или меньшей степени влияют на развитие, в конечном счете, облачной конвекции. Так, в статье [11] приводятся экспериментальные подтверждения влияния вертикального профиля влажности на развитие конвекции. Исследованию влияния вертикального распределения

температуры и влажности приземного слоя на состояние свободной тропосферы посвящена статья [33].

Надо заметить, что, хотя конвективное движение является одним из самых распространенных видов движений в атмосфере, как физика этого процесса, так и его математическое описание остаются открытыми. Считается, что конвекция начинается с формированием термиков [14]. Физика образования термиков аналогична фазовому переходу. Здесь аналогично при определенных условиях возникает термик критического размера. Если размер термика меньше критического, то он неустойчив и со временем исчезает. Если же размер термика больше критического размера, то он устойчив. Далее он отрывается и растет. Вопрос о размере критического термика с точки зрения теории остается открытым. Как правило, его определяют из баланса силы плавучести и силы сопротивления Стокса.

Есть еще один аспект, который делает представленное в настоящей работе исследование актуальным. В настоящее время эффекты, связанные с мелкомасштабными процессами, к которым относится мелкая конвекция параметризуются в общей циркуляционной, региональной или мезомасштабной моделях. От того, насколько хорошо мы понимаем с точки зрения физики и умеем описывать эти процессы, будет зависеть качество прогнозов в глобальных и региональных моделях [17, 28]. Подоблачная конвекция определяет вертикальное распределение влажности, теплоты и импульса и играет ключевую роль в глобальном гидрологическом и энергетическом цикле [2, 7, 16, 24, 34, 41]. Для углубления понимания роли процессов подоблачного слоя в климатических моделях использовались простые одномерные модели [3, 3, 8, 12, 15, 26, 33] и их совершенствование является актуальной задачей.

Облачная конвекция является причиной опасных явлений погоды [23]. Так сильные дожди и последующие наводнения являются прямым следствием конвективных штормов. Явления шторма часто сильно локализованы, поэтому прогнозирование того, почему, где и когда шторм развивается, является одной из самых сложных проблем в прогнозе погоды [10]. На сегодняшний день оперативные численные модели часто не могут предсказать местоположение и время начала облачной конвекции при инициировании ее процессами в подоблачном слое, поскольку эти процессы недостаточно хорошо представлены в моделях. Однако влияние этих процессов на инициирование облачной конвекции часто отмечается в исследованиях [25, 39], так что для прогнозирования начала облачной конвекции требуется знание термодинамики и динамики подоблачного слоя.

Проведенные ранее полевые исследования дают представление о процессах, вызывающих инициирование облачной конвекции [18, 35, 37, 39]. Хотя имеется хорошее понимание общей динамики рассматриваемых процессов, начальная стадия развития конвективных ячеек остается недостаточно изученной [4].

В ряде исследований предполагалось [9, 11], что инициирование облачной конвекции очень чувствительно к вариациям температуры и влажности в подоблачном слое. В частности, поле влажности подоблачного слоя является ключевым фактором для понимания инициирования осадкообразующей конвекции [20]. Небольшие изменения в массовой доле водяного пара могут управлять процессом и определять, происходят ли штормы или нет. И что особенно важно, изменения приблизительно в 1 g/kg в массовой доле водяного пара могут дать диаметрально противоположные прогнозы: отсутствие конвекции или интенсивная конвекция [11]. Много исследований проведено по изучению влияния влажности поверхности на развитие конвекции [31, 44]. Главный механизм положительной обратной связи заключается в том, что влажный грунт обогащает воздух пограничного слоя влажностью [5, 13].

Таким образом, понимание и успешное предсказание штормового инициирования зависят от точного определения начальных термодинамических и кинематических полей подоблачного слоя, с особым вниманием к полям влажности водяного пара. Вообще, типичное разрешение обычных систем наблюдения, таких как радиозонды, недостаточно для того, чтобы наблюдать изменчивость параметров в подоблачном слое атмосферы. В ряде исследований [37] предполагалось, что критическим фактором, ограничивающим прогноз конвективных осадков, является неопределенность измерения вертикального распространения водяного пара. Радиозонды, являющиеся традиционными средствами измерения содержания водяного пара, недостаточны для этих целей. Это связано с тем, что они предоставляют информацию о вертикальном профиле в широко распределенных пунктах зондирования и обычно доступны только два раза в день, иногда содержа существенные погрешности [32, 36].

Таким образом, влиянию характеристик приземного слоя атмосферы на развитие, как крупномасштабной циркуляции [1, 27], так и развитие облачной конвекции посвящено много работ [6].

В настоящей работе и подоблачная и облачная конвекция описываются с помощью двухмерной модели. Находятся соответствующие аналитические решения, а также выявляются критерии влияния параметров приземного слоя атмосферы на развитие облачной конвекции.

Материалы и методы исследования

Для прогноза параметров облачной конвекции используются данные радиозондирования, которые наносятся на аэрологическую диаграмму. Как правило, при этом делается допущение, что скорость восходящих потоков и перегрев на уровне конденсации равны нулю. А это не всегда так. Поэтому представляется важным определить, как параметры приземного слоя влияют на значения параметров облачной конвекции на уровне конденсации.

В работе [42] было получено аналитическое решение двумерной задачи тепловой конвекции сухого воздуха в атмосфере. Причем воздух считался абсолютно сухим. А в работе [43] получено аналитическое решение двумерной модели конвекции влажнонасыщенного воздуха. Последний случай для краткости изложения будем называть «облачной» конвекцией. Таким образом, у нас есть аналитическое решение двумерной модели конвекции сухого воздуха, которую будем называть «подоблачной» конвекцией, и аналитическое решение «облачной» конвекции. Целью настоящей работы является применить полученные в работах [42, 43] результаты для анализа влияния характеристик приземного слоя атмосферы на развитие облачной конвекции.

Для описания облачной конвекции нужно знать параметры конвекции, такие как функция перегрева, скорость восходящих потоков и массовая доля водяного пара на уровне конденсации. Эти параметры могут быть найдены из рассмотрения подоблачной конвекции. Она в свою очередь определяется характеристиками приземного слоя. Таким образом, характеристики приземного слоя определяют характер облачной конвекции. Задача настоящей работы состоит в том, чтобы эту связь установить. Ранее, как было отмечено во введении, такие исследования выполнялись численно и экспериментально или же использовались одномерные модели конвекции. Здесь же мы исследуем данную задачу аналитически в рамках двумерной нелинейной модели конвекции. Данный анализ, как уже было сказано, основан на полученных нами ранее аналитических решениях конвекции сухого и влажного насыщенного воздуха.

Уравнения тепловой конвекции влажного воздуха

Подоблачный воздух не является сухим. Поэтому нам необходимо, предварительно, описать конвекцию влажного ненасыщенного воздуха. По аналогии с работой [42], где мы получили аналитическое решение двумерной модели конвекции сухого воздуха, получим теперь решение для конвекции влажного ненасыщенного воздуха и рассмотрим влияние параметров приземного слоя атмосферы на развитие облачной конвекции, т.е. на значения параметров конвекции на уровне конденсации.

В настоящем разделе мы шаг за шагом повторим вывод, проделанный нами в работе [42], но учтем, что воздух теперь влажный. Уравнение движения рассматривается в плоскости (x, z) . Давление представляется в виде суммы давлений в состоянии статики и его возмущения: $p = \bar{p} + p'$. Плотность влажного воздуха определим выражением:

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

где $\alpha = \frac{1}{T_0}$ – коэффициент теплового расширения воздуха ($T_0 = 273 \text{ K}$);

$\Delta T(z) = T_i(z) - T_e(z)$ – функция перегрева;

$\Delta T_i, T_e$ – температура воздуха, соответственно, возмущенной и не-
возмущенной атмосферы;

S – массовая доля водяного пара;

$\Delta s = s_i - s_e$ – функция пересыщения;

$$\beta \equiv \frac{M_d}{M_v} - 1 = 0.608;$$

$M_d = 29$ g/mol – молярная масса сухого воздуха;

$M_v = 18$ g/mol – молярная масса водяного пара.

Здесь ρ_i – плотность воздуха возмущенной атмосферы;

ρ_e – плотность воздуха в состоянии статикатмосферы. Параметры окружающей атмосферы мы рассматриваем как не-возмущенное состояние. Для атмосферы $\alpha \Delta T < 1$. Считается, что подъем воздушной частицы происходит адиабатически. Другими словами, при приближении (1) предполагается, что плотность воздуха зависит от температуры и массовой доли водяного пара и не зависит от давления [14, 21].

Функция перегрева равна:

$$\Delta T(z) = \Delta_0 T - \Delta \gamma \cdot z, \quad (2)$$

где $\Delta_0 T = T_{i0} - T_{e0}$ – значение функции перегрева вблизи поверхности земли;

$\Delta \gamma = \gamma_a - \gamma$, где γ – градиент температуры воздуха невозмущенной атмосферы в состоянии статики;

γ_a – сухоадиабатический градиент температуры;

T_{i0} – температура воздуха вблизи поверхности земли возмущенной атмосферы;

T_{e0} – температура воздуха вблизи поверхности земли невозмущенной атмосферы в состоянии статики.

Для адиабатически поднимающейся воздушной частицы массовая доля водяного пара остается постоянной $s_i(z) = s_{i0}$, где s_{i0} – массовая доля водяного пара вблизи поверхности земли. Пусть в невозмущенной атмосфере в состоянии статики массовая доля водяного пара убывает по линейному закону

$$s_e(z) = s_{e0} - bz, \quad (3)$$

где b – градиент массовой доли водяного пара. Тогда для функции пересыщения получим выражение

$$\Delta s(z) = \Delta_0 s + bz, \quad (4)$$

где $\Delta_0 s = s_{i0} - s_{e0}$

– пересыщение у поверхности земли. Выражение для плотности воздушной частицы запишется в виде

$$\rho_i = \rho_e \left[1 - (\alpha \Delta_0 T + \beta \Delta_0 s) + (\alpha \Delta \gamma - \beta b) z \right]. \quad (5)$$

Отсюда найдем уровень выравнивания плотностей воздуха в воздушной частице и невозмущенной атмосфере

$$z_p = \frac{\alpha \Delta_0 T + \beta \Delta_0 s}{\alpha \Delta \gamma - \beta b}. \quad (6)$$

Из формулы (6), формально принимая $\beta = 0$, получим выражение для уровня выравнивания температур $z_t = \frac{\Delta_0 T}{\Delta \gamma}$, которое следует непосредственно из формулы (2). Отсюда видно, что уровень выравнивания плотностей воздуха для влажной частицы выше, чем уровень выравнивания температур.

Принимая во внимание уравнение статики, которое имеет место для невозмущенной атмосферы, система уравнений, описывающих тепловую конвекцию влажного ненасыщенного воздуха в стационарном состоянии, представится в виде:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p'}{\partial x}, \quad (7)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = g (\alpha \Delta_0 T + \beta \Delta_0 s - (\alpha \Delta \gamma - \beta b) \cdot z), \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (9)$$

Здесь мы при записи уравнения (8) сделали допущение, такое же, как в работе [22]:

$$- \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p'}{\partial z} \ll g (\alpha \Delta T + \beta \Delta s).$$

Из уравнения неразрывности (9) следует, что можно ввести функцию тока ψ следующим образом:

$$u = - \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad w = \frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (10)$$

Сравнивая эту систему с системой уравнений тепловой конвекции сухого воздуха [42], замечаем, что они отличаются только лишь правой частью в уравнении (8). Поэтому решение системы уравнений (7) – (9) находится аналогично системе уравнений для сухого воздуха.

Из формулы (6) следует, что, если градиент массовой доли водяного пара будет приближаться к критическому значению, равному $b_{cr} = \alpha \Delta \gamma / \beta$, уровень выравнивания плотностей будет стремиться к бесконечности, произой-

дет так называемое «взрывное» усиление конвекции. Данный факт является отличительной особенностью конвекции во влажной атмосфере по отношению к конвекции сухого воздуха.

Таким образом, мы видим, что критическим параметром для конвекции является не абсолютное значение массовой доли водяного пара вблизи поверхности земли, а его вертикальный градиент.

Найдем значение критического градиента массовой доли водяного пара при условии, что $\gamma = 0$:

$$(b_{cr})_{\max} = \frac{\alpha \Delta \gamma}{\beta} = 10 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}. \quad (10)$$

Для случая конвекции влажного ненасыщенного воздуха функция тока имеет вид

$$\psi = \frac{\sqrt{g(\alpha \Delta \gamma - \beta b)}}{k} \sqrt{z(2z_p - z)} \cos kx. \quad (11)$$

Отсюда для проекций скорости получим выражения:

$$u = \frac{\sqrt{g(\alpha \Delta \gamma - \beta b)}}{k} \frac{z_p - z}{\sqrt{z(2z_p - z)}} \cos kx, \quad (12)$$

$$w = \sqrt{g(\alpha \Delta \gamma - \beta b)} \cdot \sqrt{z(2z_p - z)} \sin kx. \quad (13)$$

Отсюда из условия $w = 0$ для уровня конвекции влажного ненасыщенного воздуха получим выражение

$$z_w = 2z_p = 2 \frac{\alpha \Delta_0 T + \beta \Delta_0 s}{\alpha \Delta \gamma - \beta b}. \quad (14)$$

Из (14) видно, что уровень конвекции зависит, как от перегрева и пересыщения в приземном слое, так и от вертикальных градиентов температуры и массовой доли водяного пара. Оценки параметров, входящих в формулу (14) показывают, что фактор перегрева $\Delta_0 T$ сильнее влияет на развитие конвекции, чем фактор пересыщения $\Delta_0 s$. Как видно из формулы (14) наиболее существенным фактором является градиент массовой доли водяного пара b . Если градиент массовой доли водяного пара приближается к критическому значению, то происходит «взрывное» усиление конвекции, т. е. уровень конвекции растет и стремится к бесконечности. По поводу «взрывного» роста следует заметить, что в нашей модели конвекции не учитывается вязкость воздуха. Поэтому, учет вязкости ограничит рост уровня конвекции.

Уровень максимальных скоростей найдем из условия: $dw/dz = 0$. Взяв производную по переменной z в выражении (13), получим

$$\frac{\partial w}{\partial z} = \tilde{N}_{BV} \frac{z_p - z}{\sqrt{z(2z_p - z)}} \sin kx = 0, \quad (15)$$

где величину $\tilde{N}_{BV} = \sqrt{g(\alpha\Delta\gamma - \beta b)}$ (16)

назовем частотой Брента – Вайсяля колебаний влажного ненасыщенного воздуха. Из этой формулы видно, что при критическом градиенте массовой доли водяного пара частота Брента–Вайсяля равна нулю, а значит, период колебаний стремится к бесконечности. Из формулы (15) следует, что уровень максимальных скоростей совпадает с уровнем выравнивания плотностей: $z_{w\max} = z_p$.

Подставляя выражение для величины z_p в формулу (13), для максимальной скорости восходящих потоков влажного ненасыщенного воздуха получим равенство

$$w_{\max} = \tilde{N}_{BV} z_p \sin kx = \sqrt{\frac{g}{\alpha\Delta\gamma - \beta b}} (\alpha\Delta_0 T + \beta\Delta_0 s) \sin kx. \quad (17)$$

Запишем выражение для квадрата скорости восходящих потоков влажного ненасыщенного воздуха:

$$w^2 = \left[g(\alpha\Delta\gamma - \beta b) z (2z_p - z) \right] \sin^2 kx. \quad (18)$$

Отсюда следует, что, если $z_p = 0$, т.е. плотности воздуха возмущенной и невозмущенной атмосферы у поверхности земли совпадают, то условием развития конвекции во влажной атмосфере является условие $b > b_{cr}$. В частности, для сухой атмосферы отсюда следует известное условие развития конвекции: $\gamma > \gamma_a$. Если же атмосфера влажная, то конвекция развивается даже при условии $\gamma < \gamma_a$.

Тогда для квадрата скорости восходящих потоков получим выражение

$$w = \sqrt{\beta g(b - b_{cr})} z \cdot \sin kx, \quad (19)$$

т.е. скорость восходящих потоков будет расти с высотой по линейному закону и уровень конвекции не будет достигнут, даже если $\gamma < \gamma_a$. Ясно, что полученный результат является идеализацией. В реальной атмосфере инверсионные слои и вязкость воздуха (напомним, что в нашей модели рассматривается уравнение движение идеальной жидкости) не дадут реализоваться указанному сценарию.

Выражение для амплитуды максимальной скорости восходящего потока во влажной атмосфере имеет вид

$$w_0 = \sqrt{\frac{g}{\alpha\Delta\gamma - \beta b}} (\alpha\Delta_0 T + \beta\Delta_0 s). \quad (20)$$

Таким образом, из полученного выражения (20) для амплитуды скорости восходящего потока видно, что вертикальная скорость зависит от неустойчивости атмосферы, градиента массовой доли водяного пара в окружающей атмосфере и перегрева у поверхности земли. Из формулы (20) также видно, что при критическом значении массовой доли водяного пара максимальная скорость стремится к бесконечности («взрывной рост»).

Значения параметров конвекции на уровне конденсации

Определим уровень конденсации z_c по формуле [21]:

$$z_c = \frac{T_0 - \tau_0}{\gamma_a - \gamma_\tau} = \frac{d_0}{\Delta\gamma_\tau}, \quad (21)$$

где τ_0 – температура точки росы у поверхности земли;
 d_0 – дефицит точки росы вблизи поверхности земли ($z = 0$);
 γ_τ – градиент температуры точкисосы.

Как известно, формула (21) дает заниженные значения уровня конденсации, так как при ее выводе не учитывается вовлечение поднимающегося воздуха с окружающей средой. Для дальнейшего анализа имеет значение только лишь зависимость уровня конденсации от дефицита точки росы вблизи поверхности земли.

На уровне конденсации z_c выражение для скорости восходящих потоков будет иметь вид:

$$w_c^2 = 2g(\alpha\Delta_0T + \beta\Delta_0s) \frac{d_0}{\Delta\gamma_\tau} \left(1 - \frac{d_0}{2(\alpha\Delta_0T + \beta\Delta_0s)} \frac{\alpha\Delta\gamma - \beta b}{\Delta\gamma_\tau} \right) \sin^2 kx. \quad (22)$$

Подставляя выражение (21) в формулу (2), получим формулу для функции перегрева на уровне конденсации

$$\Delta_c T = \Delta_0 T - d_0 \frac{\Delta\gamma}{\Delta\gamma_\tau}. \quad (23)$$

Для функции пересыщения на уровне конденсации получим выражение

$$\Delta_c s = \Delta_0 s + b \frac{d_0}{\Delta\gamma_\tau}. \quad (24)$$

Из выражений (22) и (23) видно, что существуют критические значения дефицита точки росы вблизи поверхности земли, при которых соответственно равны нулю функция перегрева на уровне конденсации $\Delta_c T$ и скорость восходящих потоков воздуха w_c (на уровне конденсации):

$$\Delta_c T = 0: (d_0)_{cr1} = \Delta_0 T \frac{\Delta\gamma_\tau}{\Delta\gamma}, \quad (25)$$

$$w_c = 0: (d_0)_{cr2} = 2(\alpha\Delta_0T + \beta\Delta_0s) \frac{\Delta\gamma_\tau}{\alpha\Delta\gamma - \beta b}. \quad (26)$$

Из формулы (26) следует, что влажность подоблачного слоя будет способствовать развитию облачной конвекции. Более того, из этой формулы следует, что при значении градиента массовой доли водяного пара, равного критическому значению $b_{cr} = \frac{\alpha \Delta \gamma}{\beta}$, критическое значение дефицита точки росы вблизи поверхности земли $(d_0)_{cr}$ стремится к бесконечности, а это значит, что подоблачная конвекция будет всегда «пробивать» уровень конденсации, т. е. $w_c > 0$.

Полученные критерии определяют начальные условия облачной конвекции.

1. Если дефицит точки росы вблизи поверхности земли равен второму критическому значению $d_0 = (d_0)_{cr2}$, то на уровне конденсации перегрев будет отрицательным:

$$\Delta_c T = - \frac{(\alpha \Delta \gamma + \beta b) \Delta_0 T + 2 \beta \Delta \gamma \Delta_0 s}{\alpha \Delta \gamma - \beta b} = - (\Delta_c T)_{\max} < 0, \quad (27)$$

а скорость восходящего потока на этом же уровне будет равна нулю ($w_c = 0$). Следовательно, в этом случае подоблачный слой не будет способствовать развитию облачной конвекции. То есть атмосфера при таком дефиците точки росы вблизи поверхности земли недостаточно влажная, и подоблачный слой не будет пробиваться восходящим воздухом (рис. 1, график 1).

Формально принимая $\beta = 0$, получим, что для «сухой подоблачной атмосферы» функция перегрева на уровне конденсации будет равна $\Delta_c T = -\Delta_0 T < 0$. Данный результат известен из адиабатической модели конвекции сухого воздуха [21].

2. Если дефицит точки росы вблизи поверхности земли $(d_0)_{cr1} < d_0 < (d_0)_{cr2}$, то перегрев на уровне конденсации будет отрицательным, но по модулю меньше максимального значения $-(\Delta_c T)_{\max} < \Delta_c T < 0$, а скорость восходящего потока на этом же уровне положительна. В этом случае уровень конденсации будет пробиваться восходящей подоблачной струей, что способствует развитию облачной конвекции (рис. 1, график 2).
3. Если дефицит точки росы вблизи поверхности земли равен первому критическому значению $d_0 < (d_0)_{cr1}$, то на уровне конденсации перегрев равен нулю $\Delta_c T = 0$, а скорость восходящего потока будет равна $w_c(z_i)$ (меньше максимального значения), т. е. равна значению на уровне z_i выравнивания температур:

$$w_c^2 = g(\alpha \Delta \gamma - \beta b) z_t (2z_p - z_t) \sin^2 kx \quad (28)$$

$$\text{или} \quad w_c^2 = g \frac{\Delta_0 T}{\Delta \gamma} \left[\alpha \Delta_0 T + \beta \left(2 \Delta_0 s + b \frac{\Delta_0 T}{\Delta \gamma} \right) \right] \sin^2 kx. \quad (29)$$

Заметим, что в этом случае уровень конденсации совпадает с уровнем выравнивания температур: $z_c = z_t$. Аналогично, функция пересыщения примет значение, равное значению на этом же уровне z_t :

$$\Delta_c s = \Delta_0 s + b \frac{\Delta_0 T}{\Delta \gamma} = \Delta_0 s + b z_t. \quad (30)$$

Следовательно, в этом случае будут существовать условия для развития облачной конвекции (рис. 1, график 3).

4. Если дефицит точки росы вблизи поверхности земли меньше первого критического значения дефицита $d_0 < (d_0)_{cr1}$, то перегрев на уровне конденсации положителен $\Delta_0 T > 0$, а скорость восходящего потока будет положительной, но меньше максимального значения, что также может способствовать развитию облачной конвекции (рис. 1, график 4).

$$d_0 = (d_0)_{cr2}, \quad \Delta_c T = -(\Delta_0 T)_{\max}, \quad d_0 < (d_0)_{cr2}, \quad -(\Delta_0 T)_{\max} < \Delta_c T < 0, \\ w_{\max} = 0 \quad w_c > 0, \quad \partial w / \partial z < 0$$

Из выражения (22) видно, что, если градиент массовой доли водяного пара в окружающей атмосфере принимает критическое значение b_{cr} , то скорость восходящих потоков на уровне конденсации при любом значении дефицита точки росы вблизи поверхности земли положительна и равна:

$$w_c^2 = 2g(\alpha \Delta_0 T + \beta \Delta_0 s) \frac{d_0}{\Delta \gamma_\tau}. \quad (31)$$

Итак, учет влажности подоблачного слоя приводит не только к количественным изменениям критериев, определяющих параметры облачной конвекции на уровне конденсации, но и качественным изменениям. Мы видим, что существенное влияние на параметры облачной конвекции на уровне конденсации имеет не столько значение абсолютной влажности подоблачного слоя, сколько градиент массовой водяного пара в подоблачном слое.

Таким образом, полученное в работе аналитическое выражение для двумерной модели конвекции позволило провести анализ влияния характеристик приземного слоя атмосферы на развитие облачной конвекции.

Результаты исследования и их обсуждение

В работе [43] получено аналитическое решение двумерной модели конвекции влажного насыщенного воздуха. Приведем основные положения и допущения, на которых было основано аналитическое решение задачи в работе [43].

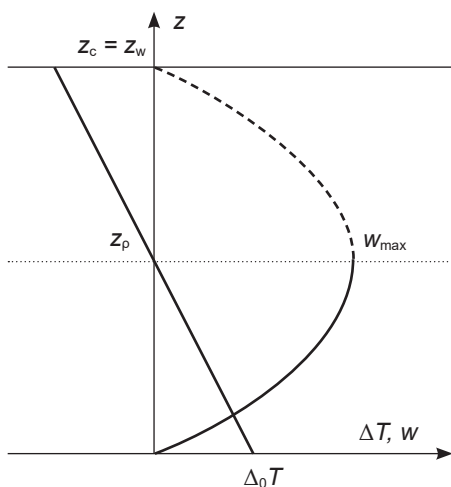


График 1

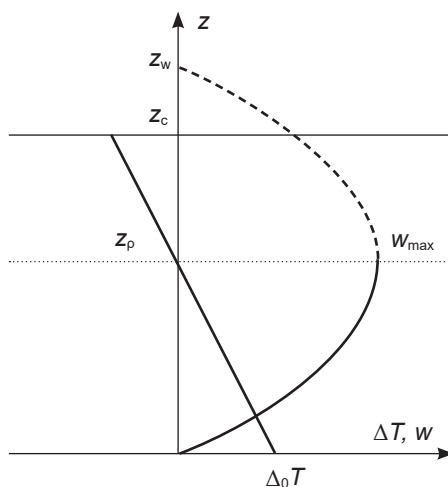


График 2

$$d_0 < (d_0)_{cr1}, \Delta_c T = 0, dw/dz = 0,$$

$$d_0 < (d_0)_{cr1}, \Delta_c T > 0, dw/dz > 0,$$

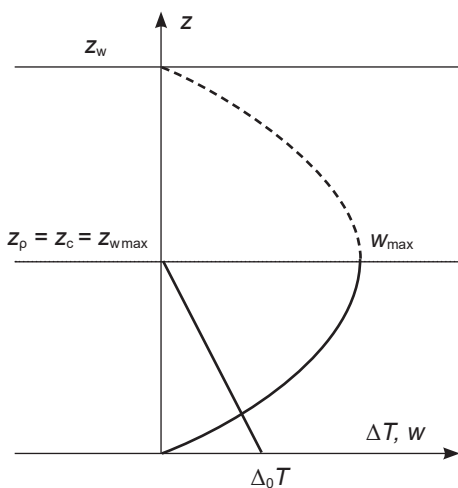


График 3

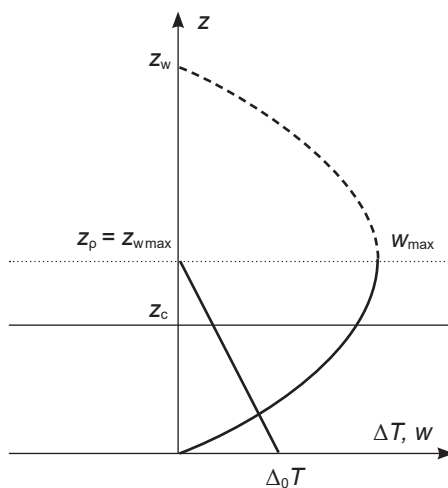


График 4

Рис. 1.

Распределение скорости восходящих потоков и функции перегрева с высотой в зависимости от различных значений дефицита точки росы вблизи поверхности земли.

Fig. 1. The distribution of the ascending flow velocity and the overheating function with height depending on various values of the dew point deficit near the earth's surface.

Градиент температуры влажного насыщенного воздуха представлен нами в виде [43]:

$$\gamma_{\text{ma}} = -\frac{dT_i}{dz} = \gamma_a + \frac{L}{c_p} \frac{ds_m}{dz} = \gamma_{\text{mac}} + \varepsilon(z - z_c), \quad (32)$$

где $\gamma_{\text{mac}} = \gamma_a + \frac{L}{c_p} \frac{ds_m}{dz} \Big|_{z=z_c}$

– влажноадиабатический градиент температуры на уровне конденсации – известная функция температуры и давления $\left(\frac{ds_m}{dz} < 0\right)$ [21];

L – удельная теплота конденсации;

c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении; s_m – массовая доля насыщенного водяного пара;

$\varepsilon = \frac{L}{c_p} |K| \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{C/m}^2$ – константа;

$K = \frac{d^2 s_m}{dz^2} \Big|_{z=z_c}$ – некоторая функция от величины s_{mc} – массовой доли водяного пара на уровне конденсации, также принимается постоянной.

Функция перегрева запишется в виде:

$$\Delta T(z) = \Delta_c T + \Delta \gamma_{\text{mac}}(z - z_c) - \frac{\varepsilon}{2}(z - z_c)^2, \quad (33)$$

где $\Delta_c T$ – значение функции перегрева на уровне конденсации;

$\Delta \gamma_{\text{mac}} = \gamma - \gamma_{\text{mac}}$ – разность градиентов температуры воздуха невозмущенной атмосферы и поднимающейся частицы на уровне конденсации. На аэрологической диаграмме $\Delta \gamma_{\text{mac}}$ определяет угол между кривой состояния и кривой стратификации на уровне конденсации.

Для функции пересыщения получено выражение:

$$\Delta s(z) = \Delta_c s + \left(b + \frac{ds_m}{dz} \Big|_{z=z_c} \right) (z - z_c) + \frac{K}{2}(z - z_c)^2, \quad (34)$$

где $\Delta_c s = s_{\text{mc}} - s_{\text{ec}}$ – пересыщение на уровне конденсации

Формула для плотности воздушной частицы запишется в виде

$$\rho_i = \rho_e \left[1 - \alpha_0 - \alpha_1(z - z_c) + \alpha_2(z - z_c)^2 \right], \quad (35)$$

где $\alpha_0 = \alpha \Delta_c T + \beta \Delta_c s$,

$$\alpha_1 = \alpha \Delta \gamma_{\text{mac}} + \beta \left(b + \frac{ds_m}{dz} \Big|_{z=z_c} \right), \quad \alpha_2 = \frac{1}{2} (\alpha \varepsilon - \beta K).$$

Уровень выравнивания плотностей воздуха в облачной воздушной частице и окружающей атмосфере

$$z_p - z_c = \frac{\alpha_1 + \sqrt{\alpha_1^2 + 2(\alpha \varepsilon - \beta K)(\alpha \Delta_c T + \beta \Delta_c s)}}{\alpha \varepsilon - \beta K}. \quad (36)$$

Уровень выравнивания температур определяется выражением:

$$z_t - z_c = \frac{\Delta \gamma_{\text{mac}} + \sqrt{(\Delta \gamma_{\text{mac}})^2 + 2\varepsilon \Delta_c T}}{\varepsilon}. \quad (37)$$

Тепловая конвекция влажного насыщенного воздуха описывается системой уравнений

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p'}{\partial x}, \quad (38)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = g(\alpha \Delta T + \beta \Delta s), \quad (39)$$

$$\Delta T(z) = \Delta_c T + \Delta \gamma_{\text{mac}}(z - z_c) - \frac{\varepsilon}{2}(z - z_c)^2, \quad (40)$$

$$\Delta s(z) = \Delta_c s + \left(b + \frac{ds_m}{dz} \Big|_{z=z_c} \right) (z - z_c) + \frac{K}{2}(z - z_c)^2, \quad (41)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (42)$$

Решая эту систему, для функции тока получим выражение

$$\psi = \frac{\tilde{N}_{\text{mac}}}{k} \sqrt{2(z - z_c) \left[\tilde{z}_1 + \frac{(z - z_c)}{2} - \frac{k_1}{3}(z - z_c)^2 \right]} \cos kx, \quad (43)$$

$$\text{где} \quad \tilde{N}_{\text{mac}} = \sqrt{g \left[\alpha \Delta \gamma_{\text{mac}} + \beta \left(b + \frac{ds_m}{dz} \Big|_{z=z_c} \right) \right]} \quad (44)$$

– частота Брента – Вайсяля для влажного насыщенного воздуха;

$$k_1 = \frac{\alpha \varepsilon - \beta K}{2 \left[\alpha \Delta \gamma_{\text{mac}} + \beta \left(b + \frac{ds_m}{dz} \Big|_{z=z_c} \right) \right]},$$

$$\tilde{z}_1 = \frac{\alpha \Delta_c T + \beta \Delta_c s}{\alpha \Delta \gamma_{\text{mac}} + \beta \left(b + \frac{ds_m}{dz} \Big|_{z=z_c} \right)}. \quad (45)$$

Для вертикальной скорости получим выражения:

$$w = \sqrt{w_c^2 + 2 \tilde{N}_{\text{mac}}^2 (z - z_c) \left[\tilde{z}_1 + \frac{(z - z_c)}{2} - \frac{k_1}{3} (z - z_c)^2 \right] \cdot \sin^2 kx}. \quad (46)$$

Толщина конвективной ячейки («облака») находится из условия $w = 0$ и для случая, когда скорость на уровне конденсации равна нулю ($w_c = 0$), равна

$$z_w - z_c = \frac{3}{4k_1} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{16}{3} k_1 \tilde{z}_1} \right). \quad (47)$$

Так как согласно формуле (32) $\frac{ds_m}{dz} < 0$, то из формул (47) видно, что и в случае облачной конвекции существует критическое значение градиента массовой доли водяного пара окружающей среды, которое способствует развитию облачной конвекции:

$$b_{\text{cr}} = \left(-\frac{ds_m}{dz} \Big|_{z=z_c} \right) - \frac{\alpha}{\beta} \Delta \gamma_{\text{mac}}. \quad (48)$$

Более того, из выражений (45) и (47) видно, что когда $\Delta \gamma_{\text{mac}} < 0$, т. е. атмосфера влажно устойчива и согласно традиционным представлениям конвекция не возможна, то при значениях градиента массовой доли водяного пара, больших критического значения, и в этом случае конвекция возможна.

На рисунке 2 функция тока для подоблачной конвекции рассчитывалась по формуле (11), а для облачной конвекции по формуле (43).

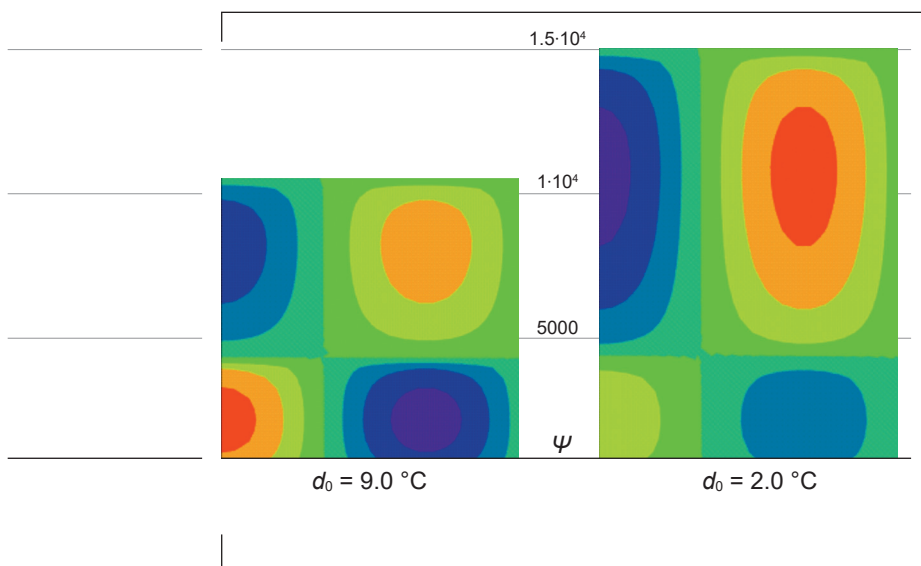


Рис. 2.

Взаимодействие подоблачной и облачной конвекции.
На рисунке по осям x и z отложены метры.

Fig. 2. Interaction of under-cloud and cloud convection.
 In the figure along the axes x and z laid off meters.

Из рисунка видно, что увеличение влажности в приземном слое приводит к развитию облачной конвекции.

Таким образом, из полученных выражений для параметров облачной конвекции видно, что она зависит от значений функции перегрева $\Delta_c T$ и скорости восходящих потоков w_c на уровне конденсации, которые сами зависят от характеристик приземного слоя атмосферы.

Выводы

На основании полученных в работах [42, 43] аналитических решений уравнений конвекции сухого и влажного насыщенного воздуха, а также аналитического решения конвекции влажного ненасыщенного воздуха, показано влияние на развитие облачной конвекции параметров приземного слоя атмосферы. Получены аналитические выражения для дефицитов точки росы в приземном слое, определяющие значения функции перегрева и скорости восходящих потоков на уровне конденсации. Показано, что на развитие подоблачной конвекции существенное влияние оказывает значение массовой доли водяного пара. Установлено, что при значениях градиента массовой доли водяного пара, приближающихся к критическому значению, наблюдается «взрывной» рост конвективных ячеек в подоблачном слое. Также показана

но, что существует критическое значение градиента массовой доли водяного, способствующее развитию облачной конвекции.

Таким образом, основной результат, следуемый из предложенной теоретической модели, о влиянии влажности приземного слоя атмосферы на развитие конвекции, находится в согласии с многочисленными экспериментальными и теоретическими исследованиями, обзор которых был проведен во введении. Отличительной особенностью нашей модели является то, что, во-первых, мы говорим не просто об абсолютном значении влажности приземного слоя, а о критическом значении градиента массовой доли водяного пара. Кроме того, для анализа мы находили решение двумерной нелинейной модели конвекции. В качестве недостатка нашей модели отметим ее стационарность и отсутствие вязкости.

Библиографический список

1. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Изд-во МГУ. 6-е издание. 1999. 799 с.
2. Alekseev V.V., Gusev A.M. Free convection in geophysical processes. *Sov. Phys. Uspekhi* 1983, 26, 906–922.
3. Arakawa A. The cumulus parameterization problem: Past, present, and future, *J. Climate*, 17, 2493–2525, 2004.
4. Bellon G., and Stevens B., 2005: On bulk models of shallow cumulusconvection. *J. Atmos. Sci.*, 62, 3286–3302.
5. Bennett L.J., Browning K.A., Blyth A.M., Parker D.J., and Clark P.A., 2006: A review of the initiation of precipitating convection in the United Kingdom. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 132, 1001–1020.
6. Betts A.K., Ball J.H., Beljaars A. C.M., Miller M.J., and Viterbo P.A.: The land surface-atmosphere interaction: A review based on observational and global modeling perspectives, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 101, 7209–7225, 1996.
7. Bluestein H.B. *Severe Convective Storms and Tornadoes*. – Chichester, UK: Springer, 2013. 481 p.
8. Bony S., and Dufresne J.L., 2005: Marine boundary layer clouds at the heart of tropical cloud feedback uncertainties in climate models. *Geophys. Res. Let.*, 32, L20806.
9. Bretherton C.S., and Park S., 2008: A new bulk shallow-cumulusmodel and implications for penetrative entrainment feedback on updraft buoyancy. *J. Atmos. Sci.*, 65, 2174–2193.
10. Brooks H.E., Doswell C.A., and Wicker L.J., 1993: STORM-TIPE: A forecasting experiment using a three-dimensional cloud model. *Wea. Forecasting*, 8, 352–362.
11. Browning K., Blyth A., Clark P., Corsmeier U., Morcrette C, Agner J., Bamber D., Barthlott C., Bennett L., Beswick K., Bitter M., Bozier K., Brooks B., Collier C, Cook C., Davies F., Deny B., Engelhardt M., Feuerle T., Forbes R., Gaffard C., Gray M., Hanken R., Hewison T., Huckle R., Kalthoff N., Khodayar S., Kholer M., Kraut S., Kunz

- M., Ladd D., Lenfant J., Marsham J., McGregor J., Nicol J., Norton E., Parker D., Perry F., Ramatschi M., Roberts H., Russel A., Schulz H., Slack E., Vauhan G., Waight J., Watson R., Webb A., Wieser A., and Zinz K., 2007: The Convective Storm Initiation Project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1–17.
12. Crook N. A. Sensitivity of Moist Convection Forced by Boundary Layer Processes to Low-Level Thermodynamic Fields. *Monthly Weather Review*. Volume 124, 1996, p. 1767–1785.
 13. Deardorff J.W., 1979: Prediction of convective mixed-layer entrainment for realistic capping inversion structure. *J. Atmos. Sci.*, 36, 424–436.

References

1. Tikhonov A.N., Samara A.A. *Equations of mathematical physics*. M.: MGU Publishing House. 6th edition. 1999. 799 p.
2. Alekseev V.V., Gusev A.M. Free convection in geophysical processes. *Sov. Phys. Uspekhi* 1983, 26, 906–922.
3. Arakawa A. The cumulus parameterization problem: Past, present, and future, *J. Climate*, 17, 2493–2525, 2004.
4. Bellon G., and Stevens B., 2005: On bulk models of shallow cumulus convection. *J. Atmos. Sci.*, 62, 3286–3302.
5. Bennett L.J., Browning K.A., Blyth A. M., Parker D.J., and Clark P.A., 2006: A review of the initiation of precipitating convection in the United Kingdom. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 132, 1001–1020.
6. Betts A.K., Ball J.H., Beljaars A.C.M., Miller M.J., and Viterbo P.A.: The land surface-atmosphere interaction: A review based on observational and global modeling perspectives, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 101, 7209–7225, 1996.
7. Bluestein H.B. *Severe Convective Storms and Tornadoes*. Chichester, UK: Springer, 2013. 481 p.
8. Bony S., and Dufresne J.L., 2005: Marine boundary layer clouds at the heart of tropical cloud feedback uncertainties in climate models. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L20806.
9. Bretherton C.S., and Park S., 2008: A new bulk shallow-cumulus-model and implications for penetrative entrainment feedback on updraft buoyancy. *J. Atmos. Sci.*, 65, 2174–2193.
10. Brooks H.E., Doswell C.A., and Wicker L.J., 1993: STORM-TIPE: A forecasting experiment using a three-dimensional cloud model. *Wea. Forecasting*, 8, 352–362.
11. Browning K., Blyth A., Clark P., Corsmeier U., Morcrette C., Agner J., Bamber D., Barthlott C., Bennett L., Beswick K., Bitter M., Bozier K., Brooks B., Collier C., Cook C., Davies F., Deny B., Engelhardt M., Feuerle T., Forbes R., Gaffard C., Gray M., Hanken R., Hewison T., Huckle R., Kalthoff N., Khodayar S., Kholer M., Kraut S., Kunz M., Ladd D., Lenfant J., Marsham J., McGregor J., Nicol J., Norton E., Parker D., Perry F., Ramatschi M., Roberts H., Russel A., Schulz H., Slack E., Vauhan G., Waight J., Watson R., Webb A., Wieser A., and Zinz K., 2007: The Convective Storm Initiation Project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1–17.

12. Crook N. A. Sensitivity of Moist Convection Forced by Boundary Layer Processes to Low-Level Thermodynamic Fields. Monthly Weather Review. Volume 124, 1996, p. 1767–1785.
13. Deardorff J.W., 1979: Prediction of convective mixed-layer entrainment for realistic capping inversion structure. J. Atmos. Sci., 36, 424–436.

Об авторах

- Данилова** **Нина Евгеньевна**, аспиранта кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета. Тел. 8-918-769-22-07 E-mail: ninochka841@mail.ru
- Семенова** **Юлия Александровна**, аспиранта кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета. Тел. 8-918-753-65-56 E-mail: brilliance_wave@mail.ru
- Смерек** **Юлия Леонтьевна**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета. Тел. 8(918)758-71-29 E-mail: smerek@mail.ru, Scopus ID: 6503952686 ResearcherID is: Q-5159-2018
- 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

About the authors

- Danilova** **Nina E.**, Postgraduate Student, Department of General and Theoretical Physics, North-Caucasian Federal University, E-mail: ninochka841@mail.ru
- Semenova** **Yulia Alexandrovna**, Postgraduate Student, Department of General and Theoretical Physics, North-Caucasian Federal University, E-mail: brilliance_wave@mail.ru
- Smerek** **Yulia Leontevna**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Chair of General and Theoretical Physics, North Caucasus Federal University Phone 8 (918) 758-71-29, E-mail: smerek@mail.ru. Scopus ID: 6503952686 ResearcherID is: Q-5159-2018
- Zakinyan** **Robert Gurgеноvich**, 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 Scopus ID: 7801621547

25.00.29

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

ДИДЕНКО А.Ю.,
СИМАХИНА М.А.,
ВОЛКОВА В.И.,
ЗАКИНЯН А.Р.

УДК 551.513.22
Северо-Кавказский федеральный университет,
г. Ставрополь, Россия

zakinyan@mail.ru

К ПРОБЛЕМЕ ИСКУССТВЕННОГО СТИМУЛИРОВАНИЯ КОНВЕКЦИИ В АТМОСФЕРЕ

Введение:

вынужденный подъем значительных масс воздуха осуществить искусственно трудно или осуществление такого подъема будет, по крайней мере, экономически нерентабельно, так как потребует затраты большого количества энергии. Воздействия на метеорологические процессы имеют смысл, т.е. практически могут быть осуществлены только на неустойчивые состояния облаков или атмосферы, потенциальная энергия которых может реализоваться в нужном направлении за счет существенно меньших энергетических затрат. Иными словами, искусственно создать в атмосфере восходящие движения протяженностью, достаточной для развития или интенсификации процессов облако- и осадкообразования, в настоящее время можно только используя потенциальную энергию конвективной неустойчивости атмосферы. Эта энергия может реализоваться в виде восходящих движений (конвективных потоков) в результате нагрева у поверхности земли сравнительно небольших объемов воздуха.

Материалы и методы:

Для прогноза параметров облачной конвекции используются данные радиозондирования, которые наносятся на аэрологическую диаграмму. Как правило, при этом делается допущение, что скорость восходящих потоков и перегрев на уровне конденсации равны нулю. Но это не всегда так. Поэтому представляется важным определить, как параметры приземного слоя влияют на значения параметров облачной конвекции на уровне конденсации.

Результаты
исследования:

В работе рассматривается проблема искусственного стимулирования конвекции с целью развития облачной конвекции. Дан обзор современного состояния данной проблемы. Приводятся факты, когда искусственно созданная конвекция вызывала облако, сопровождающее дождем. Эти факты стимулировали научные эксперименты с целью разработки научных основ воздействия на облака и атмосферу с целью искусственного увеличения осадков. Несмотря на многочисленные эксперименты, мы не можем в настоящее время утверждать о положительном результате воздействий. Более того мы не можем на идейном уровне утверждать, что у нас есть научные принципы искусственного стимулирования конвекции с целью образования кучево-дождевой облачности. Поэтому в настоящей работе приводится оценка возможности влияния искусственно созданной приземной конвекции на развитие облачной конвекции.

Обсуждение и
заключение:

учет влажности подоблачного слоя приводит не только к количественным изменениям критериев, определяющих параметры облачной конвекции на уровне конденсации, но и качественным изменениям. Мы видим, что существенное влияние на параметры облачной конвекции на уровне конденсации имеет не столько значение абсолютной влажности подоблачного слоя, сколько градиент массовой водяного пара в подоблачном слое. Если приземный слой атмосферы от уровня земли до уровня конденсации имеет градиент температуры, равный $\gamma = \gamma_c$, то все попытки искусственного стимулирования за счет нагрева безуспешны. Если же толщина задерживающих слоев меньше указанного слоя, то они могут быть пробиваемы.

Ключевые слова:

искусственное стимулирование конвекции, искусственное увеличение осадков, критический размер термика, характеристики поверхностного слоя атмосферы, уровень конденсации, облачная конвекция.

Didenko A.Yu.,
Simakhina M.A.,
Volkova V.I.,
Zakinyan A.R

North Caucasus Federal University,
Stavropol, Russia

To a problem of artificial stimulation of convection in atmosphere

- Introduction:** forced lifting of large air masses is artificially difficult or such lifting will be, at least, economically unprofitable, as it will require the expenditure of large amounts of energy. Impacts on meteorological processes make sense, i.e. can practically be realized only on unstable states of clouds or the atmosphere, the potential energy of which can be realized in the right direction due to much lower energy costs. In other words, it is possible to artificially create upward movements in the atmosphere with a length sufficient to develop or intensify the processes of cloud and sedimentation, currently only using the potential energy of the convective instability of the atmosphere. This energy can be realized in the form of ascending movements (convective flows) as a result of heating relatively small volumes of air near the surface of the earth.
- Materials and Methods:** To predict the parameters of cloud convection, radiosonde data is used, which are plotted on the upper-air diagram. As a rule, it is assumed that the rate of ascending flows and overheating at the level of condensation are zero. But it's not always the case. Therefore, it is important to determine how the parameters of the surface layer affect the values of the parameters of cloud convection at the level of condensation.
- Results of the research:** The paper deals with the problem of artificially stimulating convection in order to develop cloud convection. An overview of the current state of this problem is given. The facts are cited when artificially created convection caused a cloud accompanying the rain. These facts stimulated scientific experiments in order to develop the scientific basis for influencing clouds and the atmosphere in order to artificially increase precipitation. Despite numerous experiments, we cannot at present claim a positive result of the effects. Moreover, at the ideological level, we cannot assert that we have the scientific principles of artificially stimulating convection in order to form cumulonimbus clouds. Therefore, this paper presents an assessment of the possible influence of artificially created surface convection on the development of cloud convection.
- Discussion and conclusion:** taking into account the humidity of the sub-cloud layer leads not only to quantitative changes in the criteria that determine the parameters of cloud convection at the level of condensation, but also to qualitative changes. We see that a significant effect on cloud convection parameters at the level of condensation is not so much the value of the absolute humidity of the sub-cloud layer, as the mass water vapor gradient in the sub-cloud layer.
If the surface layer of the atmosphere from the ground level to the level of condensation has a temperature gradient equal to, then all attempts at artificial stimulation due to heating are unsuccessful. If the thickness of the retaining layers is less than the specified layer, then they can be punched.
- Keywords:** Artificial stimulation of convection, artificial augmentation of deposits, the critical dimension термика, characteristics of surface layer of atmosphere, condensation level, cloudy convection.

Введение

Первые сведения, относящиеся к искусственному стимулированию атмосферной конвекции, относятся к далекой древности. Отметим некоторые примеры, которые приводятся в известном учебнике Л.Г. Качурина [3].

В описании осады крепости, имевшей место в 429 г. до н. э., можно прочесть о том, как «осаждающие, навалив у крепостных стен связки хворосту, подожгли их горячей смесью серы и смолы. Поднялось пламя, такое вы-

сокое, какого еще никогда не видели, по крайней мере, из зажженных человеком. Немного нужно было, чтобы защитники города, которые избежали других опасностей, погибли от огня. Если бы ветер раздул пожар, как надеялись осаждающие, никто не остался бы в живых. Но начался сильный дождь, сопровождаемый громом, который погасил огонь и уничтожил опасность».

Здесь следует обратить внимание, что начавшийся дождь был не случайным совпадением, а вызван искусственно созданным облаком.

Более того, ряд народов Центральной Америки и Экваториальной Африки, обнаружив, что пожары в прериях и саваннах часто приводят к образованию облаков, дающих дождь, стали во время засух поджигать траву или кустарники, чтобы вызвать осадки [1, 2].

Во время второй мировой войны, 27 июля 1943 г., около полуночи американские самолеты сбросили на Гамбург несколько тысяч тонн фугасных и зажигательных бомб. Город вспыхнул. Пожар по своей теплотворной способности был эквивалентен горению примерно миллиона тонн горючего. Налет был совершен в сухую устойчивую погоду, не предвещавшую развития конвекции, тем более ночью. Однако нагретый воздух образовал над городом гигантский восходящий вихревой столб со скоростями в несколько десятков метров в секунду. О силе вихря можно судить по тому, с какой легкостью ураган выкорчевывал и высоко подбрасывал деревья. В несколько минут образовалось громадное кучево-дождевое облако, и начался ливневый дождь, который, однако, не смог погасить пожар, а лишь способствовал дезорганизации обороны.

Здесь мы опять замечаем, что искусственно созданное облако вызвало дождь.

Атомная бомба, взорванная над Хиросимой 6 августа 1945 г., зажгла гигантский костер и вызвала бурю, завершившую уничтожение города. В марте 1965 г. над подожженными напалмом вьетнамскими джунглями образовалось гигантское облако, которое разразилось ливнем, быстро погасившем начавшийся было пожар.

Более скромны по масштабам и результативности опыты по преднамеренному стимулированию конвекции в атмосфере в мирных целях.

Начиная с 50-х годов прошлого века в ряде стран (Франция, СССР) разрабатываются метеотроны, представляющие собой систему камер сгорания с регулируемым режимом работы. Такие метеотроны предназначаются для вызывания (или интенсификации) осадков [1–3, 5].

При благоприятных метеоусловиях над метеотроном возникает искусственное кучевое облако, имеющее все основные признаки кучево-дождевого.

Вместо того чтобы сжигать топливо, можно создавать перегрев воздуха у поверхности земли на отдельных участках путем изменения теплового баланса поверхности земли. С этой целью надо по возможности увеличить пог-

лощательную способность поверхности, особенно в области коротковолновой радиации, уменьшить излучательную способность в области собственного излучения Земли и уменьшить тепловой поток в почву.

Отметим, что отсутствие убедительных оценок результативности опытов по искусственному увеличению осадков путем засева их кристаллизующим реагентом (йодистым серебром) подтолкнуло ряд ученых к поискам других методов воздействия на облака с целью получения дополнительных осадков. Таким методом является, в частности, так называемый метод динамического воздействия на облака, основанный на искусственном создании в атмосфере восходящих движений и использованием конвективной неустойчивости атмосферы и облаков [1].

Известно, что практически все естественно происходящие осадкообразующие процессы связаны с восходящими движениями в атмосфере, в процессе которых поднимающийся воздух охлаждается и на некоторой высоте его температура достигает точки росы. При этом создаются условия для конденсации водяного пара в капельки воды или сублимации в ледяные кристаллы при наличии ядер конденсации или замерзания.

В природе восходящие движения, обуславливающие развитие облаков до стадии выпадения осадков, возникают в зонах фронтальных разделов (вынужденный подъем воздуха) или в результате нагрева солнцем земной поверхности, что приводит к образованию над ней неустойчивого слоя, в котором происходит всплывание отдельных масс воздуха (свободная конвекция) до уровня конденсации. В горных районах также может иметь место вынужденный подъем воздуха, обусловленный орографией местности.

Очевидно, что вынужденный подъем значительных масс воздуха осуществить искусственно трудно или осуществление такого подъема будет, по крайней мере, экономически нерентабельно, так как потребует затраты большого количества энергии. Воздействия на метеорологические процессы имеют смысл, т.е. практически могут быть осуществлены только на неустойчивых состояниях облаков или атмосферы, потенциальная энергия которых может реализоваться в нужном направлении за счет существенно меньших энергетических затрат. Иными словами, искусственно создать в атмосфере восходящие движения протяженностью, достаточной для развития или интенсификации процессов облако- и осадкообразования, в настоящее время можно только используя потенциальную энергию конвективной неустойчивости атмосферы. Эта энергия может реализоваться в виде восходящих движений (конвективных потоков) в результате нагрева у поверхности земли сравнительно небольших объемов воздуха.

Целью настоящей статьи является провести оценку возможности искусственного стимулирования конвекции, на основе разработанной двумерной модели конвекции влажного воздуха в слое от поверхности земли до уровня конденсации.

Материалы и методы исследования

Критический размер термика определяется по формуле:

$$r_{\text{cr}} = \frac{d}{\sqrt[3]{\text{Ra}_{\text{cr}}}}, \quad (1)$$

где d – толщина слоя конвекции, в нашем случае это высота до уровня конденсации;

$\text{Ra}_{\text{cr}} = 657,511$ – критическое число Рэлея.

Для толщины $d = 1$ км получаем: $r_{\text{cr}} = 115$ м. Соответственно, для толщины $d = 2$ км получаем $r_{\text{cr}} = 230$ м. Отсюда, критическая площадь термика для толщины $d = 1$ км равна:

$$S_{\text{cr}} = \pi r_{\text{cr}}^2 = 4,155 \cdot 10^4 \text{ м}^2 = 4,155 \cdot 10^{-2} \text{ км}^2$$

Для толщины $d = 2$ км получаем $S_{\text{cr}} = \pi r_{\text{cr}}^2 = 1,662 \cdot 10^5 \text{ м}^2$.

Но здесь важно не столько площадь, сколько объем термика. Поэтому критический объем термика для толщины $d = 1$ км равен: $v_{\text{cr}} = 4/3 \pi r_{\text{cr}}^3 = 6,371 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, для толщины $d = 2$ км $v_{\text{cr}} = 4/3 \pi r_{\text{cr}}^3 = 5,097 \cdot 10^7 \text{ м}^3$. Отсюда высота термика для толщины $d = 1$ км равна:

$$h_{\text{cr}} = \frac{V_{\text{cr}}}{S_{\text{cr}}} = \frac{\frac{4}{3} \pi r_{\text{cr}}^3}{\pi r_{\text{cr}}^2} = \frac{4}{3} r_{\text{cr}} = \frac{4}{3} \cdot 115 = 153 \text{ м}.$$

Соответственно, для толщины $d = 2$ км получаем $h_{\text{cr}} = 307$ м. Отсюда следует, что толщина нагретого слоя в 20–40 м не достаточна для развития конвекции.

В расчетах предполагалось, что термик имеет форму сферы. Если допустить, что форма термика не повлияет на значения критических параметров и представить их в виде прямоугольных призм, то для толщины нагретого слоя 20 м площадь термика должна быть равна $h_{\text{cr}} = 3,0 \cdot 10^5 \text{ м}^2 = 0,3 \text{ км}^2$.

Другими словами, надо начинать с площади нагретого участка $S_{\text{cr}} = 0,3 \text{ км}^2$ и выше, если толщина нагретого слоя 20 м. Но, если толщина нагретого слоя 40 м, то площадь термика должна быть равна $S_{\text{cr}} = 1,6 \cdot 10^5 \text{ м}^2 = 0,16 \text{ км}^2$.

Выше мы считали, что для сплюснутого эллипсоида, каким является термик в нашем случае, сила сопротивления Стокса такая, как и в случае сферы. В действительности для сплюснутого эллипсоида сила сопротивления несколько отличается на поправочный коэффициент:

$$K = \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda_0^2 + 1} \cdot \left[\lambda_0 - (\lambda_0^2 - 1) \operatorname{arc} \operatorname{ctg} \lambda_0 \right]}, \quad \lambda_0 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{a}{b}\right)^2 - 1}}$$

где a – большая полуось эллипсоида, а b – малая полуось.

Расчеты показывают, что коэффициент K находится в диапазоне от 0,85 до 1. И, казалось бы, это несущественно изменит наши расчеты, сделанные выше. Но дело в том, что изменится и выражение для силы плавучести. В нашем случае $b = (10 \div 20)$,

$$F_b = \frac{4}{3} \rho_0 \pi a^2 b \cdot g \alpha \Delta T,$$

$$F_C = 6 \pi \eta a v K,$$

$$\left(\frac{\sqrt{1 + \lambda_0^2}}{\lambda_0 K} \right)_{\text{cr}} = \frac{d^3}{\operatorname{Ra}_{\text{cr}} b^3}.$$

Для толщины нагретого слоя $d = 1$ км и $b = 10$ м

$$\frac{d^3}{\operatorname{Ra}_{\text{cr}} b^3} = 1,521 \cdot 10^3,$$

$$\frac{3 \left(\lambda_0^2 + 1 \right) \left[\lambda_0 - (\lambda_0^2 - 1) \operatorname{arc} \operatorname{ctg} \lambda_0 \right]}{4 \lambda_0} = \frac{d^3}{\operatorname{Ra}_{\text{cr}} b^3}.$$

Отсюда $\gamma_0 = 0,0008$,

$$a_{\text{cr}} = b \sqrt{1 + \frac{1}{\lambda_0^2}} = 12,5 \text{ км}, \quad S_{\text{cr}} = \pi a_{\text{cr}}^2 = 4,9 \cdot 10^8 \text{ м}^2 = 490 \text{ км}^2.$$

Получаем очень завышенные критические значения для полуоси и горизонтальной площади сплюсненного эллипсоида.

Исходя из расчетов, если они, хоть как-то, отражают действительность, следует, что область нагрева должна быть симметрична и близка к сфере. Другими словами, надо увеличивать вертикальную протяженность области нагрева, как минимум, до 100 м. Тогда не надо будет увеличивать горизонтальную площадь нагрева. То есть создаем термик, размеры которого по всем направлениям равны 100 м.

Более того, думается, что, если бы мы смогли бы создать вытянутый по вертикали термик, то он скорее бы отрывался бы от поверхности земли, чем сферический.

Конвекция до уровня конденсации (подоблачная)

Уровень конвекции влажного подоблачного воздуха определяется выражением [3]:

$$z_w = \frac{2(\alpha \Delta_0 T + \beta \Delta s_0)}{\alpha \Delta \gamma - \beta b}, \quad (2)$$

где $\Delta_0 T$ – перегрев воздуха у поверхности земли;
 Δs_0 – пересыщение воздуха у поверхности земли.

Здесь s – массовая доля водяного пара;

$$\Delta \gamma = \gamma_a - \gamma,$$

где γ – градиент температуры окружающего воздуха;
 γ_a – сухадиабатический градиент температуры;
 b – градиент массовой доли водяного пара в окружающей атмосфере;
 $\alpha = \frac{1}{T_0} = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ – коэффициент теплового расширения воздуха, величина постоянная;
 $\beta \equiv \frac{M_d}{M_v} - 1 = 0,608$ – константа;
 M_d, M_v – молярные массы воздуха и водяного пара.

Как видно из формулы (2) величина перегрева у поверхности земли $\Delta_0 T$ влияет на развитие конвекции. При значении $T = 10^\circ \text{C}$ получим $\alpha \Delta_0 T = 3,7 \cdot 10^{-2}$. При значении $\Delta s_0 = \frac{10 \text{ г}}{1 \text{ кг}} = 10^{-2}$ получим $\beta \Delta s_0 = 0,6 \cdot 10^{-2}$. То есть фактор перегрева сильнее, чем фактор пересыщения, потому, что мы не можем создать сильные пересыщения. Однако, как видно из формулы (2) самым существенным фактором, влияющим на развитие конвекции, является градиент массовой доли водяного пара в окружающей атмосфере b . Из формулы видно, что, когда градиент массовой доли водяного пара достигает критического значения:

$$b_{\text{cr}} = \frac{\alpha \Delta \gamma}{\beta}, \text{ имеет место «взрывной» режим конвекции.}$$

Поэтому возникает вопрос: умеем ли мы искусственно влиять на градиент массовой доли водяного пара и делать его таким, как надо. Но можно на формулу (2) посмотреть по-другому, смотря по тому, на какой параметр мы можем влиять. Из нее следует, что при заданном градиенте массовой доли водяного пара b существует критическое значение градиента температуры или

$$(\Delta \gamma)_{\text{cr}} = \frac{\beta}{\alpha} b.$$

Для характерного значения градиента массовой доли водяного пара $b = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ получим

$$(\Delta\gamma)_{\text{cr}} = 1,7 \cdot 10^{-3} \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{м}} = 0,17 \frac{^{\circ}\text{C}}{100 \text{ м}} = 1,7 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{км}}.$$

Так как $\Delta\gamma = \gamma_a - \gamma$, то

$$\gamma_{\text{cr}} = \gamma_a - (\Delta\gamma)_{\text{cr}} = 8,3 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{км}}.$$

Формулу (2) можно приблизительно записать в виде:

$$z_w \approx \frac{2\alpha\Delta_0 T}{\alpha\Delta\gamma - \beta b}. \quad (3)$$

Таким образом, управляя градиентом массовой доли водяного пара или градиентом температуры, мы можем получить любую, необходимую нам высоту конвекции. Сложнее дело обстоит, если мы можем регулировать только значением перегрева $\Delta_0 T$. Например, при значении $b = 0$, $\Delta\gamma = 4 \cdot 10^{-3} ^{\circ}\text{C}/\text{м}$, нагрев должен быть равен $\Delta_0 T = 4 ^{\circ}\text{C}$ для уровня конвекции 1 км. Соответственно, $\Delta_0 T = 8 ^{\circ}\text{C}$ для уровня конвекции 2 км.

Следует отметить, что те случаи, которые приводит Л.Г. Качурин в своей монографии [1], искусственного стимулирования конвекции, сопровождающееся образованием облаков и осадков, связано именно с подготовленностью атмосферы. Думается, что было намного больше случаев, когда при тех же нагревах ничего не происходило, но история эти случаи замалчивает.

Перейдем к расчету максимальной скорости восходящих потоков и уровня максимальных скоростей. Профиль вертикальной скорости восходящих потоков без учета начальной скорости (орографии) имеет вид [3]:

$$w = N_{\text{BV}} \sqrt{z(z_w - z)}, \quad (4)$$

где $N_{\text{BV}} = \sqrt{\alpha g \Delta\gamma}$ – частота Брента – Вайсяля (Brunt – Väisälä).

Уровень максимальных скоростей равен:

$$z_{w \text{ max}} = \frac{z_w}{2} = \frac{\alpha\Delta_0 T + \beta\Delta s_0}{\alpha\Delta\gamma - \beta b}. \quad (5)$$

Поэтому все замечания, относящиеся к уровню конвекции, относятся и к уровню максимальных скоростей. Выражение для максимальной скорости восходящего потока во влажной атмосфере имеет вид [3]

$$w_{\text{max}} = \sqrt{\frac{g}{\alpha\Delta\gamma - \beta b}} (\alpha\Delta_0 T + \beta\Delta s_0). \quad (6)$$

Отсюда следует, что при критических значениях или градиента массовой доли водяного пара или градиента температуры $w_{\text{max}} \rightarrow \infty$, т.е. имеет место «взрывной» рост.

Несколько слов по поводу «взрывного» роста. В нашей модели конвекции не учитывается вязкость воздуха. Поэтому, думается, что учет вязкости ограничит рост уровня конвекции и других параметров.

По поводу критического значения градиента температуры. В действительности, когда мы греем приземный слой атмосферы, мы автоматически меняем и вертикальный градиент температуры. Здесь принципиально важно наличие вертикального градиента температуры. Так как, если мы создадим достаточно толстый однородный по температуре нагретый слой, то пользы от этого не будет. Другими словами, необходимо наличие, как горизонтального перегрева, так и наличие вертикального перегрева. Кстати, в теорию Рэлея устойчивости конвекции входит не горизонтальный перегрев, а вертикальный перегрев атмосферы. Конвекция начинается при определенном, критическом значении именно вертикального градиента температуры.

Оценим максимальную скорость восходящих потоков при следующих параметрах: $\Delta s_0 = 0$, $b = 0$, $\Delta_0 T = 10^\circ\text{C}$

$$w_{\max} = \sqrt{\frac{\alpha g}{\Delta \gamma}} \cdot \Delta_0 T = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Для этих значений уровень конвекции $z_w = 5$ км.

Как видим, образовать термик, чтобы он оторвался от поверхности земли и достиг необходимых высот, можно. Тем более что термики в естественных условиях всегда возникают над пашней, над склонами гор и другими хорошо прогреваемыми участками поверхности земли.

Но, как понимается, наша задача заключается в образовании не самого термика и даже не самой подоблачной струи, а в образовании облака.

Прежде, чем перейти к расчету параметров на уровне конденсации приведем расчеты подоблачной конвекции в рамках двумерной модели [3].

Для функции тока получено выражение [3]

$$\psi = \frac{\sqrt{g(\alpha \Delta \gamma - \beta b)}}{k} \sqrt{z(2z_p - z)} \cos kx. \quad (7)$$

Здесь $2z_w$ — уровень конвекции.

Из формулы видно, что, чем ближе градиент массовой доли водяного пара к критическому значению, тем выше становится размер конвективной ячейки.

Перейдем к расчету параметров конвекции на уровне конденсации.

Уровень конденсации определяется по формуле [2]

$$z_c = \frac{T_0 - \tau_0}{\gamma_a - \gamma_\tau} = \frac{d_0}{\Delta \gamma_\tau}, \quad (8)$$

где τ_0 — температура точки росы вблизи поверхности земли;

$\gamma_\tau = 1.7 \frac{^\circ\text{C}}{\text{км}}$ — градиент температуры точки росы;

d_0 – дефицит точки росы у земли. Отсюда при дефиците точки росы $d_0 = 10^\circ\text{C}$ получим

$$z_c = \frac{10}{8} = 1.2 \text{ км.}$$

Как правило, формула (8) дает заниженные значения уровня конденсации. Это связано с тем, что в приземном слое имеют место задерживающие слои, кроме того, имеет место перемешивание поднимающегося воздуха с окружающей средой. Поэтому иногда не обосновано с точки зрения физики, формулу (8) в предположении полного перемешивания пишут в виде

$$z_c = \frac{T_0 - \tau_0}{\gamma - \gamma_\tau} = \frac{d_0}{\gamma - \gamma_\tau}. \quad (9)$$

В нашем случае это даст

$$z_c = \frac{10}{4} = 2.5 \text{ км,}$$

т.е. почти в два раза увеличивается уровень конденсации.

Очень важно правильно определить уровень конденсации, так как от этого будут зависеть параметры конвекции на уровне конденсации.

Если подвести предварительный итог приведенным расчетам и рассуждениям, то получается следующее. Для развития конвекции необходимо, чтобы атмосфера по вертикали была сухоадиабатически неустойчива, т.е. $\gamma > \gamma_a$. Но отсутствие таких вертикальных градиентов температуры в приземном слое, а также наличие инверсионных слоев препятствует развитию конвекции. Поэтому необходимо использовать другой стимул развития конвекции, а именно наличие горизонтального градиента температуры. Для крупномасштабной циркуляции атмосферы этот стимул является основным.

Влияние параметров приземного слоя атмосферы на развитие облачной конвекции. На уровне конденсации z_c выражение для скорости восходящих потоков согласно формуле (4) будет иметь вид:

$$w_c^2 = 2g(\alpha\Delta_0T + \beta\Delta s_0) \frac{d_0}{\Delta\gamma_\tau} \left(1 - \frac{d_0}{2(\alpha\Delta_0T + \beta\Delta s_0)} \frac{\alpha\Delta\gamma - \beta b}{\Delta\gamma_\tau} \right). \quad (10)$$

Для функции пересыщения на уровне конденсации получим выражение

$$\Delta_c s = \Delta s_0 + b \frac{d_0}{\Delta\gamma_\tau}. \quad (11)$$

Из выражения (10) видно, что существует критическое значение дефицита точки росы вблизи поверхности земли, для которого вертикальная скорость w_c воздуха на уровне конденсации равна нулю:

$$(d_0)_{\text{cr1}} = 2(\alpha\Delta_0 T + \beta\Delta s_0) \frac{\Delta\gamma_\tau}{\alpha\Delta\gamma - \beta b}. \quad (12)$$

Сравним полученное выражение с формулой:

$$(d_0)_{\text{cr2}} = 2\Delta_0 T \frac{\Delta\gamma_\tau}{\Delta\gamma}, \quad (13)$$

определяющей критическое значение массовой доли водяного пара, при которой вертикальная скорость w_c сухого воздуха на уровне конденсации равна нулю. Замечаем, что наличие влажного подоблачного слоя будет способствовать развитию облачной конвекции (т.е. скорость восходящих потоков на уровне конденсации будет принимать положительные значения $w_c > 0$) и при больших значениях дефицита точки росы вблизи поверхности земли.

Из выражения (10) видно, что, если градиент массовой доли водяного пара в окружающей атмосфере принимает критическое значение b_{cr} , то скорость восходящих потоков на уровне конденсации при любом значении дефицита точки росы вблизи поверхности земли положительна и равна:

$$w_c^2 = 2g(\alpha\Delta_0 T + \beta\Delta s_0) \frac{d_0}{\Delta\gamma_\tau}.$$

Итак, учет влажности подоблачного слоя приводит не только к количественным изменениям критериев, определяющих параметры облачной конвекции на уровне конденсации, но и качественным изменениям. Мы видим, что существенное влияние на параметры облачной конвекции на уровне конденсации имеет не столько значение абсолютной влажности подоблачного слоя, сколько градиент массовой доли водяного пара в подоблачном слое.

Или же, если мы не управляем влажностью окружающей атмосферы, что очевидно, или не управляем влажностью струи, над чем надо бы подумать, то можно получить критическое значение перегрева вблизи поверхности земли:

$$(\Delta_0 T)_{\text{cr}} = \frac{\left(\Delta\gamma - \frac{\beta}{\alpha} b\right)}{2\Delta\gamma_\tau} d_0 - \frac{\beta}{\alpha} \Delta s_0.$$

Посчитаем при условиях, когда вертикальный градиент массовой доли водяного пара окружающей атмосферы равен нулю $b = 0$, и пересыщение водяного пара вблизи земли также равно нулю: $\Delta s_0 = 0$. Тогда

$$(\Delta_0 T)_{\text{cr}} = \frac{\Delta\gamma}{2\Delta\gamma_\tau} d_0. \quad (14)$$

Или с учетом того, что мы говорили выше об уровне конденсации, запишем

$$(\Delta_0 T)_{\text{лср}} = \frac{\Delta \gamma}{2(\gamma - \gamma_\tau)} d_0. \quad (15)$$

Расчеты для вертикального градиента температуры $\gamma = 6 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}/\text{м}$, дефицита точки росы $d_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, получим

$$(\Delta_0 T)_{\text{ср}} = 2,5 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (\Delta_0 T)_{\text{ср}} = 4,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Все наши расчеты проведены без учета наличия инверсионных слоев. И уровень конденсации у нас принимает заниженное значение: $z_c = 1.2 \text{ км}$ и $z_c = 2.5 \text{ км}$, соответственно.

При этих условиях получается, что нагревая приземный слой воздуха с горизонтальным размером порядка 100 м на величину $\Delta_0 T = 4 \div 5 \text{ }^\circ\text{C}$, мы получаем восходящий поток, который доходит до уровня конденсации.

Результаты исследования и их обсуждение

Определим параметры конвекции на уровне конденсации. На уровне конденсации z_c выражение для скорости восходящих потоков будет иметь вид [3]:

$$w_c^2 = 2g(\alpha \Delta_0 T + \beta \Delta s_0) \frac{d_0}{\Delta \gamma_\tau} \left(1 - \frac{d_0}{2(\alpha \Delta_0 T + \beta \Delta s_0)} \frac{\alpha \Delta \gamma - \beta b}{\Delta \gamma_\tau} \right) \sin^2 kx. \quad (16)$$

Подставляя выражение (8) в формулу для функции перегрева

$$\Delta T = \Delta_0 T - \Delta \gamma \cdot z,$$

получим формулу для функции перегрева на уровне конденсации

$$\Delta_c T = \Delta_0 T - d_0 \frac{\Delta \gamma}{\Delta \gamma_\tau}. \quad (17)$$

Из выражений (16) и (17) видно, что существуют критические значения дефицита точки росы вблизи поверхности земли, при которых соответственно равны нулю функция перегрева на уровне конденсации $\Delta_c T$ и скорость восходящих потоков воздуха w_c (на уровне конденсации):

$$\Delta_c T : (d_0)_{\text{ср1}} = \Delta_0 T \frac{\Delta \gamma_\tau}{\Delta \gamma}, \quad (18)$$

$$w_c = 0 : (d_0)_{cr2} = 2(\alpha\Delta_0 T + \beta\Delta s_0) \frac{\Delta\gamma_\tau}{\alpha\Delta\gamma - \beta b}. \quad (19)$$

Из формулы (19) следует, что влажность подоблачного слоя будет способствовать развитию облачной конвекции. Более того, из этой формулы следует, что при значении градиента массовой доли водяного пара, равного критическому значению $b_{cr} = \frac{\alpha\Delta\gamma}{\beta}$, критическое значение дефицита точки росы вблизи поверхности земли $(d_0)_{cr}$ стремится к бесконечности, а это значит, что подоблачная конвекция будет всегда пробивать уровень конденсации, т. е. $w_c > 0$.

Полученные критерии определяют начальные условия облачной конвекции.

Из выражения (16) видно, что, если градиент массовой доли водяного пара в окружающей атмосфере принимает критическое значение b_{cr} , то скорость восходящих потоков на уровне конденсации при любом значении дефицита точки росы вблизи поверхности земли положительна и равна:

$$w_c^2 = 2g(\alpha\Delta_0 T + \beta\Delta s_0) \frac{d_0}{\Delta\gamma_\tau}. \quad (20)$$

Итак, учет влажности подоблачного слоя приводит не только к количественным изменениям критериев, определяющих параметры облачной конвекции на уровне конденсации, но и качественным изменениям. Мы видим, что существенное влияние на параметры облачной конвекции на уровне конденсации имеет не столько значение абсолютной влажности подоблачного слоя, сколько градиент массовой доли водяного пара в подоблачном слое.

Выше мы за критерий взяли дефицит точки росы вблизи поверхности земли. Пересчитаем все по отношению к перегреву $\Delta_0 T$.

Из выражений (16) и (17) видно, что существуют критические значения перегрева $\Delta_0 T$ вблизи поверхности земли, при которых соответственно равны нулю функция перегрева на уровне конденсации $\Delta_0 T$ и скорость восходящих потоков воздуха w_c (на уровне конденсации):

$$\Delta_0 T : (\Delta_0 T)_{cr1} = \frac{\Delta\gamma}{\Delta\gamma_\tau} d_0, \quad (21)$$

$$w_c = 0 : (\Delta_0 T)_{cr2} = \frac{1}{2} \frac{\Delta\gamma - \frac{\beta}{\alpha} b}{\Delta\gamma_\tau} d_0 - \frac{\beta}{\alpha} \Delta s_0. \quad (22)$$

Так как $(\Delta_0 T)_{cr1} > (\Delta_0 T)_{cr2}$, то мы за необходимый и достаточный критерий конвекции примем первый критерий, т. е.

$$(\Delta_0 T)_{cr} = \frac{\Delta \gamma}{\Delta \gamma_{\tau}} d_0 = \frac{\gamma_a - \gamma}{\gamma - \gamma_{\tau}} d_0. \tag{23}$$

Расчеты для вертикального градиента температуры $\gamma = 6 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C/м}$, дефицита точки росы $d_0 = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, дают

$$(\Delta_0 T)_{cr} = 9 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

О чем нам говорит наш критерий (27). Мы видим, что требуемый перегрев является функцией состояния атмосферы, а именно вертикального градиента температуры. Приведем график зависимости перегрева от вертикального градиента температуры:

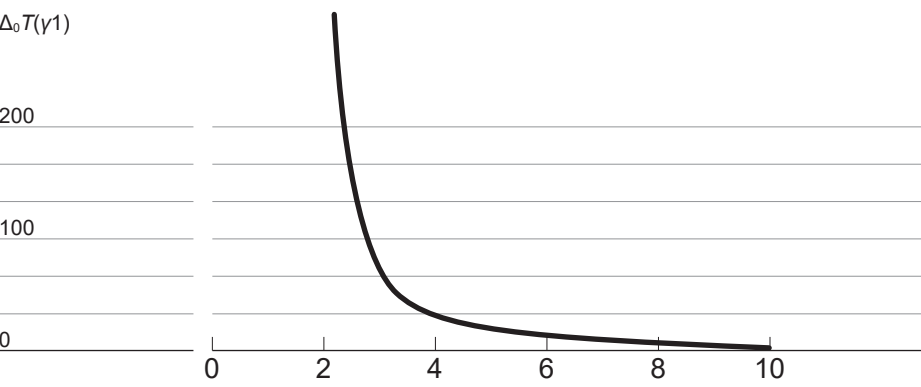


Рис. 1. График зависимости требуемого перегрева вблизи поверхности земли для достижения конвекции уровня конденсации от вертикального градиента температуры.
Fig. 1. Graph of the required overheating near the surface of the earth to achieve convection of the condensation level from the vertical temperature gradient.

Выводы

Из рисунка и из формулы (23) следует, что если $\gamma = \gamma_a$, то перегрев равен нулю, конвекция развивается сама. Если же $\gamma = \gamma_t$, т. е. вертикальный градиент температуры равен вертикальному градиенту точки росы, перегрев равен бесконечности. Другими словами, не то, чтобы инверсия температуры, а даже градиент температуры, равный $\gamma = \gamma_t$, делает конвекцию невозможной.

Какой отсюда следует вывод? Если приземный слой атмосферы от уровня земли до уровня конденсации имеет градиент температуры, равный $\gamma = \gamma_t$, то все попытки искусственного стимулирования за счет нагрева безуспешны. Если же толщина задерживающих слоев меньше указанного слоя, то они могут быть пробиваемы.

В заключение выражаем благодарность профессору М.Т. Абшаеву за постановку вопроса и обсуждение проблемы. Работа выполнена под научным руководством профессора Р.Г. Закиняна.

Библиографический список

1. Вульфсон Н.И., Левин Л.М. Метеотрон как средство воздействия на атмосферу. М.: Гидрометеиздат, 1987. 129 с.
2. Дессенс А. Можем ли мы изменить климат? Л.: Гидрометеиздат 1969. 194 с.
3. Качурин Л. Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. М.: Гидрометеиздат, 1990, 464 с.
4. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб: Гидрометеиздат, 2000, 779 с.
5. Weather and Climate Modification / Ed. W. N. Hess. New-York, John Willey, 1974. 842 p.
6. Zakinyan, R.G.; Zakinyan, A.R.; Lukinov, A.A. Two-dimensional analytical model of dry air thermal convection. Meteorol. Atmos. Phys. 2015, 127, 451–455.

References

1. Vulfson N.I., Levin L.M. Meteotron kak sredstvo vozdeystviya na atmosferu (Meteotron as a means of action on atmosphere). M.: Gidrometeoizdat, 1987. 129 p.
2. Dessens A. Mojem li my izmenit klimat? (Whether we can change a climate?) – L.: Gidrometeoizdat 1969. 194 p.
3. Kachurin L.G. Fizicheskie osnovy vozdeystviya na atmosferynye processy (Physical bases of influence on atmospheric processes) Gidrometeoizdat, 1990, 464 O.
4. Matveev L.T. Fizika atmosfery (Physics of Atmosphere). СПб: Gidrometeoizdat, 2000, 779 c.
5. Weather and Climate Modification /Ed. W. N. Hess. New-York, John Willey, 1974. 842 p.
6. Zakinyan, R.G.; Zakinyan, A.R.; Lukinov, A.A. Two-dimensional analytical model of dry air thermal convection. Meteorol. Atmos. Phys. 2015, 127, 451–455.

Об авторах

- Диденко Анастасия Юрьевна**, аспирант кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета, Телефон 8-988-11-63-727.
E-mail: anastyd@ya.ru.
- Симахина Марина Александровна**, аспиранта кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета, Телефон 8(918)77-88-675.
E-mail: vol.marina@mail.ru.
- Волкова Валентина Ивановна**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета.
Телефон 8(918)758-71-29.
E-mail: stav.volkova@yandex.ru.
Scopus ID: 8937411900.
- Закинян Артур Робертович**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета.
Телефон 8(918)763-07-10.
E-mail: zakinyan.a@mail.ru,
Scopus ID: 15039960300.

About the authors

- Anastasia Didenko**, Postgraduate Student, Department of General and Theoretical Physics, North-Caucasian Federal University.
Phone 8-988-11-63-727.
E-mail: anastyd@ya.ru.
- Simakhina Marina Aleksandrovna**, a graduate student of the department of general and theoretical physics of the North Caucasus Federal University.
Phone 8 (918) 77-88-675
E-mail: vol.marina@mail.ru.
- Volkova Valentina Ivanovna**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of General and Theoretical Physics of the North Caucasus Federal University.
Phone 8 (918) 758-71-29.
E-mail: stav.volkova@yandex.ru.
Scopus ID: 8937411900.
- Arthur R. Zakinyan.**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of General and Theoretical Physics, North-Caucasian Federal University.
Phone 8 (918) 763-07-10.
E-mail: zakinyan.a@mail.ru.
Scopus ID: 15039960300.

Научное издание

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ

2018

Выпуск 4



Издательство Северо-Кавказского
федерального университета.
г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1.

Корректор – М.И. Толмачев.
Компьютерная верстка – О.Г. Полевич.

Подписано в печать 14.12.2018 г. Выход в свет 29.12.2018 г.
Формат 70 × 108 1/16. Гарнитура Times New Roman. Бумага
офсетная. Усл. печ. л. 13,46. Тираж 1000 экз. Цена 534 руб.

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