

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал
Северо-Кавказского федерального
университета

ISSN 2308–4758



Выпуск № 4, 2021 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.г.н., проф. Белозеров В.С.
Заместитель главного редактора:	д.г.н., проф. Щитова Н.А.
Международный редакционный совет:	Абшаев М.Т., д-р физ.-мат. наук, профессор (Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик); Воробьева О.Д., д. экон. наук, профессор (Московский государственный университет, г. Москва); Лиховид А.А., д-р геогр. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Герасименко Т.И., д-р геогр. наук, профессор (Оренбургский гос. университет, г. Оренбург); Диневич Л.А., д-р физ.-мат. наук, профессор (Тель-Авивский университет, г. Тель-Авив); Жакин А.И., д-р физ.-мат. наук, профессор (Юго-Западный гос. университет, г. Курск); Зырянов А.И., д-р геогр. наук, профессор (Пермский государственный университет, г. Пермь); Ибрагимов А.И., д-р геогр. наук, профессор (Эгейский Университет, Турция, г. Измир); Хани А.А.К., канд. техн. наук, профессор (Иорданский университет науки и технологии, Ирбид); Коляда А.А., д-р физ.-мат. наук, доцент (Белорусский гос. университет, г. Минск); Молодикова И.Н., канд. геогр. наук (Центрально-Европейский университет, г. Вена); Нефедова Т.Г., д-р геогр. наук, вед. науч. сотрудник РАН (ИГ РАН, г. Москва); Панин А.Н., к.геогр.н., доц. (Московский государственный университет, г. Москва); Рязанцев С.В., член-корреспондент РАН, д. экон. наук, профессор (Институт социально-политических исследований РАН, г. Москва); Тикунов В.С., д-р геогр. наук, профессор (Московский государственный университет, г. Москва)
Редакционная коллегия:	Белозеров В.С., д-р геогр. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Бекетов С.Б., д-р техн. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Гасумов Р.А., д-р техн. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Керимов А.Г., д-р техн. наук, доцент (СКФУ, г. Ставрополь); Губарева Л.И., д-р биол. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Джандарова Т.И., д-р биол. наук, доцент (СКФУ, г. Ставрополь); Диканский Ю.И., д-р физ.-мат. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Ерин К.В., д-р физ.-мат. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Закинян А.Р., д-р физ.-мат. наук, доцент (СКФУ, г. Ставрополь); Закинян Р.Г., д-р физ.-мат. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Котти Б.К., д-р биол. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Лукьянов В.Т., д-р техн. наук, доцент (СКФУ, г. Ставрополь); Лысенко А.В., д-р геогр. наук, доцент (СКФУ, г. Ставрополь); Полян П.М., д-р геогр. наук, вед. науч. сотрудник РАН (ИГ РАН, г. Москва); Разумов В.В., д-р геогр. наук, профессор (главный научный сотрудник ОАО «Российские космические системы», г. Москва); Тимченко Л.Д., д-р ветеринар. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Толпаев В.А., д-р физ.-мат. наук, доцент (СКФУ, г. Ставрополь); Федорова Н.Г., д-р техн. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Шальнев В.А., д-р геогр. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Щитова Н.А., д-р геогр. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Соловьев И.А. (к. геогр. н., доцент (СКФУ, г. Ставрополь); Мишвелов Е.Г., д-р биол. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Бадов А.Д., д-р геогр. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь)
Ученый секретарь:	к.геогр.н., доц. Соловьев И.А.
Свидетельство о регистрации	ПИ № ФС77–52723 от 8.02.2013
Подписной индекс	Объединённый каталог. ПРЕССА РОССИИ. Газеты и журналы: 94011
Журнал	включен в БД «Российский индекс научного цитирования», перечень ВАК. Журнал «Вестник Ставропольского государственного университета» перерегистрирован в журнал «Наука. Инновации. Технологии» в связи с переименованием учредителя
Адрес	355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1
Телефон	(8652) 33–07–32
Сайт	www.ncfu.ru
E-mail:	nit_ncfu@mail.ru
ISSN	2308–4758

	«Science. Innovations. Technologies» North Caucasus Federal University
Founder	Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education «North Caucasus Federal University»
Chief Editor:	Doctor of Geographical Sciences, prof. Belozеров V.S.
Deputy Chief Editor:	Doctor of Geographical Sciences, prof. Shchitova N.A.
International Editorial Board:	Abshaev M.T., Doctor of Phys.-Math. Sciences, (High Mountain Geophysical Institute, Nalchik); Vorobieva O.D., Doctor of Economics Sciences, Professor (Moscow State University, Moscow); Likhovid A.A., Dr. Geogr. sciences, professor (NCFU, Stavropol); Bondar T.P., Dr. med. Sciences, Professor (Stavropol Medical University, Stavropol); Gerasimenko T.I., Dr. of Geogr. Sciences, Professor (Orenburg State University, Orenburg); Dinevich L.A., Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor (Tel Aviv University, Tel Aviv); Zhakin A.I., Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor (South-West State University, Kursk); Zyryanov A.I., Dr. of Geogr. Sciences, Professor (Perm State University, Perm); Ibragimov A.I., Dr. of Geogr. Sciences, Professor (Aegean University, Turkey, Izmir); Hani A.A.K., Cand. tech. Sciences, Professor (Jordan University of Science and Technology, Irbid); Kolyada A.A., Doctor of Phys.-Math. Sciences, Associate Professor (Belarusian State University, Minsk); Molodikova I.N., Cand. geogr. Sciences (Central European University, Vienna); Nefedova T.G., Dr. Geogr. sciences, led. scientific. RAS employee (IG RAS, Moscow); Panin A.N., Ph.D., Assoc. (Moscow State University, Moscow); Razumov V.V., Dr. of Geogr. Sciences, Professor (JSC «Russian Space Systems», Moscow); Ryazantsev S.V., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Economics Sciences, Professor (Institute of Social and Political Research RAS, Moscow); Tikunov V.S., Dr. of Geogr. Sciences, Professor (Moscow State University, Moscow)
Editorial team:	Belozеров V.S., Dr. of Geogr. Sciences, Professor (NCFU, Stavropol); Beketov S.B., Dr. sciences, professor (NCFU, Stavropol); Gasumov R.A., Dr. sciences, professor (NCFU, Stavropol); Kerimov A.G., Dr. Sciences, Associate Professor (NCFU, Stavropol); Bondar T.P., Dr. med. Sciences, Professor (Stavropol Medical University, Stavropol); Gubareva L.I., Dr. of Biol. sciences, professor (NCFU, Stavropol); Dzhandarova T.I., Dr. of Biol. Sciences, Associate Professor (NCFU, Stavropol); Dikansky Yu.I., Dr. of Phys.-Math. sciences, professor (NCFU, Stavropol); Erin K.V., Dr. of Phys.-Math. sciences, professor (NCFU, Stavropol); Zakinyan A.R., Dr. of Phys.-Math. Sciences, Associate Professor (NCFU, Stavropol); Zakinyan R.G., Dr. of Phys.-Math. sciences, professor (NCFU, Stavropol); Cottie B.K., Dr. of Biol. sciences, professor (NCFU, Stavropol); Lukyanov V.T., Dr. Sciences, Associate Professor (NCFU, Stavropol); Lysenko A.V., Dr. of Geogr. Sciences, Associate Professor (NCFU, Stavropol); Polyan P.M., Dr. of Geogr. Sciences, led. scientific. RAS employee (IG RAS, Moscow); Razumov V.V., Dr. of Geogr. Sciences, Professor (Chief Researcher of JSC Russian Space Systems, Moscow); Timchenko L.D., Dr. of Veterinary Medicine. sciences, professor (NCFU, Stavropol); Tolpaev V.A., Doctor of Phys.-Math. Sciences, Associate Professor (NCFU, Stavropol); Fedorova N.G., Dr. Sciences, Professor (NCFU, Stavropol); Shalnev V.A., Dr. of Geogr. Sciences, Professor (NCFU, Stavropol); Shchitova N.A., Dr. of Geogr. Sciences, Professor (NCFU, Stavropol); Soloviev I.A., Ph.D., Associate Professor (NCFU, Stavropol); Mishvelov E.G., Doctor of Biological Sciences, Professor (NCFU, Stavropol); Badov A.D., Dr. Sciences, Professor (NCFU, Stavropol)
Scientific Secretary:	Ph. D., Sciences, Associate Professor Soloviev I.A.
Certificate	ПН №ФС77–52723 dated February 8th 2013
The Index	The Journal is included in the DB «Russian index of the scientist quoting» 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
Adress	355017, Stavropol, Pushkin street, 1
Phone	(8652) 33–07–32
Site	www.ncfu.ru
E-mail:	nit_ncfu@mail.ru
ISSN	2308–4758

СОДЕРЖАНИЕ

«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ», № 4, 2021

25.00.17	РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ Вержбицкий В.В., Щекин А.И., Шестерикова Р.Е. Исследование скин-фактора при стационарном притоке газа по нелинейному закону фильтрации	7
	Verzhbitsky V.V., Shchekin A.I., Shesterikova R.E. Investigation of the Skin Factor in Steady-State Gas Flow Obeying Nonlinear Filtration Law	8
	Копытов А.Г., Левкович С.В., Левитина Е.Е., Ковалев И.А. Эффективность кислотной обработ- ки призабойной зоны скважины для отложений с трудноизвлекаемыми запасами	27
	Kopytov A.G., Levkovich S.V., Levitina E.E., Kovalev I.A. Efficiency of Acid Treatment of the Bottom Borehole Zone of the Well for Sediments with Hard-To- Remove Reserves	28
25.00.23	ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ Губанов Р.С., Лиховид А.А. Основные этапы формирования прибрежного фаунистического комплекса (tetrapoda) среднего течения реки Егорлык	41
	Gubanov R.S., Likhovid A.A. Transformation of Coastal Faunal Complex (Tetrapoda) of the Lysy Liman Lake in the Operation of Hydraulic Structures in the Middle Cour- se.	42

25.00.24	ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, ПОЛИТИЧЕСКАЯ И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ Chereshnya O., De Maeyer P., Gribok M., Milleville K., Tikunov V., Van Ackere S., Van de Weghe N. The Experience In Information Support For Sustainable Development of Territories With Regional Specifics	63
	Белозеров В.С., Щитова Н.А., Соловьев И.А. Демографическая ситуация в Северо-Кавказском федеральном округе	77
	V.S. Belozеров, N.A. Shchitova I.A. Soloviev Demographic Situation in the North Caucasian Federal District	78
	Черкасов А.А., Махмудов Р.К., Сопнев Н.В. Пространственный анализ городов и агломераций: интеграция технологий ГИС и Big Data	95
	Cherkasov A.A., Maxmudov R.K., Sopnev N.V. Spatial Analysis of Cities and Agglomerations: Integration of GIS and Big Data Technologies	96
25.00.30	МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ, АГРОМЕТЕОРОЛОГИЯ Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т. Оценка характеристик интенсивности града по выходным данным глобальной модели атмосферы GFS NCEP	113
	Kagermazov A.Kh., Sozaeva L.T. Estimation of the Characteristics of the Intensity of Hail on Global Atmospheric Model Output Data GFS NCEP	114
	Кешева Л.А. Оценка тенденций изменения высоты снежного покрова на метеостанциях Северного Кавказа	127

Kesheva L.A. Estimation of Tendencies in the Height of the Snow Cover at Weather Stations in the Northern Caucasus	128
Смерек Ю.Л., Афанасьев И.С., Закинян Р.Г., Крупкин А.А. Численный анализ условий возник- новения свободной конвекции сухого воздуха в ат- мосфере	145
Smerek Yu.L., Afanasief I.S., Zakinyan R.G., Krupkin A.A. Numerical Analysis of the Conditions for the Occurrence of Free Convection of Dry air in the At- mosphere	146
Ташилова А.А. Статистика херста (r/s-анализ) в ис- следовании климатических переменных	167
Tashilova A.A. Hurst Statistics (r/s-analysis) in the Study of Climatic Variables	168
Теунова Н.В. Оценка изменений наземных харак- теристик града при проведении активного воздейст- вия на градовые процессы	191
Teunova N.V. Assessment of Changes in the Ground Characteristics of Hail During an Active Impact on Hail Processes	192
Хучунаев Б.М., Геккиева С.О., Будаев А.Х. Лабораторные исследования влия- ния напряженности электрического поля на удель- ный заряд на частицах реагента, образующихся при возгонке пиротехнических составов	209
Khuchunaev B., Gekkieva S., Budaev A., Laboratory studies of the Effect of the Electric Field Strength on the Specific Charge on Reagent Particles Formed During the Sublimation of Pyrotechnic Compositions	210

25.00.17
УДК 622.279

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ
И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Вержбицкий В.В., Северо-Кавказский федеральный университет,
Щекин А.И., г. Ставрополь,
Шестерикова Р.Е. Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ СКИН-ФАКТОРА ПРИ СТАЦИОНАРНОМ ПРИТОКЕ ГАЗА ПО НЕЛИНЕЙНОМУ ЗАКОНУ ФИЛЬТРАЦИИ

DOI: 10.37493/2308-4758.2021.4.1

Введение.

Производительность скважин газовых и газоконденсатных месторождений, а также подземных хранилищ газа зависит от таких параметров как термодинамические условия, свойства добываемого флюида, способ вскрытия и заканчивания, фильтрационно-емкостные и геометрические характеристики пласта. Для идентификации факторов, влияющих на дебит скважин используют информацию, полученную в результате интерпретации данных систематически проводимых газодинамических исследований. Разработка математических моделей оценки факторов, влияющих на технологический режим работы газовых скважин с последующим формированием перечня скважин-кандидатов для проведения геолого-технических мероприятий, является актуальным направлением повышения производительности подземных хранилищ газа.

Материалы и методы исследования.

Обработка результатов газодинамических исследований основывается на теоретических положениях фильтрации флюидов в пористой среде по линейному и нелинейному законам. Наиболее достоверно оценить величины численных значений коэффициентов фильтрационных сопротивлений A и B позволяют результаты исследований скважин при установившихся режимах фильтрации. В статье проанализированы причины изменения коэффициентов A и B на примере скважин на подземных хранилищах газа, а также входящих в них основных параметров. Обосновано определение коэффициента вихревых сопротивлений β , входящего в квадратичный член уравнения фильтрации газа по нелинейному закону. Поскольку наибольшее падение давления в продуктивном пласте происходит в непосредственной близости от ствола скважины, то основными факторами, влияющими на фильтрационные сопротивления в призабойной зоне пласта, являются радиус и степень изменения коэффициента проницаемости загрязненной зоны, а также радиус влияния и высота песчано-глинистой пробки.

Результаты исследований**и их обсуждение.**

Для идентификации параметров призабойной зоны пласта в работе разработаны математические модели оценки значений скин-факторов для коэффициентов A и B , соответственно характеризующих линейные и вихревые фильтрационные сопротивления при нелинейном законе фильтрации газа.

Полученные формулы расчета скин-факторов для случаев наличия загрязнения призабойной зоны пласта или песчано-глинистой пробки дают возможность определить радиус и коэффициент проницаемости загрязненной зоны, а также радиус влияния и высоту песчано-глинистой пробки. Математические модели апробированы на синтетических скважинах подземных хранилищ газа, где смоделированы условия изменения коэффициентов фильтрационных сопротивлений от начальных значений A и B (без скин-факторов) до текущих A_s и B_s (с учетом скин-факторов).

Выводы.

В статье представлены методологические основы оценки основных параметров призабойной зоны пласта, влияющих на производительность газовых скважин. Разработанная методология, также может быть использована для оценки уже проведенных мероприятий по повышению производительности газовых скважин.

Ключевые слова:

нелинейный закон фильтрации, коэффициенты фильтрационных сопротивлений, коэффициент вихревых сопротивлений, скин-фактор, радиус и коэффициент проницаемости измененной зоны пласта, радиус влияния и высота песчано-глинистой пробки.

Verzhbitsky V.V., North-Caucasus Federal University,
Shchekin A.I., Stavropol,
Shesterikova R.E. Russia

INVESTIGATION OF THE SKIN FACTOR IN STEADY-STATE GAS FLOW OBEYING NONLINEAR FILTRATION LAW

Introduction.

The productivity of the wells at gas and gas condensate fields along with the wells at underground gas storage facilities, depends on such parameters as thermodynamic conditions, properties of the produced fluid, method of opening and completion, filtration-volumetric and geometrical characteristics of the formation. To identify the factors affecting the flow rate of wells, the information obtained as a result of the interpretation of the data of systematically conducted gas well tests is used. The development of mathematical models for assessing the factors af-

fecting the technological regime of gas wells' operation, followed by the formation of a list of candidate wells for wells intervention is an urgent approach for increasing the productivity of underground gas storage facilities.

Materials and research methods.

The processing of the results of gas well tests is based on the theoretical provisions of the filtration of fluids in a porous medium obeying to linear and nonlinear laws. The results of well tests under steady-state filtration modes provide the most reliable estimate of the numerical values of the coefficients of filtration resistances A and B .

The paper analyzes the reasons for the change in the coefficients A , B , and their main parameters by the example of underground gas storage wells. The definition of the turbulence coefficient β , which is included in the quadratic term of the equation of gas filtration obeying to the nonlinear law, has been substantiated. Since the largest pressure drop in the producing formation occurs in the immediate vicinity of the wellbore, the main factors affecting the filtration resistance in the bottomhole formation zone are the radius and degree of change in the permeability coefficient of the contaminated zone, as well as the radius of influence and the height of the sand-clay plug.

Research results and their discussion.

To identify the parameters of the bottomhole formation zone, mathematical models have been developed for assessing the values of skin factors for the coefficients A and B , characterizing the linear and turbulent filtration resistance factors under the nonlinear law of gas filtration, respectively.

The obtained formulas for calculating skin factors for cases of the presence of contamination of the bottomhole formation zone or sand-clay plug make it possible to determine the radius and permeability coefficient of the contaminated zone, as well as the radius of influence and height of the sand-clay plug. Mathematical models have been tested on synthetic wells of underground gas storage facilities. For these wells, the conditions for the change in the filtration resistance coefficients from the initial values A and B (without skin factors) to the current A_s and B_s (with regard to skin factors) are modeled.

Conclusions.

The paper presents the methodological foundations for assessing the main parameters of the bottomhole formation zone which affect the productivity of gas wells. The developed methodology can also be used to assess well interventions already performed to increase the productivity of gas wells.

Key words:

nonlinear filtration law, filtration resistance coefficients, turbulent resistance coefficient, skin factor, radius and permeability coefficient of the changed formation zone, radius of influence and height of sand-clay plug.

Введение

Увеличение роли процессов интеллектуализации технологических процессов на подземных хранилищах газа ПХГ связано с расширением спектра решаемых задач по повышению производительности скважин, возможностей регулирования и оптимизации режимов эксплуатации скважин с целью энергоэффективности и ресурсосбережения, повышения уровней промышленной безопасности и охраны окружающей среды.

Важным параметром, характеризующим эффективную разработку нефтегазовых месторождений и эксплуатацию подземных хранилищ газа, является производительность фонда добывающих скважин, которая складывается из суточного дебита каждой отдельной скважины. Производительность скважины в процессе эксплуатации является нестабильной величиной, зависящей от термодинамических параметров, свойств добываемого флюида, фильтрационно-емкостных и геометрических характеристик пласта. Для идентификации факторов, влияющих на дебит скважин используют информацию, полученную в результате интерпретации данных систематически проводимых газодинамических исследований (ГДИ) и численного моделирования [1, 2, 3]. Разработка математических моделей оценки факторов, влияющих на технологический режим работы газовых скважин с последующим формированием перечня скважин-кандидатов для проведения геолого-технических мероприятий, является актуальным направлением повышения производительности подземных хранилищ газа.

Материалы и методы исследования

Обработка результатов ГДИ основывается на теоретических положениях фильтрации флюидов в пористой среде. Фундаментальным законом, устанавливающим линейную связь между скоростью фильтрации и градиентом давления, является закон Дарси [4, 5]:

$$-grad P = \frac{\mu}{k} v, \quad (1)$$

где $grad P$ – градиент давления (знак минус означает, что течение флюида противоположно направлению наискорейшего роста давления),

- μ – коэффициент динамической вязкости,
 v – скорость фильтрации,
 k – коэффициент проницаемости.

Проводимые экспериментальные исследования показали, что закон Дарси имеет пределы применимости и нарушается при больших и малых скоростях фильтрации флюидов, наличии многофазного потока в продуктивном пласте. В первую очередь это связано с тем, что скорость фильтрации является фиктивной, так как предполагается, что расход газа распространяется на всю площадь поперечного сечения пористой среды, хотя в действительности движение потоков происходит по отдельным извилистым каналам. Нарушения в области малых скоростей связано с проявлением неньютоновских реологических свойств фильтрующегося флюида, т.е. молекулярными эффектами. Причины вызывающие отклонения от закона Дарси при больших скоростях, являются предметом дискуссии среди исследователей. Наиболее вероятными гипотезами являются проявление инерционных сопротивлений, возникновение турбулентного режима течения, постепенное распространение вихреобразования по всему объему пористой среды.

Теоретические решения, основанные на базовых положениях гидравлики и гидродинамики представлены в работах [6, 7, 8] Маскета М., Лейбензона Л.С., Щелкачева В.Н и Лапука Б.Б. при этом использовались различные модели фильтрации: модель идеального порового канала, модель гидравлического диаметра, модель вязкого увлечения.

В результате исследований потока газа через пористую среду при больших скоростях, которые характерны для скважин газовых месторождений и ПХГ, Ф. Форхгеймер предложил двучленную формулу, в которой второй член учитывает вихревые (инерционные) сопротивления:

$$-grad P = \frac{\mu}{k} \vartheta + \beta \rho \vartheta^2, \quad (2)$$

- где ρ – плотность газа при пластовых условиях,
 β – коэффициент, учитывающий вихревые (инерционные) сопротивления.

Позже нелинейная фильтрация газа в пористой среде была подтверждена лабораторными исследованиями на образцах керна, а также при обработке результатов промысловых и газодинамических исследований пластов и скважин при установившихся режимах фильтрации.

В формуле (2) наименее изученным параметром является коэффициент, учитывающий вихревые (инерционные) сопротивления β . В научной литературе двучленный закон получил различные трактовки.

В работах [4, 5] двучленный закон фильтрации в дифференциальной форме имеет следующий вид:

$$-\frac{dP}{dx} = \frac{\mu}{k} \vartheta + \beta^* \frac{\rho}{\sqrt{k}} \vartheta^2, \quad (3)$$

где ρ – плотность газа при пластовых условиях,
 β^* – безразмерная константа пористой среды.

Как видно из формулы (3) из коэффициента β вынесена проницаемость пласта.

Ряд авторов [10, 11] вводят в данный закон величину макрошероховатости l , которая является величиной обратно пропорциональной β :

$$-\frac{dP}{dx} = \frac{\mu}{k} \vartheta + \frac{\rho \vartheta^2}{l}, \quad (4)$$

где l – коэффициент макрошероховатости.

В литературных источниках коэффициент β имеет различные названия: «коэффициент Форхгеймера», «константа пористой среды», «коэффициент вихревых сопротивлений», «инерционный коэффициент», «коэффициент турбулентности», «non Darcy flow coefficient» и др.

Из формул (2, 3, 4) можно получить следующее равенство:

$$\beta = \frac{\beta^*}{\sqrt{k}} = \frac{1}{l}, \quad (5)$$

По причине неоднозначности в названии и различий в подходе изучения рассматриваемых коэффициентов проис-

ходят ошибки при интерпретации данных о фильтрации флюидов в продуктивном пласте. Обоснованное определение коэффициента вихревых сопротивлений является основой для правильной обработки результатов исследований скважин при нелинейной фильтрации газа.

В данной работе будет использован термин «коэффициента вихревых сопротивлений», подразумевая параметр β из уравнения (2), который является наиболее изученным и обоснованным из представленных коэффициентов.

В научной литературе приведено множество результатов промысловых и лабораторных исследований по определению коэффициента вихревых сопротивлений, в большинстве случаев рассматриваемые коэффициенты определяются по эмпирическим корреляциям. Результаты исследований перепада давления от скорости фильтрации для различных типов пористых сред по определению коэффициента вихревых сопротивлений представлены в работах таких авторов, как G.H. Fancher и J.A. Lewis, A. Firoozabadi и D.L. Katz, S.W. Wong и др. [12, 13, 14]. Выведены зависимости для однофазной и многофазной фильтрации. Большинство исследований о природе коэффициента вихревых сопротивлений сводятся к тому, что определяющими факторами, оказывающими наибольшее влияние на величину потенциальных вихревых (инерционных) сопротивлений являются коэффициенты проницаемости и пористости, также оказывает влияние форма, шероховатость и извилистость поровых каналов. Несмотря на простые формулировки, указанные величины включают в себя такие эмпирические параметры, точное определение которых является непростой задачей. Даже для небольшого класса пористых сред эти эмпирические параметры могут варьироваться в широком диапазоне, тем самым приводя к существенным ошибкам при оценке коэффициента вихревых сопротивлений.

Наиболее полный комплексный обзор теоретических и эмпирических моделей нелинейной фильтрации газа представлен в работе D. Li и T.W. Engler [15], на основе которого в работе [16] выведена обобщенная формула для коэффициента вихревых сопротивлений:

$$\beta = 4,1 \cdot 10^{11} k^{-1,5}, \quad (6)$$

Для обработки результатов ГДИ газовых скважин используют уравнение притока газа к скважине, которое является интегральной формой уравнения (2) при плоскорадиальной фильтрации:

$$P_e^2 - P_{wf}^2 = AQ + BQ^2, \quad (7)$$

где $A = \frac{\mu_g Z T P_0}{\pi k h T_0} \left[\ln \frac{R_e}{r_w} + S_A \right], \quad (8)$

$$B = \frac{\beta \rho_0 Z T P_0}{2 \pi^2 h^2 T_0} \left[\left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{R_e} \right) + S_B \right], \quad (9)$$

где P_O – давление на границе области (радиуса) дренирования – пластовое давление;
 P_{wf} – забойное давление;
 Q – дебит газа в нормальных условиях;
 k – коэффициент проницаемости пласта;
 h – эффективная толщина пласта;
 μ_g – динамическая вязкость газа;
 Z – коэффициент сверхсжимаемости газа;
 T – пластовая температура;
 T_0 – температура в нормальных условиях;
 P_0 – давление в нормальных условиях;
 β – коэффициент вихревых сопротивлений (коэффициент турбулентности);
 ρ_0 – плотность газа в нормальных условиях;
 R_O – радиус контура дренирования;
 r_w – радиус ствола скважины;
 S_A и S_B – скин-факторы, соответственно для коэффициентов A и B , характеризующих линейные и вихревые фильтрационные сопротивления.

Использование результатов исследований скважин при установившихся режимах фильтрации газа по нелинейному закону позволяет достоверно оценить коэффициенты фильтрационных сопротивлений A и B , а значит и выявить факторы, влияющие на фильтрационно-емкостные свойства пласта, его призабойной зоны и производительность скважин. Учет данных параметров необ-

ходим для эффективного проектирования технологических режимов работы скважин эксплуатационного фонда на газовых месторождениях и ПХГ.

Опыт ранее проведенных исследований в сфере анализа результатов обработки ГДИ показывает, что численные значения коэффициентов фильтрационных сопротивлений в процессе эксплуатации скважин изменяются, ввиду различных факторов, при этом, как правило, наблюдается однонаправленный тренд. Росту коэффициентов A и B способствуют различные осложнения, такие как загрязнение призабойной зоны пласта, засорение перфорационных каналов, образование песчано-жидкостных пробок и др. Снижение коэффициентов в большинстве случаев отмечается после проведения эффективных геолого-технических мероприятий на скважинах, в то же время очистка призабойной зоны пласта может происходить и естественным образом, например, в цикле отбора газа на ПХГ проницаемость загрязненной зоны увеличивается в результате выноса кольматантов.

Для достоверного определения причин снижения производительности газовой скважины необходимо провести сравнение коэффициентов фильтрационных сопротивлений A и B определённых в результате обработки данных ГДИ.

Проанализируем основные параметры, входящие в выражения (8) и (9) и оказывающие влияние на численные значения коэффициентов фильтрационных сопротивлений A и B .

Термодинамические условия и свойства пластового флюида (T, μ_g, ρ_0, Z) за рассматриваемый период изменятся незначительно. Так, в работах [10, 11] отмечается, что изменение плотности, коэффициентов вязкости и сверхсжимаемости газа при депрессии на пласт 1–2 МПа будут незначительными, в абсолютных величинах разница составит тысячные и сотые доли единицы, что указывает на их относительное постоянство.

Анализируя геометрические характеристики пласта, радиус скважин r_w принимаем равным радиусу скважины по долоту, а радиус контура питания скважины R_e равным половине расстояния между соседними скважинами. Изменение эффективной толщины пласта h в зоне дренирования незначительно и принимается постоянной, существенные перемены характерны непосредственно на забое до-

бывающей скважины в случае образования песчано-глинистой пробки или обводнения.

Таким образом, основными параметрами, влияющими на коэффициенты фильтрационных сопротивлений A и B являются коэффициенты вихревых сопротивлений β и проницаемости k , которые аналогично эффективной толщине пласта наиболее подвержены изменению непосредственно в призабойной зоне пласта.

Для характеристики изменений в призабойной зоне пласта A.F. Van Everdingen и N. Hurst [17] ввели параметр скин-фактора (скин-эффекта), учитывающего загрязнение призабойной зоны пласта. Впоследствии понятие скин-фактора расширено в результате учета дополнительных факторов и в настоящее время интегральный скин-фактор складывается из суммы псевдоскин-факторов [18]:

$$P_e^2 - P_{wf}^2 = \frac{\mu g Z T P_0 Q}{\pi k h T_0} \left[\ln \frac{R_e}{r_w} + \left(\frac{k}{k_d} - 1 \right) \ln \frac{r_d}{r_w} \right] + \frac{\beta \rho_0 Z T P_0 Q^2}{2 \pi^2 h^2 T_0} \left[\left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{R_e} \right) + \left(\frac{k^{1,5}}{k_d^{1,5}} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_d} \right) \right] \quad (10)$$

где S_d — механический скин-фактор, учитывающий загрязнение призабойной зоны пласта;
 S_p — псевдоскин-фактор за счет частичного вскрытия пласта;
 S_{perf} — псевдоскин-фактор, учитывающий наличия перфорации;
 S_s — псевдоскин-фактор, вызванный наклоном скважины;
 S_f — псевдоскин-фактор, учитывающий наличие трещин ГРП.

В литературе представлено большое количество научных исследований эмпирического и аналитического характера для определения расчетных формул скин-фактора в различных геолого-технологических условиях. Так, в работах [18–21] приведены результаты исследований определения псевдоскин-фактора при частичном вскрытии пласта скважиной, большинство из которых рассматривали однослойный, изотропный коллектор бесконечной площади, и лишь ограниченное количество работ посвящено многослойным коллекторам.

Результаты исследований и их обсуждение

Для механического скин-фактора в коэффициенте A при линейном законе фильтрации, характеризующего линейные сопротивления Hawkins M.F. [22] используя модель притока газа к скважине в зонально-неоднородном пласте представил следующую формулу:

$$S_{Ad} = \left(\frac{k}{k_d} - 1 \right) \ln \frac{r_d}{r_w} \quad (11)$$

где k_d — проницаемость измененной зоны пласта.

Используя модель зонально-неоднородного пласта, можно получить аналогичную формулу для скин-фактора в квадратичном члене уравнения при нелинейной фильтрации газа, учитывающего вихревые сопротивления.

$$S_{Bd} = \left(\frac{\beta_d}{\beta} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_d} \right) \quad (12)$$

где β_d — коэффициент вихревых сопротивлений в измененной зоне пласта.

Подставив выражение (6) в формулу (11) получим:

$$S_{Bd} = \left(\frac{k^{1,5}}{k_d^{1,5}} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_d} \right) \quad (13)$$

Тогда учитывая (11) и (13) выражение (7) для случая загрязнения призабойной зоны пласта можно представить в следующем виде:

$$P_s^2 - P_{wf}^2 = \frac{\mu_g Z T P_0 Q}{\pi k h T_0} \left[\ln \frac{R_g}{r_w} + \left(\frac{k}{k_d} - 1 \right) \ln \frac{r_d}{r_w} \right] + \frac{\beta P_0 Z T P_0 Q^2}{2 \pi^2 h^2 T_0} \left[\left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{R_g} \right) + \left(\frac{k^{1,5}}{k_d^{1,5}} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_d} \right) \right] \quad (14)$$

Исследуя влияние песчано-глинистой пробки на производительность газовых скважин при нелинейной фильтрации [18] и принимая во внимание допущение, что наличие пробки на забое практически равносильно несовершенству скважины по степени вскрытия [7], уравнение (7) примет следующий вид:

$$P_e^2 - P_{wf}^2 = \frac{\mu_g Z T P_0 Q}{\pi k h T_0} \left[\ln \frac{R_e}{r_w} + \left[\frac{h}{h_p} - 1 \right] \ln \frac{r_p}{r_w} \right] + \frac{\beta \rho_0 Z T P_0 Q^2}{2 \pi^2 h^2 T_0} \left[\left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{R_e} \right) + \left(\frac{h^2}{h_p^2} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_p} \right) \right] \quad (15)$$

где скин-факторы для коэффициентов A и B равны:

$$S_{A_p} = \left[\frac{h^2}{h_p^2} - 1 \right] \ln \frac{r_p}{r_w} \quad (16)$$

$$S_{B_p} = \left(\frac{h^2}{h_p^2} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_p} \right) \quad (17)$$

где h_p – работающая толщина пласта,
 r_p – радиус влияния песчано-глинистой пробки.

Из опыта эксплуатации газовых скважин известно, что наибольшее падение давления происходит в непосредственной близости от ствола скважины. Факторы, влияющие на фильтрационные сопротивления в измененной зоне – это величина радиуса и степень изменения коэффициента проницаемости при загрязнении призабойной зоны пласта или радиус влияния и работающая толщина пласта при образовании песчано-глинистой пробки.

Зададимся следующими условиями, пусть в скважине ПХГ в цикле отбора по результатам обработки ГДИ наблюдается изменение коэффициентов фильтрационных сопротивлений от начальных значений A и B (без скин-факторов) до текущих A_s и B_s (с учетом скин-факторов от загрязнения изменённой зоны S_{A_d} (11) и S_{B_d} (13) или при наличии песчано-глинистой пробки S_{A_p} (16) и S_{B_p} (17)).

Для оценки технологической эффективности режима работы газовой скважины или проведения ГТМ получим следующие выражения:

– при наличии загрязнения в призабойной зоне пласта:

$$\frac{A_d}{A} = \frac{\left(\ln \frac{R_e}{r_w} + \left[\frac{k}{k_d} - 1 \right] \ln \frac{r_d}{r_w} \right)}{\ln \frac{R_e}{r_w}}, \quad (18)$$

$$\frac{B_d}{B} = \frac{\left(\left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{R_e} \right) + \left(\left[\frac{k}{k_d} \right]^{1,5} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_d} \right) \right)}{\left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{R_e} \right)}, \quad (19)$$

— при образовании песчано-глинистой пробки на забое скважины:

$$\frac{A_p}{A} = \frac{\ln \frac{R_e}{r_w} + \left[\frac{h}{h_p} - 1 \right] \ln \frac{r_p}{r_w}}{\ln \frac{R_e}{r_w}}, \quad (20)$$

$$\frac{B_p}{B} = \frac{\left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{R_e} \right) + \left(\frac{h^2}{h_p^2} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_p} \right)}{\left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{R_e} \right)}, \quad (21)$$

Для оценки состояния призабойной зоны пласта по результатам ГДИ за рассматриваемый период уравнения (17) и (18) можно представить в следующем виде:

$$\frac{k}{k_d} = \left(\frac{\left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{R_e} \right) \left(\frac{B_d}{B} - 1 \right)}{\left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_d} \right)} + 1 \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (22)$$

$$\frac{r_d}{r_w} = e^{\left(\frac{\frac{A_d}{A} - 1}{\frac{k}{k_d} - 1} \cdot \ln \frac{R_e}{r_w} \right)}, \quad (23)$$

тогда проницаемость загрязненной зоны k_d будет равна:

$$k_d = \frac{k}{\left(\frac{\left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{R_e} \right) \left(\frac{B_d}{B} - 1 \right)}{\left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_d} \right)} + 1 \right)^{\frac{2}{3}}}, \quad (24)$$

радиус загрязненной зоны r_d :

$$r_d = r_w \cdot e^{\left(\frac{\frac{A_d}{A} - 1}{\frac{k}{k_d} - 1} \cdot \ln \frac{R_e}{r_w} \right)}, \quad (25)$$

Оценку высоты песчано-глинистой пробки и радиуса ее влияния можно получить, совместно решая уравнения (19) и (20).

$$\frac{h}{h_p} = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{R_e} \right) \left(\frac{B_p}{B} - 1 \right)}{\left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_p} \right)} + 1} \quad (26)$$

$$\frac{r_p}{r_w} = e^{\left(\frac{\frac{A_p}{A} - 1}{\frac{h}{h_p} - 1} \cdot \ln \frac{R_e}{r_w} \right)} \quad (27)$$

тогда работающая толщина пласта h_p равна:

$$h_p = \frac{h}{\sqrt{\frac{\left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{R_e}\right)\left(\frac{B_p}{B} - 1\right)}{\left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_p}\right)} + 1}} \tag{28}$$

При этом высота песчано-жидкостной пробки будет равна:

$$h_{sp} = h - h_p \tag{29}$$

а радиус составит:

$$r_p = r_w \cdot e^{\left(\frac{\frac{A_p}{A} - 1}{\frac{h}{h_p} - 1} \cdot \ln \frac{R_e}{r_w}\right)} \tag{30}$$

Для апробации полученных расчетных формул по определению параметров призабойной зоны пласта смоделируем синтетическую скважину на ПХГ со следующими исходными параметрами (табл. 1).

Таблица 1. ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ СИНТЕТИЧЕСКОЙ ГАЗОВОЙ СКВАЖИНЫ
Table 1. The parameters of a synthetic gas well operation

Параметр	Ед. изм.	Значение
Эффективная толщина пласта, h	м	10
Коэффициент проницаемости пласта, k	мкм ²	0,6
Коэффициент вихревых сопротивлений, β	1/мкм	27,9
Пластовая температура, T	К	300
Радиус ствола скважины, r_w	м	0,1
Радиус контура дренирования, R_e	м	300
Коэффициент сверхсжимаемости газа, Z	–	0,95
Плотность газа, ρ_0	кг/м ³	0,813
Вязкость газа, μ_0	мПа с	0,041

В таблице 2 представлены смоделированные данные обработки результатов ГДИ синтетической скважины ПХГ.

Таблица 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ГДИ СИНТЕТИЧЕСКОЙ ГАЗОВОЙ СКВАЖИНЫ
Table 2. The results of a synthetic gas well testing

Параметры работы скважины	Единицы измерения	Величины параметров работы скважины		
		Пример №1	Пример №2	Пример №3
Пластовое давление Рпл	МПа	8,4		
Забойное давление Рзаб	МПа	7,8		
Скин-фактор	S_{Ad} –	0,0	2,91	0,0
	S_{Bd} –	0,0	25,9	0,0
	S_{Ap} –	0,0	0,0	8,18
	S_{Bp} –	0,0	0,0	155,98
Коэффициент фильтрационных сопротивлений	A МПа ² /тыс. м ³ /сут	0,0213	0,0290	0,0431
	B МПа ² /тыс. м ³ /сут	0,0000016	0,0000058	0,000027
Дебит газа Q	тыс. м ³ /сут	440,93	314,82	200,32

№1 – гидродинамически совершенная скважина;
№2 – скважина с загрязненной призабойной зоной пласта;
№3 – скважина с песчано-глинистой пробкой на забое.

Для решения численным методом полученных систем нелинейных уравнений (24), (25) и (26), (27) можно воспользоваться методом итераций, представленным в программах MS Excel или Mathcad.

В результате апробации расчетных формул (24) и (25) для случая загрязнения призабойной зоны пласта (пример №2) получили, что при росте линейного коэффициент A в 1,36 раза, а квадратичного коэффициента B в 3,6 раз падение дебита составит 126,1 тыс. м³/сут, при этом параметры измененной зоны пласта будут следующими: радиус загрязнения составит – 0,653 м, а коэффициент проницаемости загрязненной зоны – 0,236 мкм². Расчетные формулы (26) и (27) для определения параметров влияния песчано-глинистой пробки (пример №3) позволяют получить следующие результаты: радиус влияния пробки, который составил 1,25 м, а ее высота – 7,64 м. Следует отметить, что в результате образования песчано-глинистой пробки, падение дебита скважины составило 240,61 тыс. м³/сут, а

изменение коэффициентов фильтрационного сопротивления A и B – в 2 и 16,8 раза, соответственно.

Выводы

Для идентификации параметров призабойной зоны пласта в работе разработаны математические модели оценки значений скин-факторов для коэффициентов A и B , соответственно характеризующих линейные и вихревые фильтрационные сопротивления при нелинейном законе фильтрации газа.

Полученные формулы расчета скин-факторов для случаев наличия загрязнения призабойной зоны пласта или песчано-глинистой пробки дают возможность определить радиус и коэффициент проницаемости загрязненной зоны, а также радиус влияния и высоту песчано-глинистой пробки. Математические модели апробированы на синтетических скважинах подземных хранилищ газа, где смоделированы условия изменения коэффициентов фильтрационных сопротивлений от начальных значений A и B (без скин-факторов) до текущих A_s и B_s (с учетом скин-факторов).

Библиографический список

1. Васильев В. А., Гунькина Т. А., Ливинцев П. Н., Турская О. Ю. К вопросу диагностики скважин подземных хранилищ газа по результатам анализа коэффициентов фильтрационных сопротивлений // Вестник Северо-Кавказского федерального университета, 2015. № 1(46). С. 14-19.
2. Мулявин С. Ф., Колев Ж. М., Мамчистова Е. И., Насырова А. И. Численное моделирование подземного хранения газа в водоносном наклонном пласте // Наука. Инновации. Технологии, 2020. № 4. С. 41–52. DOI 10.37493/2308-4758.2020.4.4.
3. Гасумов Р. А., Гасумов Э. Р. Особенности цифрового фильтрационного моделирования продуктивных залежей (на примере Кошехабльского месторождения) // Наука. Инновации. Технологии, 2021. № 2. С. 7–28. DOI 10.37493/2308-4758.2021.2.1..
4. Подземная гидромеханика / К.С. Басниев, Н.М. Дмитриев, Р.Д. Каневская, В.М. Максимов. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. 448 с.
5. Васильев В. А., Гришин Д. В., Голод Г. С., Епишов А.П.,

- Гунькина Т. А., Машков В.А. Теория и практика газа в условиях разрушения пласта-коллектора. М.: ТПС Принт, 2016. 264 с.
6. Forchheimer, Ph. Wasserbewegung durch Boden // 2 Ver Deutsch. Ing. 45, 1901. 178188.
 7. Алиев З.С., Марков Д.А. Идентификация параметров имеющих скважин при анализе данных в процессе разработки залежи для корректировки проектных показателей // Труды РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина. №4(289), 2017. №4(289). С. 40–55.
 8. Р Газпром 086-2010. Инструкция по комплексным исследованиям газовых и газоконденсатных скважин. М.: Газпром экспо, 2011. Ч. I. 234 с.
 9. Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б. Подземная гидромеханика. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2001. 736 с.
 10. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 628 с.
 11. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. Москва: ОГИЗ, 1947. 244 с.
 12. Fancher G.H. Flow of Simple Fluids Through Porous Materials / G.H. Fancher, J.A. Lewis // Ind. Eng. Chem. 25. 1933 1139-47.
 13. Firoozabadi A. An Analysis of High Velocity Gas Flow Through Porous Media / A. Firoozabadi, D.L. Katz, J. Pet. Tech. 1979. 211-16.
 14. Wong S.W. Effect of liquid saturation on turbulence factors for gas liquid systems. Journ. of Can. Petr. Tech. 1970. 274-278.
 15. Li, D. Literature review on correlation of the non-Darcy coefficient / D. Li, T.W. Engler // SPE. 2001. SPE-70015-MS DOI:10.2118/70015-MS.
 16. Friedel T. Investigation of non-Darcy flow in tight-gas reservoirs with fractured wells // Torsten Friedel, Hans-Dieter Voigt / Elsevier Journal of Petroleum Science and Engineering 54, 2006 P. 112–128.
 17. A. F. van Everdingen and W. Hurst. The Application of the Laplace Transformation to Flow Problems in Reservoirs. Trans. AIME, Vol. 186, 1949. P. 305–24.
 18. Yildiz, T. Assessment of Total Skin Factor in Perforated Wells / T. Yildiz, 2013. SPE–82249 MS DOI: 10.2118/82249-MS.
 19. Erarsian S. Non-Darcy Flow Behavior in Partially Penetrating Gas Wells / S. Erarsian; C. Ayan; W.J. Lee, 1991. SPE-21401-

MS DOI: 10.2118/21401-MS.

20. Gomes E. Analytical Expressions for Pseudoskin for Partially Penetrating Wells Under Various Reservoir Conditions / Edmond Gomes, A.K. Ambastha, 1993. SPE-26484-MS DOI: 10.2118/26484-MS.
21. Saidikowski R. M. Numerical Simulations of The Combined Effects of Wellbore Damage And Partial Penetration / Ronald M. Saidikowski, 1973. SPE-8204-MS DOI: 10.2118/8204-MS.
22. M. F. Hawkins, Jr. A note on the skin effect. Trans. AIME, Vol. 207, 1956. P. 356–357.

References

1. Apropos Diagnostics of Underground Gas Storage Wells Based on The Results of the Analysis of Filtration Resistance Coefficients / V.A. Vasiliev, T. A. Gun'kina, P. N. Livintsev, O.Yu. Turskaya // Bulletin of the North Caucasus Federal University. 2015. № 1(46). P. 14–19.
2. Mulyavin SF, Kolev Zh. M., Mamchistova EI, Nasyrova AI Numerical modeling of underground gas storage in an inclined aquifer. Nauka. Innovation. Technologies, 2020. No. 4. P. 41-52. DOI 10.37493 / 2308-4758.2020.4.4.
3. Gasumov R. A., Gasumov E. R. Features of digital filtration modeling of productive deposits (on the example of the Koshekhabskoye field) // Nauka. Innovation. Technologies, 2021. No. 2. P. 7-28. DOI 10.37493 / 2308-4758.2021.2.1.
4. Underground Fluid Mechanics / K.S. Basniev, N.M. Dmitriev, R.D. Kanevskaya, V.M. Maksimov. M.-Izhevsk: Institute of Computer Research, 2006. 448 p.
5. Theory and Practice of Operation of Underground Gas Storage Facilities under Conditions of Destruction of the Reservoir / V. A. Vasiliev, D. V. Grishin, G. S. Golod, A. P. Epishov, T.A. Gun'kina, V.A. Mashkov. M.: TPS Print, 2016. 264 p.
6. Forchheimer, Ph. Wasserbewegung durch Boden // 2. Ver Deutsch. Ing. 45, 1901. 178188.
7. Aliev Z.S. Identification of Parameters of Existing Wells when Analyzing Data in the Course of Reservoir Development to Adjust Production Plan Parameters / Z.S. Aliev, D.A. Markov // Proceedings of the Russian State University of Oil and Gas (National Research Institute) named after I.M. Gubkin, No. 4 (289), 2017. P. 40–55.
8. R Gazprom 086-2010. Instructions for Integrated Tests of Gas

- and Gas Condensate Wells. Moscow: Gazprom Expo, 2011. Part I. 234 p.
9. Shchelkachev V.N. Underground Hydromechanics / V.N. Shchelkachev, B.B. Lapuk - M-Izhevsk: Institute of Computer Research, 2001. 736 p.
 10. Muskat M. Flow of Homogenous Fluids through Porous Media. M.-Izhevsk: Institute of Computer Research, 2004. 628 p.
 11. Leibenzon L.S. Movement of Natural Liquids and Gases in a Porous Medium / L.S. Leibenzon. M.: OGIZ, 1947. 244 p.
 12. Fancher G.H. Flow of Simple Fluids Through Porous Materials / G.H. Fancher, J.A. Lewis // Ind. Eng. Chem. 25. 1933. 1139-47
 13. Firoozabadi A. An Analysis of High Velocity Gas Flow Through Porous Media / A. Firoozabadi, D.L. Katz, J. Pet. Tech. 1979. 211-16
 14. Wong S.W. Effect of liquid saturation on turbulence factors for gas liquid systems. Journ. of Can. Petr. Tech. 1970. 274-278.
 15. Li, D. Literature review on correlation of the non-Darcy coefficient / D. Li, T.W. Engler // SPE – 2001. SPE-70015-MS DOI:10.2118/70015-MS.
 16. Friedel T. Investigation of non-Darcy flow in tight-gas reservoirs with fractured wells // Torsten Friedel, Hans-Dieter Voigt / Elsevier Journal of Petroleum Science and Engineering 54. 2006 P. 112–128
 17. A. F. van Everdingen and W. Hurst. The Application of the Laplace Transformation to Flow Problems in Reservoirs. Trans. AIME, Vol. 186, 1949. P. 305–324.
 18. Yildiz, T. Assessment of Total Skin Factor in Perforated Wells / T. Yildiz, – 2013. SPE–82249 MS DOI: 10.2118/82249-MS.
 19. Erarsian S. Non-Darcy Flow Behavior in Partially Penetrating Gas Wells / S. Erarsian; C. Ayan; W.J. Lee, 1991. SPE-21401-MS DOI: 10.2118/21401-MS.
 20. Gomes E. Analytical Expressions for Pseudoskin for Partially Penetrating Wells Under Various Reservoir Conditions / Edmond Gomes, A.K. Ambastha. 1993. SPE-26484-MS DOI: 10.2118/26484-MS.
 21. Saidikowski R. M. Numerical Simulations of The Combined Effects of Wellbore Damage and Partial Penetration / Ronald M. Saidikowski. 1973. SPE-8204-MS DOI: 10.2118/8204-MS.
 22. M.F. Hawkins, Jr. A note on the skin effect. Trans. AIME. Vol. 207, 1956. P. 356–57.

Поступило в редакцию 21.09.2021,
принята к публикации 30.11.2021.

Об авторах

Вержбицкий Вячеслав Владимирович старший преподаватель кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Северо-Кавказский Федеральный университет Scopus ID: 57223113471, телефон: 8(905)410-48-58. E-mail: vverzhbitckii@ncfu.ru

Щекин Александр Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Северо-Кавказский Федеральный университет Scopus ID: 24482061700, телефон: 8(962) 017-41-79. E-mail: ashchekin@ncfu.ru

Шестерикова Раиса Егоровна, доктор технических наук, профессор кафедры химической технологии, Северо-Кавказский Федеральный университет Scopus ID: 24482061700, телефон: 8(962) 440-64-08. E-mail: rshesterikova@ncfu.ru

About the authors

Verzhbitsky Vyacheslav Vladimirovich, Senior Lecturer of the Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields, Oil and Gas Institute, North-Caucasus Federal University Scopus ID: 57223113471, tel: 8(905)410-48-58. E-mail: vverzhbitckii@ncfu.ru

Shchekin Alexander Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields, Oil and Gas Institute, North-Caucasus Federal University Scopus ID: 24482061700, tel: 8(962) 017-41-79. E-mail: ashchekin@ncfu.ru

Shesterikova Raisa Egorovna, Doktor of Technical Sciences, professor of Department of Chemical Technology, North-Caucasus Federal University tel: 8(962) 440-64-08 E-mail: rshesterikova@ncfu.ru

25.00.17
УДК 622.276.63

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ
И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Копытов А.Г., ФГБОУ ВО
Левкович С.В., «Тюменский индустриальный университет»,
Левитина Е.Е., Россия
Ковалев И.А.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ СКВАЖИНЫ ДЛЯ ОТЛОЖЕНИЙ С ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫМИ ЗАПАСАМИ

DOI: 10.37493/2308-4758.2021.4.2

Введение.

Перспективы разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами связаны с огромным потенциалом запасов углеводородного сырья сосредоточенными в пластах, приуроченных к отложениям баженовской и тюменской свит. На территории Западно-Сибирской НГП находится 99% запасов трудноизвлекаемой нефти промышленных категорий. Поэтому повышение эффективности разработки таких месторождений несомненно является актуальной задачей. Одним из методов обеспечения стабильных и рентабельных уровней добычи нефти является обработка призабойной зоны пласта кислотными составами для ее очистки и повышения фильтрационных свойств.

Материалы и методы исследований.

В статье приведены результаты оценки эффективности применения кислотных обработок призабойной зоны пласта скважин, эксплуатирующих залежи с трудноизвлекаемыми запасами. Приводятся основные критерии, которым должен отвечать используемый кислотный состав.

Результаты исследований и их обсуждение.

Приводятся результаты проведения кислотных обработок в скважинах, вскрывших отложения баженовских и тюменских свит. Для баженовских отложений в целях восстановления и улучшения проницаемости призабойной зоны пластов сложенных терригенными коллекторами с повышенной карбонатностью рекомендуется проводить кислотную обработку еще на этапе освоения скважины. Для тюменских отложений эффективность обработки призабойной зоны скважины по отдельным месторождениям значительно различается и зависит от используемого метода обработки и концентрации реагентов.

Выводы.

Для отложений баженовской свиты на Салымском месторождении успешность операций составляет 20–30%, что связано и со сложным минералогическим составом пород, и с низкими значениями фильтрационно–емкостных параметров, а также с термобарическими условиями залегания. Для отложений тюменской свиты на Ловинском месторождении эффективность кислотных обработок изменяется в пределах от 30 до 100%, На Русскином месторождении успешность проведения мероприятий оценивается на уровне 95%.

Ключевые слова:

трудноизвлекаемые запасы, баженовская свита, кислотная обработка, призабойная зона скважины.

**Kopytov A.G., Tyumen industrial University,
Levkovich S.V., Russia
Levitina E.E.,
Kovalev I.A.**

Efficiency of Acid Treatment of the Bottom Borehole Zone of the Well for Sediments with Hard-To-Remove Reserves

- Introduction.** Prospects for the development of deposits with hard-to-recover reserves are associated with the huge potential of hydrocarbon reserves concentrated in the formations of the Bazhenov and Tyumen deposits. 99% of all recoverable reserves of hard-to-recover oil of industrial categories are located on the territory of the West Siberian oil and gas complex. Therefore, increasing the efficiency of the development of such fields is undoubtedly an urgent task. One of the methods to ensure stable and profitable levels of oil production is the treatment of the bottomhole zone of wells with acid compositions to clean up and increase the filtration properties of the formation.
- Materials and methods
of research.** The article discusses various methods of acidizing the bottomhole zone of wells operating deposits with hard-to-recover reserves. The main criteria to be met by the acid composition used are given.
- Results and
Discussion.** The results of acid treatments in the wells of the Bazhenov and Tyumen deposits are presented. For the Bazhenov deposits, in order to restore and improve the permeability of the bottomhole zone of formations composed of terrigenous reservoirs with high carbonate content, it is recommended to carry out acidizing at the stage of well development. For the Tyumen deposits, the efficiency of treatment of the bottomhole zone of the well for individual fields differs significantly and depends on the treatment method and the concentration of reagents.
- Conclusion.** For sediments of the Bazhenov formation at the Salym field, the success rate of operations is 20-30%, which is associated with the complex mineralogical composition of the rocks, and with low values of reservoir parameters, as well as temperature and pressure conditions of occurrence. For the deposits of the Tyumen suite at the Lovinskoye field, the effectiveness of acid treatments varies from 30 to 100%, At the Russkinskoye field, the success of the measures is estimated at 95%.
- Key words:** hard-to-recover reserves, Bazhenov formation, acidizing, bottomhole zone of the well.

Введение

В нефтяной промышленности России в настоящее время остро ощущается необходимость эффективного вовлечения в разработку запасов углеводородного сырья из продуктивных пластов, содержащих трудноизвлекаемые запасы (ТРИЗ), к которым относят баженовские, абалакские, хадумские, доманиковские и тюменские отложения. На территории Западно-Сибирской НГП находится 99% запасов трудноизвлекаемой нефти промышленных категорий.

По данным, представленным на кольцевой диаграмме (рис. 1), видно, что в целом по РФ основные запасы трудноизвлекаемой нефти находятся в тюменских и баженовских отложениях, на их долю приходится соответственно 77,5% и 17,8% от всех ТРИЗ рассматриваемых отложений.

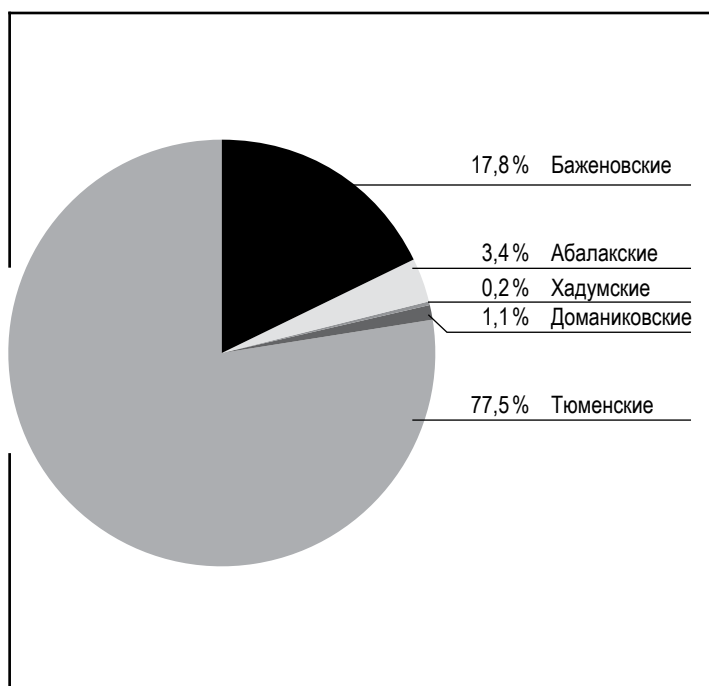


Рис. 1.

Распределение извлекаемых запасов трудноизвлекаемой нефти промышленных категорий A+B1+B2/C2.

Fig. 1. Distribution of recoverable reserves of hard-to-recover oil of industrial categories A+B1+B2/C2.

Для эффективной выработки запасов из низкопроницаемых пластов со сложной геологией, к которым относятся запасы нефти в продуктивных пластах баженовских и тюменских отложений, необходимо обеспечить стабильные (рентабельные) уровни добычи нефти. Достичь этого можно применением с первых месяцев эксплуатации методов, повышающих эффективность разработки таких объектов: начиная от жидкостей глушения используемых при строительстве и ремонте скважин и заканчивая воздействием на пласты и призабойную зону кислотными составами, проведением гидравлического разрыва пласта, термохимического воздействия и т.д.

Материалы и методы исследований

Технология вскрытия пластов и освоения скважин в условиях отложений с ТРИЗ оказывает весьма существенное влияние на эффективность последующей их разработки. Для данных отложений характерны высокие пластовые температуры от 80 до 134°C; зоны аномально высоких пластовых давлений до 40 МПа, при глубине залегания порядка 2 500 м; низкая проницаемость пород (в среднем до 1 мД). При наличии аномально высоких пластовых давлений при вскрытии баженовских отложений используются утяжеленные буровые растворы, что приводит к загрязнению призабойной зоны пласта и существенному снижению продуктивности скважины.

Кислотный раствор, применяемый для очистки забоя скважин, эксплуатирующих залежи с трудноизвлекаемыми запасами должен обладать следующими особенностями:

1. Не давать осадков фторидов кальция (CaF_2), что особенно важно в условиях рассматриваемых коллекторов;
2. Удерживать значительное количество трехвалентного железа в своем составе, предотвращая выпадение гидроокиси железа в поровом пространстве коллектора;
3. Медленно реагировать с породообразующими минералами при высоких температурах, что позволит воздействовать на удаленные зоны пласта;

4. Обладать низким межфазным натяжением на границе «кислотный состав – нефть (керосин)»;
5. Обладать низкой коррозионной активностью при высоких температурах ($> 95^{\circ}\text{C}$).

Традиционные глинокислотная (ГКО) и солянокислотная (СКО) обработки в большинстве случаев, как показала практика, не удовлетворяют этим требованиям и, как следствие, не могут рекомендоваться для обработки скважин в период их освоения.

Из-за высокого содержания карбонатов применение стандартных глинокислотных обработок приводит к снижению проницаемости пласта. Отмечается негативное влияние кислотных составов, содержащих HF, на проницаемость терригенных кернов с минимальным содержанием карбонатов ($< 10\%$) [1]. В то же время применение индивидуального 6% раствора соляной кислоты привело к значительному восстановлению проницаемости кернов (в среднем на 111,3%). В работе В.Н. Глущенко и М.А. Силина [2] обобщен большой опыт применения кислотных обработок. Указано, что большое количество специалистов в этой области считают более эффективным при кислотных обработках использовать индивидуальный раствор HCl с приданием ему высокой проникающей способности по простиранию пласта и последующему незатруднённому выносу продуктов реакции. В качестве основного компонента кислотного состава необходимо использовать соляную кислоту, позволяющую воздействовать как на карбонатную, так и на глинистую составляющую пород содержащих ТРИЗ, в отличие от органических кислот, которые взаимодействуют только с карбонатами.

Результаты исследований и их обсуждение

Составы, обеспечивающие отсутствие осадков в процессе растворения породы характеризуются менее активным растворением глинистых минералов и, соответственно, выделением в свободном виде ионов Al^{3+} . В литературных источниках [2, 3] говорится об увеличении растворимости глиносодержащих образцов при добавке к соляной кислоте небольшого количества щаве-

левой или лимонной кислот. Учитывая данный факт и полученные результаты [4] можно сделать вывод, что наличие органической кислоты в смеси с минеральной ускоряет не только растворение глин, но и процессы осадкообразования при взаимодействии с ними. Поэтому при выборе тех или иных составляющих для кислотного состава необходимо проведение лабораторных экспериментов, направленных на оценку процессов осадкообразования после взаимодействия исследуемых растворов с минералами продуктивного пласта.

Помимо отсутствия осадков с алюмосиликатами, кислоты должны обладать пролонгированным действием при реакции с карбонатной составляющей пород при пластовой температуре [5].

Такой подход был использован на Средне-Назымском месторождении. На скважине № 3006 в 2012 г. была проведена кислотная обработка с добавлением 5% массы индивидуального состава. В результате такой обработки был получен дополнительный прирост дебита в размере 4,95 т/сут. В 2014 г. на этой же скважине после проведения кислотной обработки с добавлением 10% индивидуального состава прирост дебита составил 8,09 т/сут, что в 1,63 раза превышает предыдущий показатель [6].

В целях восстановления и улучшения проницаемости призабойной зоны пластов сложенных терригенными коллекторами с повышенной карбонатностью рекомендуется проводить кислотную обработку на этапе освоения скважины.

Таблица 1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ КИСЛОТНЫХ ОБРАБОТОК
В СКВАЖИНАХ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ
НА САЛЫМСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ
Table 1. The effectiveness of acid treatments in the wells of the Bazhenov
formation at the Salym field

Показатели	Ед. изм.	СКО	ГКО
Количество скважинно-операций	шт.	24	14
Успешность	%	33,3	21,4

Эффективность ОПЗ в скважинах, вскрывших отложения тюменской свиты существенно различается по месторождениям. Например, прирост дебитов нефти после ОПЗ пластов по месторождениям Лазаревскому, Мансингьянскому, Сыморьяхскому, Ловинскому изменяется от 2,2 до 3,8 т/сут. Дополнительная добыча нефти после ОПЗ находится на уровне – 490–570 т/скв.-опер. При этом успешность проведения обработок составляет 68%. Такой процент успешности связан с отсутствием учета, на некоторых скважин особенностей геологического строения и термобарических условий, характерных для пластов тюменской свиты.

Рассмотрим более подробно результаты проведения кислотных обработок на Ловинском месторождении. Информация для анализа классифицировалась по типам обработок, скважины располагались по убыванию полученного эффекта.

Для проведения анализа были использованы результаты 180 ОПЗ в добывающих скважинах. Помимо обычной соляно-кислотной (СКО) и соляно-кислотной обработки с добавлением гидрофобизатора (СКО + ИВВ1), широко использовались следующие методы:

- глинокислотная обработка (ГКО);
- глинокислотная с добавлением гидрофобизатора (ГКО + ИВВ1);
- глинокислотная с добавлением катионоактивных и неионогенных поверхностно-активных веществ (ГКО + ПАВ).
- соляно-кислотная и глинокислотная обработки с добавлением в состав уксусной кислоты и катионоактивных и неионогенных ПАВ (условно обозначены в таблице «Уксусная кислота»).

Для сравнения рассмотрим результаты проведения кислотных обработок на Русскинском месторождении. В добывающих скважинах объекта ЮС (продуктивные отложения тюменской свиты) в период эксплуатации для восстановления продуктивности скважин проведено 21 воздействие на ПЗП, из них кислотные обработки – 17 скважинно-операций (табл. 3).

Таблица 2. РЕЗУЛЬТАТЫ КИСЛОТНЫХ ОБРАБОТОК НА ЛОВИНСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

Table 2. Results of acid treatments at the Lovinskoye field

Число скважин	Вид обработки	Использование концентрированных реагентов, %	Средний прирост дебита нефти, т/сут	Дополнительная добыча нефти, т/сут	Эффективность, %	Наиболее эффективный объем закачки, м ³	Примечания
6	СКО	HCl 6-15	3,0	1850	33,3	7-12	Более эффективны при содержании HCl 6-12 %
54	ГКО	HCl 6-15 HF 0,7-7,6	2,06	788	46,3	6-14	Более эффективны при HCl 12-15%, HF 1,4-3,0%. Эффект снижается при HCl 6-10%, HF 0,7-1,4%; при HF более 3,0% прирост дебита не более 1 т/сут
10	СКО + ИВВ1	HCl 7,5-15 ИВВ1 0,2-2	2,8	1091	30,0	8-14	Концентрация HCl практически не влияет на эффект. При содержании ИВВ1 0,2-1,0% прирост дебита нефти выше (до 4,18 т/сут), при 1,1-2,0% – не более 1 т/сут
78	ГКО + ИВВ1	HCl 6-24 HF 0,2-3,1 ИВВ1 0,1-1,7	1,7	767	32,1	9-15	Более эффективны при HCl 11-15%, HF 1,3-2,6%. При HCl 24% прирост дебитов 0-0,8 т/сут. ИВВ1 не влияет на эффективность работ
23	ГКО + ПАВ	HCl 6-24 HF 0,6-3,8 ПАВ 0,2-1,3	2,0	806	43,5	11-20	Более эффективны, при HCl 9-12% HF 1,3-3,8%. При HCl 24% – неэффективны. Оптимальное содержание ПАВ 0,5-13%
4	СКО+ ПАВ + укс. к-та	HCl 8-12 ПАВ 2 укс. к-та 2-3	3,8	621	75	4-9	Оптимальные концентрации HCl 8-12% HF 2,7-3,0% Концентрации уксусной кислоты требуют уточнений
5	ГКО + ПАВ + укс. к-та	HCl 8-12 HF 2,7-4,0 ПАВ 0-1,9 укс. к-та 2-3	3,4	537	100	4-9	-

Средний объем закачки химических реагентов при воздействии на ПЗП варьировался в пределах от 6 м³ до 25 м³ (глинокислотные ОПЗ с добавкой ПАВ+ОПЗ СНПХ) составляя в среднем 10,8 м³. Средний дебит скважин по жидкости (нефти) после проведения ОПЗ физико-химическими методами увеличился с 10,6 (5.3) т/сут до 19,6 (8,5) т/сут, при увеличении обводненности с 50,1 % до 56,9 %.

Наиболее высокой удельной эффективностью 3071,9 т/скв.-опер, характеризуются глинокислотные ОПЗ с добавкой ПАВ+ОПЗ СНПХ (2 скважинно-операции), при среднем приросте дебита нефти 7,7 т/сут и средней продолжительности эффекта 399 суток. Текущая удельная эффективность других воздействий на ПЗП химическими реагентами изменяется от 20,7 т/скв.-опер, (глинокислотные ОПЗ) до 2037 т/скв.-опер. (солянокислотные+ПАВ ОПЗ), при среднем значении 699.2 т/скв.-опер.

Выводы

Для отложений баженовской свиты на Салымском месторождении успешность операций составляет 20-30%, что связано со сложным минералогическим составом пород, термобарическими условиями и низкими значениями фильтрационно-емкостных параметров. Совокупность этих факторов требует разработки специальных индивидуальных кислотных составов и их дальнейших лабораторных и промысловых исследований для повышения эффективности кислотных обработок.

По отложениям тюменской свиты на Ловинском месторождении эффективность кислотных обработок изменяется в пределах от 30 до 100%, наиболее успешными были СКО и ГКО с добавкой уксусной кислоты и ПАВ. Средний прирост дебита нефти составил 2,46 т/сут. На Русскинском месторождении в результате проведения кислотных обработок призабойной зоны пластов кратность увеличения дебита нефти составила 1,7, при среднем приросте дебита нефти 2,8 т/сут и средней продолжительности эффекта 243 суток. Успешность проведения мероприятий оценивается на уровне 95%. Таким образом, применение соляно- и глинокислотных обработок (СКО, ГКО), кислотных обработок с добавлением ПАВ (СКО+ПАВ, ГКО+ПАВ), спиртоглинокислотных+ПАВ (СГКО+ПАВ) обеспечивает повышение эффективности проведения ОПЗ.

Таблица 3. РЕЗУЛЬТАТЫ КИСЛОТНЫХ ОБРАБОТОК НА РУССКИНСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

№ п/п	Технология	Кол-во скв.-опер., ед.	Средний объем закачки, м³	
1	Глинокислотные ОПЗ (ГКО)	1	1	
2	Глинокислотные + ПАВ ОПЗ	2	2	
3	Глинокислотные ОПЗ с добавкой ПАВ + ОПЗ СНПХ	2	2	
4	Солянокислотные ОПЗ (СКО)	2	2	
5	Солянокислотные + НАВ ОПЗ	1	1	
6	Комбинированное физико-химическое и депрессивное воздействие	1	1	
7	Кислотный состав СНПХ	3	3	
8	Кислотный состав СНПХ + СГКО + ПАВ	1	1	
9	Солянокислотные ОПЗ с добавкой ПАВ + ОПЗ СНПХ	1	1	
10	Кислотный состав КС-3	1	1	
11	ОПЗ растворителем + ПАВ	1	1	
12	Спиртоглинокислотные + ПАВ ОПЗ (СГКО + ПАВ)	3	3	
13	Дострел	1	1	
14	Повторная перфорация + ОПЗ химическими реагентами + ТГХВ	1	1	
Средние значения				
Суммарные значения		21		

Библиографический список

1. Бабаян Э.В., Шурыгин М.Н., Яковенко В.Н. Повышение эффективности выбора рабочего агента для обработки призабойной зоны пласта // Нефтяное хозяйство. 1999. №3. С. 30-32.
2. Глущенко В.Н., Силин М.А. Нефтепромысловая химия: Изд. в 5-ти томах. Т. 4. Кислотная обработка скважин / под ред. проф. И.Т. Мищенко. М.: Интерконтакт Наука. 2010. С. 703.

Table 3. Results of acid treatments at the Russkinskoye field

	Средние показатели эффективности										Удельная эффективность, т/с кв.-опер.	Доп. добыча нефти, т	Успешность, %
	до воздействия			после воздействия			кратность изменения дебита нефти	Средние показатели эффективности	прирост дебита нефти, т/сут	продолжительность эффека, сут			
	дебит нефти, т/сут	дебит жидкости, т/сут	обводненность, %	дебит нефти, т/сут	дебит жидкости, т/сут	обводненность, %							
	6,0	8,2	13,0	372	10,0	15,7	36,4	1,2	0,3	65	20,7	20,7	100
	9,0	9,4	15,0	373	10,8	17,4	37,9	1,1	0,4	389	139,6	279,2	100
	25,0	2,2	5,2	57,7	15,1	31,3	51,8	6,9	7,7	399	3071,9	6143,9	100
	8,0	Б/д			2,1	32	34,4		0,3	267	88,7	177,3	50
	6,0	17,8	25,4	29,9	27,3	35,0	22,0	1,5	5,9	344	2037,0	2037,0	100
	9,0	10,1	20,6	51,0	14,5	31,0	53,2	1,4	0,9	148	129,3	129,3	100
	11,0	1,0	4,3	76,7	4,8	16,7	71,3	4,8	2 4	189	446,3	1339,0	100
	23,0	7,6	8,9	14,6	11,3	13,4	15,7	1,5	4,3	261	1133,9	1133,9	100
	18,0	0,4	11,7	966	3,9	17,7	78,0	9,8	0,9	412	380,2	380,2	100
	6,0	Б/д с 2 2009г			32	34,4	90,7		2,9	103	294,0	2940	100
	10,0	2,7	10,4	74,0	4,5	16,9	73,4	1,7	0,9	6)	55,3	553	100
	7,3	2,3	8,9	742	5,2	182	71,4	2,3	2,3	186	431,7	1295,0	100
		1,4	5,1	72,5	6,6	21,4	69,2	4,7	2,6	48	125,5	125,5	100
	10,0	2,1	5,4	61,1	7,4	14,1	47,5	3,5	1,7	417	727,5	727,5	100
	10,8	4,9	10,0	51,3	8,3	19,4	57,2	1,7	2,8	243	673,2		95
											14137,7		

3. Качмар Ю.Д., Касянчук В.Г., Лисовская Г.Ф., Сидоровский В.А. Опыт применения различных методов обработки призабойной зоны скважин. М.: ВНИИОЭНГ. 1972. С. 93.

4. Литвин В. Т. Подбор кислотного состава для низкопроницаемых высокоглинистых пластов баженовской свиты (часть 1) / В.Т. Литвин, А.Р. Фарманзаде, М. С. Орлов // Интернет-журнал Науковедение. 2015. Т. 7. № 5(30). С. 136. DOI 10.15862/214TVN515.

5. Силин М.А., Магадова Л.А., Цыганков В.А., Мухин М.М., Давлетшина Л.Ф. Кислотные обработки пластов и методики испытания кислотных составов: Учеб. пособие для студентов вузов. М.: РГУ нефти и газа им. И. Губкина. 2011. 120 с.
6. Литвин В. Т. Теоретические аспекты и опыт проведения работ по интенсификации притока нефти на коллекторах баженовской свиты / В.Т. Литвин, А.А. Рязанов, А.Р. Фарманзаде // Нефтепромысловое дело. 2015. № 5. С. 24-29.
7. Забоева М.И. Результаты опытно-промышленной разработки баженовской свиты на Западно-Сахалинском месторождении / М. И. Забоева, Е. Е. Левитина // Академический журнал Западной Сибири. 2014. Т. 10. № 2(51). С. 34-35.
8. Копытов А.Г. Перспективы разработки битуминозных отложений Западной Сибири внутрипластовым горением, вероятные технические и технологические сложности его реализации и способы их решения / А.Г. Копытов, В. Р. Узбеков // Наука и ТЭК. 2012. № 2. С. 28-31.
9. Гасумов, Р. А. Выделение и оценка фильтрационно-емкостных параметров глинистых коллекторов / Р.А. Гасумов // Наука. Инновации. Технологии. 2018. № 2. С. 115-126.
10. Taylor K.C. Laboratory Evaluation of Iron-Control Chemicals for High-Temperature Sour-Gas Wells [Электронный ресурс] / K.C. Taylor, H.A. Nasr-El-Din, J.A. Saleem // SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. 2001. Режим доступа: DOI: 10.2118/65010-MS
11. Assem A.I. Formation Damage Due To Iron Precipitation In Carbonate Rocks [Электронный ресурс] / A.I. Assem, H.A. Nasr-El-Din, C.A. De Wolf // SPE European Formation Damage Conference & Exhibition. 2013. Режим доступа: DOI: 10.2118/165203-MS.
12. Investigations of temperature and dilution effect on rheological properties of waxy crude oil / I. A. Struchkov, V. A. Ol'hovskaya, P. V. Roschin [et al.] // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2020. Vol. 10. No 2. P. 755-767. DOI 10.1007/s13202-019-00779-2.

References

1. Babayan E.V., Shurygin M.N., Yakovenko V.N. Increasing the efficiency of choosing a working agent for treating the bottom-hole formation zone // Oil industry. 1999. No. 3. P. 30-32.
2. Glushchenko V.N., Silin M.A. Oilfield chemistry: Ed. in 5 vol-

- umes. T.4. Acid treatment of wells / Ed. prof. I.T. Mishchenko. M.: Interkontakt Science. 2010. P. 703.
3. Kachmar Y.D., Kasyanchuk V.G., Lisovskaya G.F., Sidorovsky V.A. Experience in the use of various methods of treatment of the bottomhole zone of wells. M.: VNIIOENG. 1972. P. 93.
 4. Litvin V.T. Selection of acid composition for low-permeability high-clay formations of the Bazhenov formation (part 1) / V.T. Litvin, A. R. Farmanzade, M.S. Orlov // Internet journal of Science. 2015. T. 7. No. 5 (30). P. 136. DOI 10.15862 / 214TVN515.
 5. Silin M.A., Magadova L.A., Tsygankov V.A., Mukhin M.M., Davletshina L.F. Acid treatment of seams and test methods for acid compositions: Textbook. manual for university students. Moscow: Russian State University of Oil and Gas named after I.M. Gubkin. 2011. 120 p.
 6. Litvin V.T. Theoretical aspects and experience of work on intensification of oil inflow on the reservoirs of the Bazhenov formation / V.T. Litvin, A.A. Ryazanov, A.R. Farmanzade // Oil-field business. 2015. No. 5. P. 24-29.
 7. Zaboieva M.I. Results of pilot development of the Bazhenov formation at the Zapadno-Sakhalinskoye field / M.I. Zaboieva, E.E. Levitina // Academic journal of Western Siberia. 2014. T. 10. No. 2 (51). P. 34-35.
 8. Kopytov A. G. Prospects for the development of bituminous deposits in Western Siberia by in-situ combustion, probable technical and technological difficulties of its implementation and methods of their solution / A.G. Kopytov, V.R. Uzbekov // Science and Fuel and Energy Complex. 2012. No. 2. P. 28-31.
 9. Gasumov, R. A. Isolation and evaluation of filtration-capacitance parameters of clay reservoirs / R. A. Gasumov // Nauka. Innovation. Technologies. 2018. No. 2. P. 115-126.
 10. Taylor K.C. Laboratory Evaluation of Iron-Control Chemicals for High-Temperature Sour-Gas Wells [Electronic resource] / K.C. Taylor, H.A. Nasr-El-Din, J.A. Saleem // SPE International Symposium on Oilfield Chemistry. 2001. Access mode: DOI: 10.2118 / 65010-MS.
 11. Assem A.I. Formation Damage Due To Iron Precipitation In Carbonate Rocks [Electronic resource] / A.I. Assem, H.A. Nasr-El-Din, C.A. De Wolf // SPE European Formation Damage Conference & Exhibition. 2013. Access mode: DOI: 10.2118 / 165203-MS.

12. Investigations of temperature and dilution effect on rheological properties of waxy crude oil / I.A. Struchkov, V.A. Ol'hovskaya, P.V. Roschin [et al.] // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2020. Vol. 10. No 2. P. 755-767. DOI 10.1007 / s13202-019-00779-2.

Поступило в редакцию 12.10.2021, принята к публикации 10.12.2021.

Об авторах

- Копытов** Андрей Григорьевич, к.т.н. доцент кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» Тюменского индустриального университета, тел. 89129240373, E-mail: kopytovag@tyuiu.ru
- Левкович** Сергей Владимирович, к.т.н. доцент кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» Тюменского индустриального университета, тел. 89223952222, E-mail: levkovichsv@tyuiu.ru
- Левитина** Екатерина Евгеньевна, к.т.н. доцент кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» Тюменского индустриального университета, тел. 89044934964, E-mail: levitinaee@tyuiu.ru
- Ковалев** Игорь Александрович, ассистент кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» Тюменского индустриального университета, тел. 89220092750, E-mail: kovalevia@tyuiu.ru

About the authors

- Kopytov** Andrey, Ph. D., associate Professor of the Department "Development and operation of oil and gas fields" of Tyumen industrial University, tel. 89129240373. E-mail: kopytovag@tyuiu.ru
- Levkovich** Sergey, Ph. D., associate Professor of the Department "Development and operation of oil and gas fields" of Tyumen industrial University, tel. 89223952222.
E-mail: levkovichsv@tyuiu.ru
- Levitina** Ekaterina, Ph. D., associate Professor of the Department "Development and operation of oil and gas fields" of Tyumen industrial University, tel. 89044934964.
E-mail: levitinaee@tyuiu.ru
- Kovalev** Igor, assistant of the Department "Development and operation of oil and gas fields" of Tyumen industrial University, tel. 89220092750. E-mail: kovalevia@tyuiu.ru

25.00.23
УДК 574.9

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ,
ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

Губанов Р.С.,
Лиховид А.А.

Северо-Кавказский федеральный университет,
г. Ставрополь,
Россия

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИБРЕЖНОГО ФАУНИСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА (TETRAPODA) СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ЕГОРЛЫК

DOI: 10.37493/2308-4758.2021.4.3

Введение.

За последние 70 лет произошла коренная перестройка ландшафтов региона, затронувшая и водные системы. Данное исследование является попыткой провести ретроспективный анализ трансформации фаунистического комплекса территории.

Материалы и методы
исследования.

Для оценки состояния фаунистического комплекса были использованы материалы, содержащиеся в ряде работ, посвященных фаунистическому комплексу реки Егорлык. Помимо литературных данных, использованы материалы, собранные в 2015–2020 гг. Учет животного населения производился по методикам, обобщенным в «Полевых исследованиях по экологии наземных позвоночных» Г.А. Новикова. Учет амфибий проводился методом визуального обследования территории. Видовая принадлежность устанавливалась дистанционно. Выявление видового состава рептилий и изучение состояния их популяций проводилось при обследовании наземных биотопов. Выявление видового состава птиц и изучение состояния их популяций проводилось методами маршрутных учетов. Общая протяженность пеших маршрутов составила около 140 км. Названия видов птиц приведены в соответствии со сводкой Л.С. Степаняна. Учет грызунов проводился ловушко-линиями. Учет насекомых проводился методом ловчих канавок. Оценка состояния крупных млекопитающих проводилась по литературным данным, а также визуальным наблюдениям. Всего было проведено 10 маршрутов по изучению фауны птиц, млекопитающих, амфибий и рептилий. Общая протяженность маршрутов составила 130 км. Сообщество наземных позвоночных представлено 1 видом амфибий, 2 видами рептилий, 16 видами птиц, 2 видами млекопитающих.

Результаты и их
обсуждения.

В данном исследовании развитие экосистемы реки Егорлык с 1948 г. по настоящее время мы разделим на три этапа формирования. К первому этапу будет отнесен период естественного состояния территории и фаунистического комплекса до обводнения (до 1948 г.). Второй этап начинается с момента обводнения – с 1950 по 2000 год. К третьему этапу будет отнесен современный период, с 2000 года по настоящее время.

- Выводы:** опираясь на фондовые данные, установлено видовое разнообразие животного населения до обводнения реки, характерное для маловодных степных водных систем, с горько-соленой водой, пересыхающей в летний период. После обводнения происходит активное смена стенобионтных видов эврибионтными. В этот период наиболее отмечено наибольшее видовое разнообразие. Обводнение реки является процессом первичной сукцессии, а его заселение различными видами – это сукцессионная серия. В настоящее время, установлено формирование климаксового сообщества, обусловленного стабильным наличием местообитаний, а также урегулированию количества видов, численности и плотности животного населения.
- Ключевые слова:** животное население, гидрологический режим, местообитание, экосистема.

Gubanov R.S., North Caucasus Federal University, Stavropol,
Likhovid A.A. Russia

Transformation of Coastal Faunal Complex (Tetrapoda) of the Lysy Liman Lake in the Operation of Hydraulic Structures in the Middle Course

- Introduction.** Over the past 70 years, there has been a radical restructuring of the landscapes of the region, affecting water systems as well. This study is an attempt to conduct a retrospective analysis of the transformation of the faunal complex of the territory.
- Materials and methods of research.** To assess the state of the faunal complex, the materials contained in a number of works devoted to the faunal complex of the Egorlyk River were used. In addition to the literature data, materials collected in 2015-2020 were used. The accounting of the animal population was carried out according to the methods summarized in the "Field studies on the ecology of terrestrial vertebrates" by G.A. Novikov. Amphibians were accounted for by visual inspection of the territory. The species identity was established remotely. The identification of the species composition of reptiles and the study of the state of their populations was carried out during the survey of terrestrial biotopes. Identification of the species composition of birds and the study of the state of their populations was carried out by route accounting methods. The total length of the hiking routes was about 140 km. The names of bird species are given in accordance with the summary of L.S. Stepanyan. Rodent accounting was carried out by trap lines. The accounting of insectivores was carried out by the method of hunting grooves. The assessment of the condition of large mammals was carried out according to literature data, as well as visual observations. In total, 10 routes were conducted to study the fauna of birds, mammals, amphibians and reptiles. The total length of the routes was 130 km. The community of ter-

- restrial vertebrates is represented by 1 species of amphibians, 2 species of reptiles, 16 species of birds, 2 species of mammals.
- The results and their discussions. In this study, the development of the ecosystem of the Egorlyk River from 1948 to the present, we will divide into three stages of formation. The first stage will include the period of the natural state of the territory and the faunal complex before flooding (until 1948). The second stage begins from the moment of flooding – from 1950 to 2000. The third stage will include the modern period, from 2000 to the present.
- Conclusions: Based on stock data, the species diversity of the animal population before the flooding of the river, characteristic of low-water steppe water systems, with bitter-salty water drying up in summer, has been established. After watering, the stenobiont species are actively replaced by eurybiont species. During this period, the greatest species diversity was most noted. River flooding is a process of primary succession, and its settlement by various species is a succession series. Currently, the formation of a climax community has been established, due to the stable availability of habitats, as well as the regulation of the number of species, the number and density of the animal population.
- Key words: animal population, hydrological regime, habitat, ecosystem.

Введение

За последние 70 лет произошла коренная перестройка ландшафтов региона, затронувшая и водные системы. Это исследование является попыткой провести ретроспективный анализ трансформации фаунистического комплекса территории. Подача воды из реки Кубань в реку Егорлык по Невинномысскому каналу в 1948 году привела к тому, что река из мелководной, пересыхающей каждый год на 3–4 месяца превратилась в многоводный поток с изменившимся водным режимом и активным переформированием русла [5]. Для значительной части реки характерны боковая и глубинная эрозия. На отдельных участках глубинная эрозия достигала 2,5 – 3,0 м. Боковая эрозия колеблется от 10 до 80 метров, наиболее интенсивной эрозии подвержены вогнутые берега в крупных излучинах. Отмечается постепенное увеличение количества наносов, которые скапливаются преимущественно на отдельных небольших участках, образуя отмели и косы [9]. Стабильный уровень реки способствует постепенному заиливанию берегов, со временем в руслах и на береговых склонах происходит активный рост прибрежной тростниковой, которая способствует увеличению мест обитания и соответственно изменению структуры животного населения.

Целью данного исследования является анализ трансформации прибрежного фаунистического комплекса реки Егорлык, в ее среднем течении после обводнения реки путем строительства обводнительного канала.

Материалы и методы исследования

Для оценки состояния фаунистического комплекса были использованы материалы, содержащиеся в ряде работ, посвященных фаунистическому комплексу реки Егорлык: В.П. Белик (1998), М.Ф. Тертышников (1992, 1995), А.Н. Хохлов (1994, 2000), А.А. Лиховид (1998), М.П. Ильюх (2003), О.Н. Рязанова (2018), Л.В. Маловичко (2012), Е.Г. Мишвелов (2018) и др. [10, 11, 12, 13, 14].

Помимо литературных данных, использованы материалы, собранные в 2015–2020 гг. Полевые исследования проводились на территории среднего течения реки, после Новотроицкого водохранилища. Во время проведения полевых исследований фаунистическое разнообразие изучалось путем количественного учета животных, принималась во внимание связь животных с определенными элементами среды обитания и ландшафтными условиями. Среды обитания и ключевые участки наблюдений привязывались к предыдущим исследованиям для лучшего сопоставления полученных данных. Было выделено два ключевых участка (рис. 1) с различным уровнем антропогенного воздействия. Ключевой участок, расположенный близ устья реки Большая Кугульта, площадью 192 га и ключевой участок в среднем течении реки, расположенный между селами Красногвардейское и Преградное, площадью 348 га. Учет животного населения производился по методикам, обобщенным в «Полевых исследованиях по экологии наземных позвоночных» Г.А. Новикова [6].

Учет амфибий проводился методом визуального обследования территории (по берегам рек, прудов, в отрицательных формах микрорельефа и т.п.). Видовая принадлежность устанавливалась дистанционно [27].

Наряду с изучением видового состава и численности отдельных видов амфибий проводились исследования по выявлению спектра их местообитаний [28].

Выявление видового состава рептилий и изучение состояния их популяций проводилось при обследовании наземных биотопов. Рептилии учитывались на маршрутных учетах при визуальном обследовании территории (по берегам рек, прудов, на склонах различной экспозиции, в определенных биотопах и т.п.) [21].

Видовая принадлежность змей устанавливалась дистанционно [22].

Наряду с изучением видового состава и численности отдельных видов рептилий проводились исследования по выявлению спектра их местообитаний [26].

Выявление видового состава птиц и изучение состояния их популяций проводилось методами маршрутных учетов [15].

Общая протяженность пеших маршрутов составила около 140 км. Для некоторых видов рассчитывались показатели численности и плотности в различных биотопах. Кроме того, для оценки численности крупных видов птиц, в том числе для дневных хищных и водоплавающих применялись учеты из автомобиля. Названия видов птиц приведены в соответствии со сводкой Л.С. Степаняна [10, 15].

Учет грызунов проводился ловушко-линиями. Учет насекомых проводился методом ловчих канавок.

Оценка состояния крупных млекопитающих проводилась по литературным данным, а так же визуальным наблюдениям.

Всего было проведено 10 маршрутов по изучению фауны птиц, млекопитающих, амфибий и рептилий. Общая протяженность маршрутов составила 130 км [6].

Долина Егорлыка сложена делювиально-аллювиальными отложениями, с преобладанием злаковых и полынно-злаковых растительных сообществ на аллювиальных почвах, которые частично распаханы [40]. Особое внимание в данном исследовании уделено активному зарастанию берегов реки тростниковой растительностью в последнее десятилетие. Русло реки Егорлык извилистое, образует целый ряд заторов и лиманов, иногда разветвляется на рукава, стабильный уровень реки способствует постепенному заиливанию берегов, со временем в руслах и на береговых склонах формируются растительные ассоциации. Береговое зарастание фор-

мирует новые места обитания, такие изменения приводят к быстрому и значительному преобразованию фаунистического комплекса. Сообщество наземных позвоночных представлено 1 видом амфибий, 2 видами рептилий, 16 видами птиц, 2 видами млекопитающих [37].

Результаты и обсуждение

В данном исследовании развитие экосистемы реки Егорлык с 1948 г. по настоящее время мы разделим на три этапа формирования.

К **первому этапу** будет отнесен период естественного состояния территории и фаунистического комплекса до обводнения (до 1948 г.). Точные количественные данные о животном населении отсутствуют, однако имеющиеся данные позволяют воспроизвести фаунистический состав с периода 1930-х гг. XX века. Итак, до 1948 г. пропускная способность реки составляла всего 5 м³/сек, а средняя скорость течения реки составляла не более 3,5 км/час. Вода в среднем течении реки была горько-соленой и мутной, в связи с этим, прибрежная водная растительность отсутствовала, за исключением верхних течений реки, где воды были преснее. В хозяйственных целях в долине реки сооружались запруды и небольшие каналы, использовавшиеся для орошения. Таким образом, река превращалась в цепь прудов, пересыхающих в летний период. Заболоченные участки запруд и небольших каналов зарастали надводной растительностью. Эти процессы сокращали рыбные запасы. Сокращались популяции таких животных, как кавказская выдра (*Lutra lutra meridionalis*) и кавказская европейская норка (*Mustela lutreola turovi*), местообитания которых были приурочены к быстротекущим рекам [7].

Территория поймы реки Егорлык всегда была представлена интрозональным биотопом. Состав фаунистического комплекса был представлен 1 видом амфибий – озёрная лягушка (*Rana ridibunda*), 3 видами рептилий – обыкновенный уж (*Natrix natrix*), водяной уж (*Natrix tessellata*), прыткая ящерица (*Lacerta agilis*), по-

лосатая ящерица (*Lacerta strigata*), 17 видами птиц: трясогузка белая (*Motacilla alba*), большая белая цапля (*Egretta alba alba*), серая цапля (*Ardea cinerea*), каравайка (*Plegadis falcinellus*) камышница (*Gallinula chloropus*), лысуха (*Fulica atra*), большая поганка (*Podiceps cristatus*), сизая чайка (*Larus canus*), черноголовая чайка (*Ichthyophaga melanocephalus*), малая крачка (*Sterna albifrons albifrons*) малый зуек (*Charadrius dubius curonicus*), чибис (*Vanellus vanellus*), ходулочник (*Himantopus himantopus himantopus*), шилоклювка (*Recurvirostra avosetta*), пеганка (*Tadorna tadorna*), кряква (*Anas platyrhynchos platyrhynchos*), береговая ласточка (*Riparia riparia riparia*), каменка-плешанка (*Oenanthe pleschanka pleschanka*), каменка-плясунья (*Oenanthe isabellina*) 3 видами млекопитающих – мышь полевая (*Apodemus agrarius*), водяная полевка (*Arvicola amphibius*), ласка (*Mustela nivalis*) [2–4, 31, 32, 33].

Второй этап начинается с момента обводнения – с 1950 по 2000 год. Это период ввода в эксплуатацию Невинномысского канала, строительство которого обеспечило подачу воды из реки Кубань в реку Егорлык. Переброска кубанской воды в бассейн реки Егорлык привела к тому, что река из мелководной, пересыхающей каждый год на 3–4 месяца превратилась в многоводный поток с изменившимся водным режимом и активным переформированием русла. На значительной части реки образуется боковая и глубинная эрозия. На отдельных участках глубинная эрозия достигала 2,5–3,0 м. Боковая эрозия колеблется от 10 до 80 метров, наиболее интенсивной эрозии подвержены вогнутые берега в крупных излучинах. Отмечается постепенное увеличение количества наносов, которые скапливаются преимущественно на отдельных небольших участках, образуя отмели и косы.

Увеличивается численность населения птиц-норников на склонах щурка золотистая (*Merops apiaster*), береговая ласточка (*Riparia riparia riparia*) [36, 37].

Строительство гидротехнических сооружений, мостов и трубопроводов способствует распространению факультативных синантропных видов, к примеру, ласточек деревенская ласточка (*Hirundo rustica*), городская ласточка (*Delichon urbicum*) [37].

Активная подача пресной воды снизило минерализацию воды. Постепенно развивается прибрежная надводная растительность *Phragmites australis* (тростник южный), *Schoenoplectus lacustris* (камыш озерный), занимая все большую часть русла. Активное распространение получает *Cotinus coggygria* (скуппия) [9].

Гидроморфные растительные комплексы получают гораздо большее распространение, создавая благоприятные места обитания для различных видов позвоночных животных. Пионерами заселения новых местообитаний являлись такие виды, как *Anas platyrhynchos* (кряква), *Acrocephalus* (камышевки) [45].

Немаловажным фактором изменения и формирования фаунистического комплекса была интродукция. В 1964 году происходит интродукция ондатры (*Ondatra zibetica*) на Новотроицком водохранилище [18].

Таким образом, при обводнении происходит сукцессия в долине реки, выраженная в активном руслообразовании, снижении минерализации, формировании местообитаний. Эти процессы влияли на фаунистический комплекс, изменяя его видовой состав. Фаунистический комплекс данной территории в 1990 годах будет отличаться видовым составом [8].

Земноводные представлены лягушкой озерной (*R. ridibunda*), пресмыкающиеся насчитывают 3 вида: черепаха болотная (*Emys orbicularis*), уж обыкновенный (*Natrix natrix*), уж водяной (*N. tessellata*), заметное изменение произошло в составе орнитофауны: выпь большая (*Botaurus stellaris stellaris*), кваква (*Nycticorax nycticorax nycticorax*), цапля большая белая (*Egretta alba alba*), цапля серая (*Ardea cinerea cinerea*), цапля рыжая (*A. purpurea purpurea*), кряква (*Anas platyrhynchos platyrhynchos*), утка серая (*A. strepera*), нырок красноносый (*Netta rufina*), лунь болотный (*C. aeruginosus aeruginosus*), чибис (*Vanellus vanellus*), хохотунья (*Larus cachinnans cachinnans*), крачка речная (*Sterna hirundo hirundo*), сизоворонка (*Coracias garrulus garrulus*), шурка золотистая (*Merops apiaster*), Ласточка береговая (*Riparia riparia riparia*), ласточка деревенская (*Hirundo rustica rustica*), ласточка городская, или воронок (*Delichon urbica urbica*), трясогузка белая (*M. alba alba*), камышевка тонкоклювая (*Luscinola melanopogon mimica*), камышевка индийская

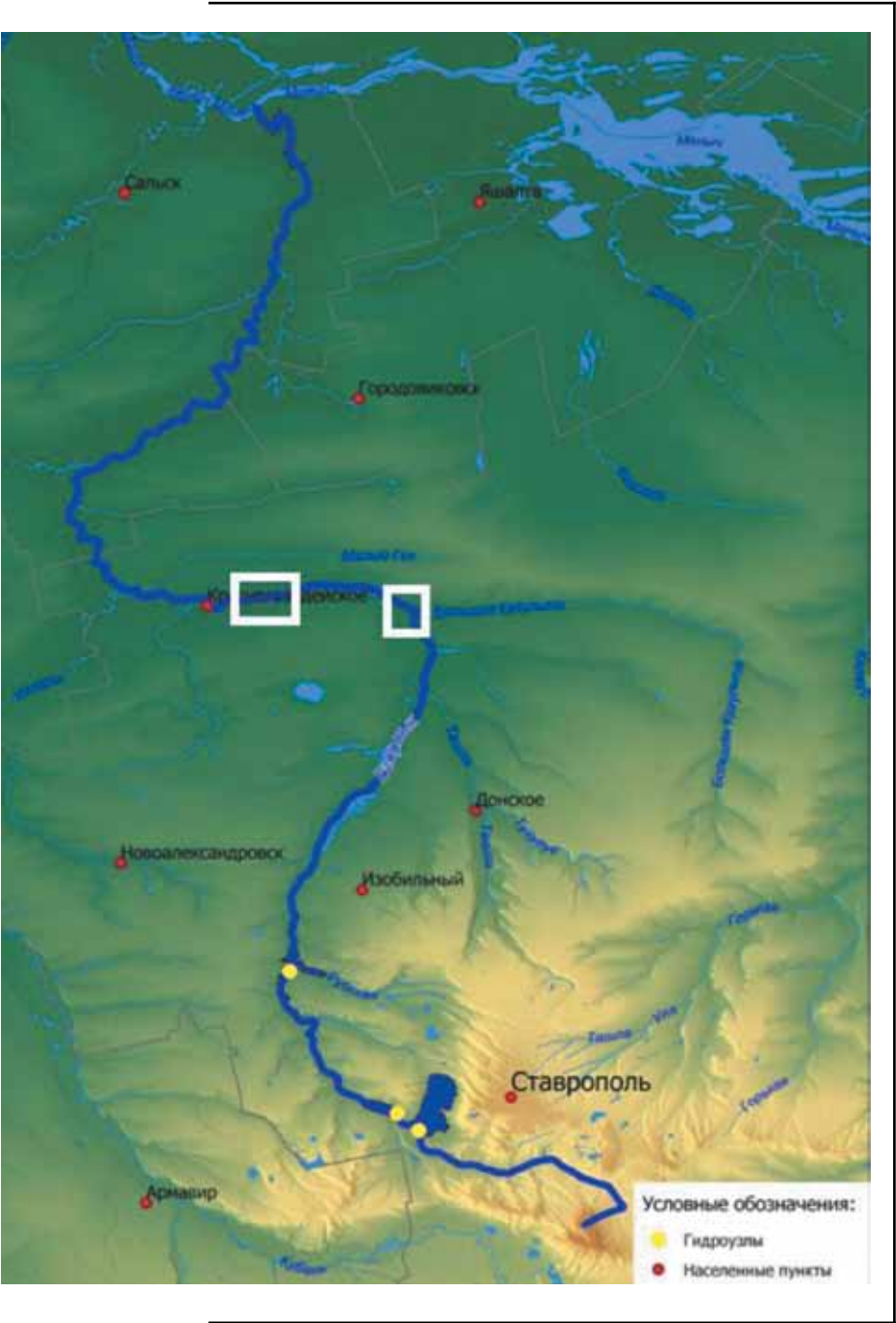


Рис. 1. Ключевые участки территории исследования (среднее течение р. Егорлык).

Fig. 1. Key areas of the study area (middle course of the Yegorlyk river).

(*A. agricola septima*), камышевка болотная (*A. palustris*), камышевка тростниковая (*A. scirpaceus scirpaceus*), камышевка дроздовидная (*A. arundinaceus arundinaceus*), чекан черноголовый (*S. torquata*), каменка-пleshанка (*O. pleschanka pleschanka*), каменка-плясунья (*O. isabellina*), варакушка (*L. svecica cyanecula*), млекопитающие представлены 5 видами: ласка (*Mustela nivalis*), ондатра (*Ondatra zibethicus*), полевка обыкновенная (*Microtus arvalis*), полевка общественная, или степная (*M. socialis*), водяная полевка (*Arvicola terrestris*) [11, 34, 37].

К **третьему этапу** будет отнесен современный период, с 2000 года по настоящее время. Спустя более чем 70 лет после обводнения, проследив динамику трансформации фаунистического комплекса, можно утверждать, что ключевой участок исследования, как интразональный биотоп не претерпел коренного изменения, однако, заметны изменения состава фаунистического комплекса.

В процессе исследования нами были выделены 2 ключевых участка исследования, расположенные в Труновском (рис. 2–3) и Красногвардейском районе (рис. 4–5), для анализа состояния прибрежного фаунистического комплекса.

В первую очередь необходимо отметить динамику увеличения площади зарослей надводной растительности, которая является местообитанием животных. За период с 2015 по 2020 г. площадь местообитаний увеличилась на обоих ключевых участках на 20-25%.

Согласно проведенного анализа видового состава и плотности населения фаунистического комплекса, можно проследить динамику изменения. Увеличение площади прибрежных зарослей формирует новые места обитания, увеличивая плотность населения фаунистического комплекса реки Егорлык (табл. 1).

Коренных изменений на данных ключевых участках не произошло. Интразональные биотопы относительно стабильны, в отличие от зональных, даже при антропогенной нагрузке, которая все-таки имеется. В последние годы важно отметить увеличение хозяйственной деятельности на ключевых участках исследования. Пой-



Рис. 2.

Ключевой участок (1) Труновском районе в 2015 и 2020 г.
Fig. 2. Key section (1) of the Trunovsky district in 2015 and 2020.

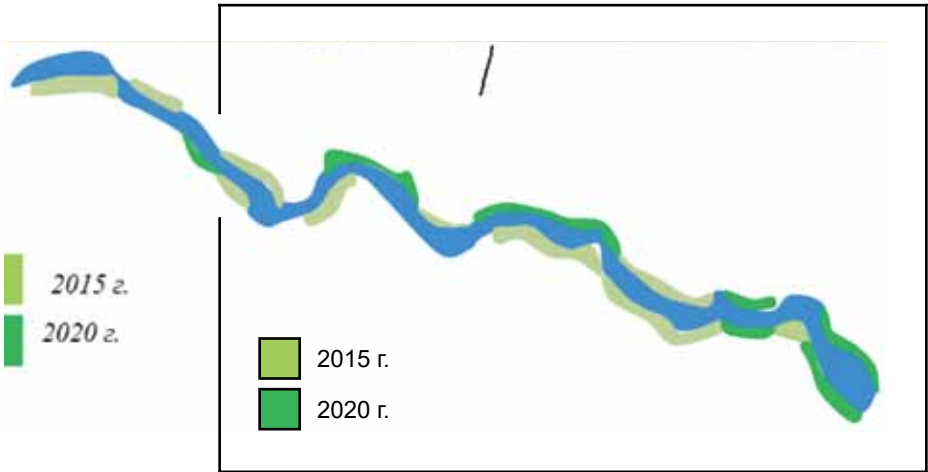


Рис. 3.

Изменение площади местообитаний ключевого участка исследования (1) 2015–2020 гг.
Fig. 3. Change in the habitat area of the key study area (1) 2015–2020.



Рис. 4. Ключевой участок (2) в Красногвардейском районе в 2015 и 2020 гг.

Fig. 4. Key site (2) in Krasnogvardeysky district in 2015 and 2020.



Рис. 5. Изменение площади местообитаний ключевого участка исследования (2) 2015–2020 гг.

Fig. 5. Change in the habitat area of the key study area (2) 2015–2020.

Таблица 1. ПЛОТНОСТЬ ЖИВОТНОГО НАСЕЛЕНИЯ ПРИБРЕЖНОЙ
ТЕРРИТОРИИ РЕКИ ЕГОРЛЫК
Table 1. The density of the animal population of the coastal territory of the
Yegorlyk River

№	Вид	особей/га		
		2016	2017	2018
1	Озерная лягушка (<i>Rana ridibunda</i>)	19,7	16,1	18,8
2	Обыкновенный уж (<i>Natrix natrix</i>)	0,2	0,2	0,2
3	Водяной уж (<i>Natrix tessellata</i>)	0,2	0,2	0,2
4	Большая белая цапля (<i>Egretta alba alba</i>)	0,2	0,3	0,2
5	Серая цапля (<i>Ardea cinerea cinerea</i>)	0,4	0,4	0,3
6	Большая выпь (<i>Botaurus stellaris stellaris</i>)	0,1	0,1	0,1
7	Пеганка (<i>Tadorna tadorna</i>)	—	0,1	0,1
8	Кряква (<i>Anas platyrhynchos</i>)	2,9	2,3	3,4
9	Болотный лунь (<i>Circus aeruginosum aeruginosum</i>)	0,02	0,03	0,04
10	Чибис (<i>Vanellus vanellus</i>)	0,8	0,7	0,8
11	Чайка хохотунья (<i>Larus cachinnans cachinnans</i>)	0,08	0,1	0,1
12	Сизая чайка (<i>Larus canus</i>)	0,1	0,2	0,2
13	Речная крачка (<i>Sterna hirundo hirundo</i>)	0,3	0,2	0,2
14	Обыкновенная кукушка (<i>Cuculus canorus canorus</i>)	0,1	0,1	0,1
15	Щурка золотистая (<i>Merops apiaster</i>)	0,2	0,1	0,1
16	Береговая ласточка (<i>Riparia riparia riparia</i>)	0,8	0,6	0,7
17	Деревенская ласточка (<i>Hirundo rustica</i>)	0,05	0,05	0,05
18	Городская ласточка (<i>Delichon urbicum</i>)	0,04	0,04	0,04
19	Трясогузка белая (<i>Motacilla alba alba</i>)	0,04	0,04	0,02
20	Болотная камышовка (<i>Acrocephalus palustris</i>)	1,05	1,6	1,8
21	Тростниковая камышовка (<i>Acrocephalus scirpaceus</i>)	1,06	1,09	2,0
22	Дроздовидная камышовка (<i>Acrocephalus arundinaceus</i>)	1,7	2,3	2,4
23	Ондатра (<i>Ondatra zibethicus</i>)	1,1	1,2	1,2
24	Водяная полевка (<i>Arvicola terrestris</i>)	1,8	2,4	2,6

менные территории активно распаиваются, что влечет за собой сокращение ареала пойменных видов, а также к формированию агроландшафта, вблизи интрозонального комплекса. Но в целом фаунистический комплекс стабилен.

Относительно видового разнообразия, можно отметить различия. Если мы рассмотрим видовое разнообразие до обводнения, то оно приурочено к характеру территории, до опреснения водами Кубани. После обводнения на данной территории не встречаются шилоклювковые. Исключением здесь, является пеганка (*Tadorna tadorna*), которая селится, как правило на водоемах с солёной или солоноватой водой. Птицы гнездятся парами или небольшими рассеянными колониями, устраивая гнезда в наземных или подземных укрытиях, часто в норах. Птицы были отмечены на обрывистом участке на протяжении двух лет в летний период.

Увеличенный сток и сильное течение, при вводе в эксплуатацию Невинномысского канала стали лимитирующим фактором для пастушковых и поганковых, которые предпочитают спокойные водоемы.

Активное зарастание русла реки Егорлык послужило увеличению численности камышевок.

Таким образом, определённый гидрологический режим реки определяет формирование местообитаний и соответственно плотности и численности животного населения. Анализируя данные 1990–2000 гг. с данными исследования, проведенного в 2015–2020 гг. можно предположить о завершении сукцессионных серий, которые были обусловлены первичной сукцессией при обводнении реки в 1948 году, сукцессионного ряда, при котором характерно наибольшее видовое разнообразие, при посменно сменяющих друг друга сообществ и образованием климаксового сообщества после 2000 года (рис. 6).

Выводы

Масштабное возведение гидротехнических сооружений в XX веке – водохранилищ, каналов, оросительных систем, ирригационных водоемов изменяло гидрологический режим водных систем. Река Егорлык после обводнения кубанской водой из

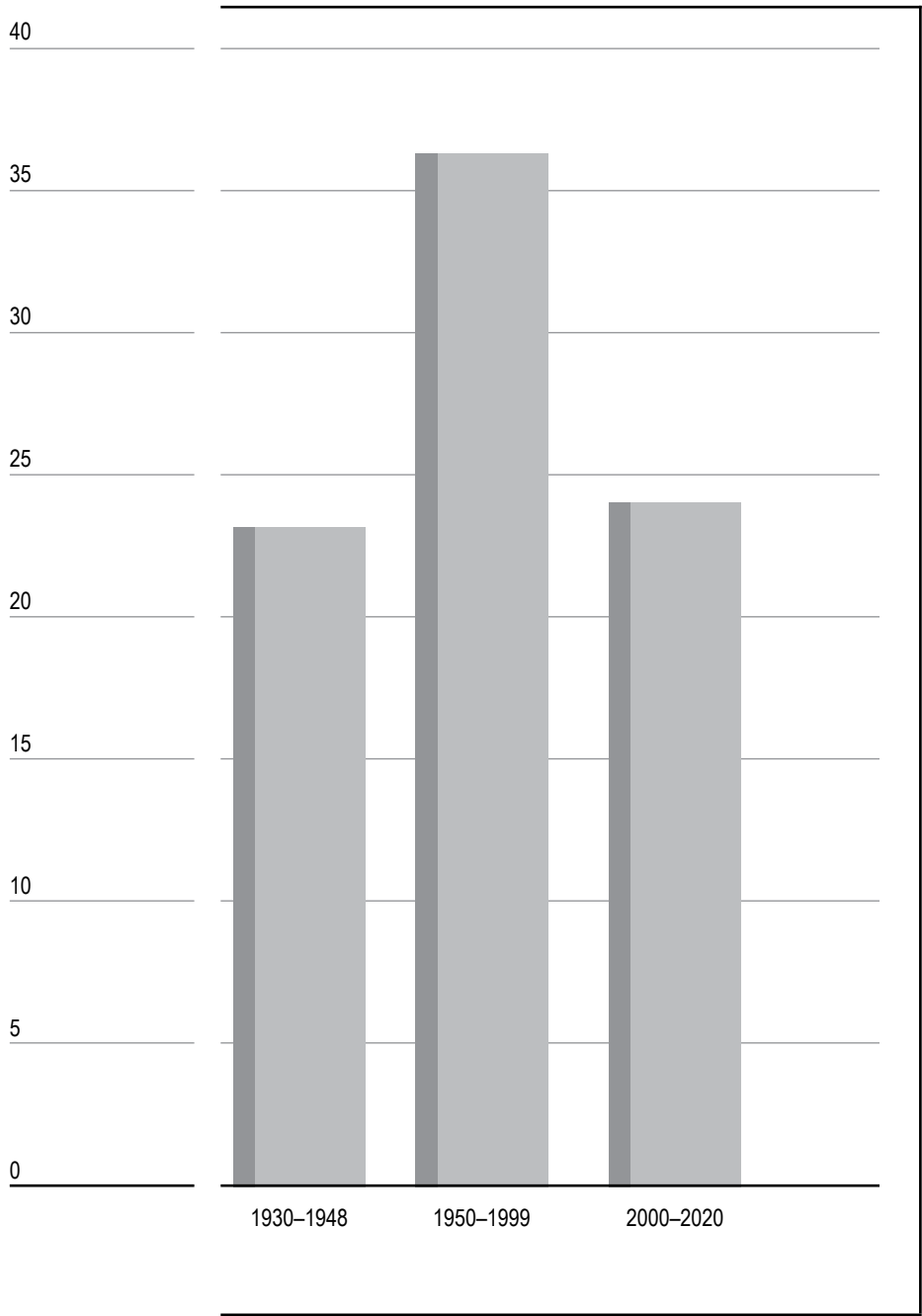


Рис. 6. Многолетняя динамика видового разнообразия фаунистического комплекса среднего течения реки Егорлык.
Fig. 6. Long-term dynamics of species diversity of the faunal complex of the middle course of the Yegorlyk River.

мелководной, пересыхающей каждый год на 3-4 месяца превратилась в многоводный поток с изменившимся водным режимом и активным переформированием русла, что повлекло за собой и трансформацию фаунистического комплекса. В целом интрозональный комплекс реки Егорлык несмотря на антропогенное вмешательство не изменился, однако произошла трансформация видового состава. Для того, чтобы провести анализ, мы разделили развитие экосистемы реки Егорлык с 1948 г. по настоящее время мы разделим на три этапа формирования.

В первом этапе, опираясь на фондовые данные мы разобрались с видовым составом животного населения до обводнения реки. В этот период видовое разнообразие было характерно для мало-водных степных водных систем, с горько-соленой водой, пересыхающей в летний период.

После обводнения, в выделенный нами второй период происходит активная смена стенобионтных видов эврибионтными. В этот период наиболее отмечено наибольшее видовое разнообразие. Обводнение реки является процессом первичной сукцессии, а его заселение различными видами – это сукцессионная серия.

Последним мы выделили период формирования климаксового сообщества в настоящее время, обусловленное стабильным наличием местообитаний, а также урегулированию количества видов, численности и плотности животного населения.

Библиографический список

1. Гвоздецкий Н.А. Физическая география Кавказа. Москва: МГУ, 1954. 156 с.
2. Динник Н.Я. Орнитологические наблюдения на Кавказе // Труды С.-Петербур. о-ва естествоиспытателей, 1886. Т. 18. Вып. 1. 137 с.
3. Динник Н.Я. Звери Кавказа. Тифлис, 1910, Ч.1; 1914. Ч. 2. 538 с.
4. Исаченко А.Г. Основы ландшафтоведения и физико-географического районирования. Москва: Высшая школа, 1965. – 327 с.
5. Каганович Л.М. Развитие мелиорации в Ставропольском крае. Пятигорск: Севкагипроводхоз, 1996. 207 с.

6. Новиков Г.А. Полевые исследования по экологии наземных позвоночных, Изв. Всес. геогр. об-ва. 1953. 602 с.
7. Лиховид А.А., Тертышников М.Ф. Зоогеографическое (фаунистическое) районирование Предкавказья // Современная биогеография. Москва: ИИЕТ РАН, 2001. С. 83-86.
8. Лиховид А. А., Харин К. В., Шкарлет К. Ю., Современное фаунистическое разнообразие наземных позвоночных ландшафтов Ставропольской возвышенности // Наука. Инновации. Технологии. 2013. №1. С. 111–116.
9. Лиховид Н.Г. Флора водно-болотных и переувлажненных местообитаний Предкавказья и перспективы ее изучения // Вестник Ставропольского государственного университета. 1996. Вып. 6. (Естественные науки). С. 134–137.
10. Равкин Ю.С. К методике учета птиц в лесных ландшафтах // Природа очагов клещевого энцефалита на Алтае (сев.-вост. ч.). Новосибирск, 1967. С. 66-75.
11. Сатунин К.А. Материалы к познанию птиц Кавказского края. Тифлис, 1907. 144 с.
12. Сатунин К.А. О зоогеографических округах Кавказского края // Изв. Кавказского музея. Вып. VII. Тифлис, 1913. 100 с.
13. Сатунин К.А. Млекопитающие Кавказского края. Тифлис, 1915. Т.1. 411 с.
14. Сатунин К.А. Млекопитающие Кавказского края. Тифлис, 1920. Т. 2. 223 с.
15. Степанян Л.С. Конспект орнитологической фауны СССР. Москва: Наука, 1990. 726 с.
16. Фаусек В. А. К природе степей Северного Кавказа [СПб.]: тип. А. С. Суворина, [1887]. 16 с. (Перепеч. по распоряжению Рус. геогр. о-ва, из т. 23 «Известий» о-ва. 1887).
17. Темботов А.К. География млекопитающих Северного Кавказа. Нальчик: Эльбрус, 1972. 245 с.
18. Темботов А.К. Млекопитающие / Ресурсы живой фауны. Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 1982. 245 с.
19. Темботов А.К., Казаков Б.А. Позвоночные широтных зон и высотных поясов Северного Кавказа // Ресурсы живой фауны. Позвоночные животные суши. Ростов н/Д.: Изд-во РГУ, 1982. Ч. 2. 211 с.
20. Тертышников М.Ф. Эколого-зоогеографическая характеристика батрахо- и герпетофауны Северного Кавказа // Фауна Ставрополя. Ставрополь: СГПИ, 1977. Вып. 2. 146 с.

21. Тертышников М.Ф. Пресмыкающиеся Предкавказья: автореф. дисс. на соиск. ученой степени докт. биол. наук. Киев, 1992. 33 с.
22. Тертышников М.Ф. Пресмыкающиеся Ставрополя // Фауна Ставрополя. Ставрополь: СГПУ, 1995. Вып. 6. 150 с.
23. Тертышников М.Ф. Ареалогический анализ и герпето-географическое районирование Предкавказья // Фауна Ставрополя. Ставрополь: СГПИ, 1992. Вып. 4. С. 111.
24. Тертышников М.Ф. Экологические группировки наземных позвоночных Ставрополя // Фауна Ставрополя. Ставрополь: Изд. СГУ, 1997. Вып. 7. 146 с.
25. Тертышников М.Ф. О зоогеографическом районировании Ставрополя. Сообщение I. // Фауна Ставрополя. Вып. 7. Ставрополь: Изд. СГУ. 1997 г.
26. Тертышников М.Ф. К вопросу о зоогеографическом районировании Предкавказья // Вопросы экологии и охраны позвоночных животных. Киев-Львов: УАМИБ, 1998. Вып. 3. 103 с.
27. Тертышников М.Ф. Земноводные Ставрополя. Ставрополь: СГУ, 1999 б. 139 с.
28. Тертышников М.Ф., Горовая В.И., Миронов Б.Б. Земноводные Ставрополя // Фауна Ставрополя. Ставрополь: СГПУ, 1995. Вып. 6. 170 с.
29. Тертышников М.Ф., Горовая В.И. Охрана животного мира Ставрополя: состояние и перспектива // Фауна Ставрополя. - Ставрополь: Изд. СГУ, 1997. Вып. 7. С. 55–64.
30. Тертышников М.Ф., Тарасов М.П., Хе В.Х, Млекопитающие Ставрооля // Фауна Ставрополя. Ставрополь: СГПУ, 1995. Вып. 6. С. 84-90.
31. Тертышников М.Ф., Швырева А.К., Котти Б.К., Лиховид А.А. Об ископаемых животных Ставрополя // Фауна Ставрополя. Ставрополь: Изд. СГУ, 1997. Вып. 7. С. 101–116.
32. Тертышников М.Ф., Швырева А.К. О зоогеографическом районировании Ставрополя. Сообщение П. (на примере наземных позвоночных животных)// Фауна Ставрополя. Ставрополь: СГУ, 1997. Вып. 7. С. 112–121.
33. Федоров С.М. Млекопитающие (Mammalia) Ставропольского края // Материалы по изучению Ставропольского края. Ставрополь: Ставропольское книжное изд-во, 1954. Вып. 6. С. 76-84.
34. Федоров С.М. Птицы Ставропольского края // Материалы по изучению Ставропольского края. Ставрополь: Ставропольское книжное изд-во, 1955. Вып. 7. С. 54-59.

35. Федоров С.М. Пресмыкающиеся, земноводные, круглоротые и рыбы Ставропольского края // Материалы по изучению Ставропольского края. Ставрополь: Ставропольское кн. изд-во, 1956. Вып. 8. С. 105–110.
36. Хохлов А.Н. Животный мир Ставрополя. Ставрополь, 1993. 156 с.
37. Хохлов А.Н., Ильях М.П. Позвоночные животные Ставрополя и их охрана. Ставрополь: СГУ, 1997. 103 с.
38. Хохлов А.Н., Лиховид А.И., Ильях М.П. Новые гнездящиеся виды в орнитофауне Ставропольской лесостепи // Вестник СГУ, 1999. Вып.19. С. 57–61.
39. Хохлов А.Н., Хохлова З.И. Зимующие птицы Ставропольского края и сопредельных территорий. Ставрополь: СГПИ, СКСют, 1992. 77 с.
40. Шальнев В.А. Ландшафты Ставропольского края. Ставрополь: СГПУ, 1995. 52 с.

References

1. Gvozdetsky N.A. Physical geography of the Caucasus. M.: Moscow State University, 1954. 156 p.
2. Dinnik N.Ya. Ornithological observations in the Caucasus // Proceedings of St. Petersburg. o-va naturalists, 1886. Vol. 18. Issue 1. 137 p.
3. Dinnik N.Ya. Animals of the Caucasus. Tiflis, 1910, Part 1; 1914. Part 2. 538 p.
4. Isachenko A.G. Fundamentals of landscape studies and physical and geographical zoning. M.: Higher School, 1965. 327 p.
5. Kaganovich L.M. Development of land reclamation in the Stavropol Territory. Pyatigorsk: Sevkagiprovdokhoz, 1996. 207 p.
6. Novikov G.A. Field research on the ecology of terrestrial vertebrates, Izv. Vses. geographical area. 1953. 602 p.
7. Likhovid A.A., Tertyshnikov M.F. Zoogeographic (faunal) zoning of the Pre-Caucasus // Modern biogeography. M.: IIET RAS, 2001. P. 83–86.
8. Likhovid A. A., Kharin K. V., Shkarlet K. Yu., Modern faunal diversity of terrestrial vertebrate landscapes of the Stavropol upland // Science. Innovation. Technologies. 2013. No. 1. P. 111–116.
9. Likhovid N.G. Flora of wetland and waterlogged habitats of the Pre-Caucasus and prospects for its study // Bulletin of Stavropol State University. 1996. Vol. 6. (Natural science). P. 134–137.

10. Ravkin Yu. s method of accounting birds forest landscape // Nature foci of tick-borne encephalitis in the Altai (sat. – Eastern. h). Novosibirsk, 1967. S. 66–75.
11. They K. A. materials to the knowledge of the birds of the Caucasus region. Tiflis, 1907. 144 p.
12. Satunin K.A. About zoogeographic districts of the Caucasian territory // Izv. of the Caucasian Museum. Issue VII. Tiflis, 1913. 100 p.
13. Satunin K.A. Mammals of the Caucasian region. Tiflis, 1915. Vol. 1. 411 p.
14. Satunin K.A. Mammals of the Caucasian region. Tiflis, 1920. Vol. 2. 223 p.
15. Stepanyan L.S. Synopsis of ornithological fauna of the USSR. M.: Nauka, 1990. 726 p.
16. Fausek V. A. Towards the nature of the steppes of the North Caucasus. [St. Petersburg.]: type. A. S. Suvorin, [1887]. 16 p. (Reprint. by order of the Russian Geogr. O-va, from vol. 23 of "Izvestia" O-va. 1887).
17. Tembotov A.K. Geography of mammals of the North Caucasus. Nalchik: Elbrus, 1972. 245 p.
18. Tembotov A.K. Mammals / Resources of living fauna. Rostov-on-Don: Publishing House of the Russian State University, 1982. 245 p.
19. Tembotov A.K., Kazakov B.A. Vertebrates of latitudinal zones and high-altitude belts of the North Caucasus // Resources of living fauna. Vertebrates of the land. Rostov n/D: Publishing House of the Russian State University, 1982. Part 2. 211 p.
20. Tertyshnikov M.F. Ecological and zoogeographic characteristics of the batracho and herpetofauna of the North Caucasus // Fauna of Stavropol. Stavropol: SGPI, 1977. Issue. 2. p. 146 p.
21. Tertyshnikov M.F. Reptiles of the Pre-Caucasus. Autoref. diss. on the job. academic degree of doctor. biol. sciences. Kiev, 1992. 33 p.
22. Tertyshnikov M.F. Reptiles of Stavropol // Fauna of Stavropol. Stavropol: SGPU, 1995. Issue 6. 150 p.
23. Tertyshnikov M.F. Arealogical analysis and herpeto-geographical zoning of the Pre-Caucasus// Fauna of Stavropol. Stavropol: SGPI, 1992. Issue 4. P. 111.
24. Tertyshnikov M.F. Ecological groupings of terrestrial vertebrates of Stavropol // Fauna of Stavropol. Stavropol: Publishing House of SSU, 1997. Issue 7. 146 p.

25. Tertyshnikov M.F. On zoogeographic zoning of Stavropol. Message I. // Fauna of Stavropol. Stavropol: Publishing House of SSU. 1997 Issue 7.
26. Tertyshnikov M.F. On the question of zoogeographic zoning of the Pre-Caucasus // Issues of ecology and protection of vertebrates. Kiev-Lviv: UAMIB, 1998. Issue 3. 103 p.
27. Tertyshnikov M.F. Amphibians of Stavropol. Stavropol: SSU, 1999. 139 p.
28. Tertyshnikov M.F., Gorovaya V.I., Mironov B.B. Amphibians of Stavropol // Fauna of Stavropol. Stavropol: SGPU, 1995. Issue 6. 170 p.
29. Tertyshnikov M.F., Gorovaya V.I. Protection of the animal world of Stavropol: state and perspective // Fauna of Stavropol. Stavropol: Publishing House of SSU, 1997. Issue 7. P. 55–64.
30. Tertyshnikov M.F., Tarasov M.P., He V.X, Mammals of the Stavropol region // Fauna of Stavropol. Stavropol: SGPU, 1995. Issue. 6. P. 84–90.
31. Tertyshnikov M.F., Shvyreva A.K., Kotti B.K., Likhovid A.A. About fossil animals of Stavropol // Fauna of Stavropol. Stavropol: Publishing House of SSU, 1997. Issue 7. P. 101–116.
32. Tertyshnikov M.F., Shvyreva A.K. About zoogeographic zoning of Stavropol. Post P. (on the example of terrestrial vertebrates) // Fauna of Stavropol. Stavropol: SSU, 1997. Issue 7. P. 112–121.
33. Fedorov S.M. Mammals (Mammalia) Stavropol Territory//Materials on studied. Stavropol Territory. Stavropol: Stavropol Book Publishing House, 1954. Issue. 6. P. 76-84.
34. Fedorov S.M. Birds of the Stavropol Territory // Materials on the study of the Stavropol Territory. Stavropol: Stavropol Book Publishing House, 1955. Issue 7. P. 54–59.
35. Fedorov S.M. Reptiles, amphibians, roundworms and fishes of the Stavropol Territory// Materials on the study of the Stavropol Territory. Stavropol: Stavropol edition. Publishing house, 1956. Issue 8. P. 105-110.
36. Khokhlov A.N. The animal world of Stavropol. Stavropol, 1993. 156 p.
37. Khokhlov A.N., Ilyukh M.P. Vertebrate animals of Stavropol and their protection.- Stavropol: SSU, 1997. 103 p.
38. Khokhlov A.N., Likhovid A.I., Ilyukh M.P. New breeding species in the avifauna of the Stavropol forest-steppe // Bulletin of SSU, 1999. Issue 19. P. 57–61.

39. Khokhlov A.N., Khokhlova Z.I. Wintering birds of the Stavropol Territory and adjacent territories. Stavropol: SGPI, SKSYUT, 1992. 77 p.
40. Shalnev V.A. Landscapes of the Stavropol territory. Stavropol: SGPU, 1995. 52 p.

Поступило в редакцию 29.09.2021,
принята к публикации 20.11.2021.

Об авторах

Губанов Р.С., соискатель, кафедра экологии и природопользования, институт наук о Земле, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия, телефон +7 909 759 73 38; e-mail: guevara78@mail.ru.

Лиховид А.А., доктор географических наук, кандидат биологических наук, профессор кафедры экологии и природопользования, институт наук о Земле, проректор по научной работе, СКФУ, Ставрополь, Россия; e-mail: alikhovid@ncfu.ru.

About authors

Gubanov R.S. Candidate, the chair of Ecology and Nature Management, Institute of Earth Sciences, North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia; phone +7 909 759 73 38; e-mail: guevara78@mail.ru.

Likhovid A.A., Doctor of Geography, Ph. D. (Biology), professor, the chair of Ecology and Environmental Management, IMNS, vice-rector for Research, NCFU, Stavropol, Russia; e-mail: alikhovid@ncfu.ru.

25.00.24
 УДК 314.9

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, ПОЛИТИЧЕСКАЯ
 И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

Chereshnya O.,	Integrated Mapping Laboratory, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;
De Maeyer P.,	Faculty of Sciences, Department of Geography, Research group CartoGIS, Krijgslaan 281 (S8), 9000 Gent, Belgium;
Gribok Marina,	Integrated Mapping Laboratory, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;
Milleville Kenzo,	Faculty of Sciences, Department of Geography, Research group CartoGIS, Krijgslaan 281 (S8), 9000 Gent, Belgium;
Tikunov Vladimir,	Integrated Mapping Laboratory, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;
Van Ackere S.,	Faculty of Sciences, Department of Geography, Research group CartoGIS, Krijgslaan 281 (S8), 9000 Gent, Belgium;
Van de Weghe N.	Faculty of Sciences, Department of Geography, Research group CartoGIS, Krijgslaan 281 (S8), 9000 Gent, Belgium.

**THE EXPERIENCE IN INFORMATION
 SUPPORT FOR SUSTAINABLE
 DEVELOPMENT OF TERRITORIES
 WITH REGIONAL SPECIFICS**

DOI: 10.37493/2308-4758.2021.4.4

Introduction.

The article describes and summarizes the experience of different countries in developing the information systems supporting the management of territories and their sustainable development. Some countries, such as the USA, Australia, Great Britain, and others, made great strides in developing such systems at the national level. The article also provides examples of spatial databases for the territories of Saudi Arabia, Hungary, coastal regions of Spain, etc. The basis for the territorial management support system is the spatial data infrastructure (SDI), which provides data storage, updating, access to data, as well as their visualization in the form of maps, graphs or tables. For a long time, geoportals were considered one of the most effective types of spatial data infrastructures, combining many functions necessary for displaying spatial information and effective management. However, now geoportals are being replaced by information and analytical systems of a new generation that goes beyond the SDI concept and are called geospatial ecosystems.

Materials and research
 methods.

The tasks of information support of territorial development projects from the perspective of sustainable development are set at all territorial levels, from global to local. At the global level, statistical data is collected by countries and regions of the world within the framework of the work of the largest international organizations: The United Nations, the World Bank, WHO, UNESCO, the International Labor Organization, the International Tourism Organization, etc. As a rule, this data is

	publicly available and published on the websites of organizations and in annual reports.
The results of the study and their discussion:	For a long time, geoportals were considered one of the most effective types of spatial data infrastructures, combining many functions necessary for effective territory management (Gamez et al., 2019). However, in recent years, geoportals have been replaced by new-generation information and analytical systems that go beyond the SDI concept and are called geospatial ecosystems. The metaphor "ecosystem" in this case conveys the fundamental concept of a dynamic, complexly organized, stable, adaptive multi-user geoinformation environment (Strobl, 2021; Shao et al., 2012). The transition from SDI to a geospatial ecosystem is driven by a continuous increase in the volume of generated spatial information, an increase in the number of platforms and services based on geodata, and the emergence of new challenges in data management, including in the field of data protection and cybersecurity.
Key words:	territory management, spatial data infrastructure, sustainable development, geospatial ecosystem

Introduction

The management of territories within the framework of the concept of sustainable development is a task that is always based on the monitoring and analysis of spatial data. The effectiveness of management decisions largely depends on the reliability, relevance, availability of tools for analysis and visual visualization of various data sets, the composition of which is determined primarily by the specific characteristics of the territory: its geographical location, social, demographic and economic characteristics, the presence of environmental risks and other features.

The tasks of information support of territorial development projects from the perspective of sustainable development are set at all territorial levels, from global to local. At the global level, statistical data is collected by countries and regions of the world within the framework of the work of the largest international organizations: The United Nations, the World Bank, WHO, UNESCO, the International Labor Organization, the International Tourism Organization, etc. As a rule, this data is publicly available and published on the websites of organizations and in annual reports.

Moreover, data observations under projects that combine the efforts of many countries to achieve the Sustainable Development Goals:

the GEOSS (Global Earth Observation System of Systems), Data4SDGs (Global Partnership for Sustainable Development Data) IAEG-SDG (Inter-Agency Expert Group on SDG indicators), IISD (International Institute for Sustainable Development), SDSN (Sustainable Development Solutions Network), HLPF (UN High-level Political Forum on Sustainable Development), and also European INSPIRE, Danube Region Strategy, EuroGeographics and other programs others.

Often, the provision of government structures responsible for making managerial decisions at various territorial levels becomes a national-scale task. To solve it, information and telecommunications systems are being created, which are spatial data infrastructures that provide data collection, storage, timely updating, analysis and visualization for comprehensive support of public administration both at the level of the whole country and individual regions or cities.

Main body

One of the first national-level spatial data infrastructures was the American NSDI (National Spatial Data Infrastructure) system, created in 2000 by order of US President Bill Clinton on April 13, 1994. The prospects for its development were determined in 1998 in the report of the National Academy of Public Administration (NAPA) "Geographical Information in the XXI century". For direct online access to data in NSDI, six gateways were created with access to the network of national information exchange centers, which unites hundreds of servers in the United States. At the beginning of 2006, the NSDI architecture was a combination of The Federal Committee for Geographical Data (FGDC), the coordinating body of the NSDI, the National Map and National Atlas programs, as well as the geoportal GOS (Geospatial One-Stop) [Koshkarev, 2014]. Since 2009, the service has been used to access NSDI geoinformation resources (www.data.gov), at the moment, it has combined about 230 thousand data sets.

Other examples of national spatial data infrastructures are The Australian AURIN Australian Urban Research Infrastructure Network [Sinnotte et al., 2011], the UK Open Data portal (data.gov.uk), the Russian EMIAS-a unified interdepartmental information and statistical System (fedstat.ru). In this case, the state acts as an aggregator of data from

Spatial Dataset Government Organisation	Geodetic	Road networks	Topography	Hydrology	Administrative boundaries	Utility information	Cadastral information	Geographical names	Transportation	Elevation and Bathymetry	Environment	Aerial or Satellite Imagery	Vegetation	Geology	Zip Codes	Population Census
Ministry of Municipal and Rural Affairs	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
High Commission for the Development of Ar Riyadh		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		*		*	*
General Commission for Survey	*	*	*	*	*	*		*	*	*	*	*	*			*
Saudi Electricity Company		*	*		*	*	*	*	*	*						
Saudi Commission for Tourism and Antiquities		*	*		*	*		*					*	*		
Central Department of Statistics and Information		*						*	*							*
Ministry of Agriculture		*						*				*				
King Abdulaziz City for Science and Technology		*	*		*			*	*	*		*	*			
Saudi Geological Survey	*	*	*	*	*			*				*	*	*		
Saudi Post								*	*						*	*

Fig. 1. Data sets for Saudi Arabia and the agencies using them

different sources in a single information space, the users of which are individual departments responsible for decision-making in different areas. Figure 1 shows an example of a single data management system for various government structures in Saudi Arabia using the same data sets, but in different combinations and for different purposes [Alshehri, 2011].

In some countries, several national-level projects combine spatial data, including sustainable development goals projects. An interesting example is Hungary, where there are several data management systems developed to support and achieve the Sustainable Development Goals. The main ones [Palya et al., 2018]:

National adaptation geo-information system NAGiS (<http://nater.mbfisz.gov.hu/>) – multi-purpose geographic information system to support national policies, development strategies of governance and decision-making related to the assessment of the impact of climate change and the development of the necessary adaptation measures in Hungary, taking into account national strategies on climate change Paris agreement in 2017, as well as programs for the environment and energy. NAGiS is positioned as a multifunctional arsenal for the implementation of the Sustainable Development Goals and the 2030 Agenda. The geo-information system consists of detailed, controlled and structured 15 data sets on demography, climate, forestry, soils, economy, drinking water supply, extreme weather conditions, etc. NAGiS is managed by the Hungarian Mining and Geological Service MBFSZ and its work is based on the cooperation of ten state and academic data provider organizations.

National Environmental Information System OKIR (<http://web.okir.hu>) - contains data on the state of the environment and the load on the environment from administrative bodies performing environmental and water protection functions, including measurement and monitoring data from regional inspections and data provided by the population following legislative regulation. The collected and processed data are entered into a central database under the jurisdiction of the Ministry of Agriculture. The main thematic data sets are “Waste management”, “Emissions of pollutants into the atmosphere”, “Surface water”, “Groundwater”, “European Register of Emissions and Transfer of Pollutants”, “Nature Protection”.

National Information System for Regional Development and State Planning TeIR (<https://www.teir.hu/>) – provides geospatial data and digital maps that serve as a basis for planning and implementing goals aimed at sustainable development of territories at the level of individual settlements and districts.

Examples of data visualization from Hungarian spatial data management systems are shown in Figure 2.

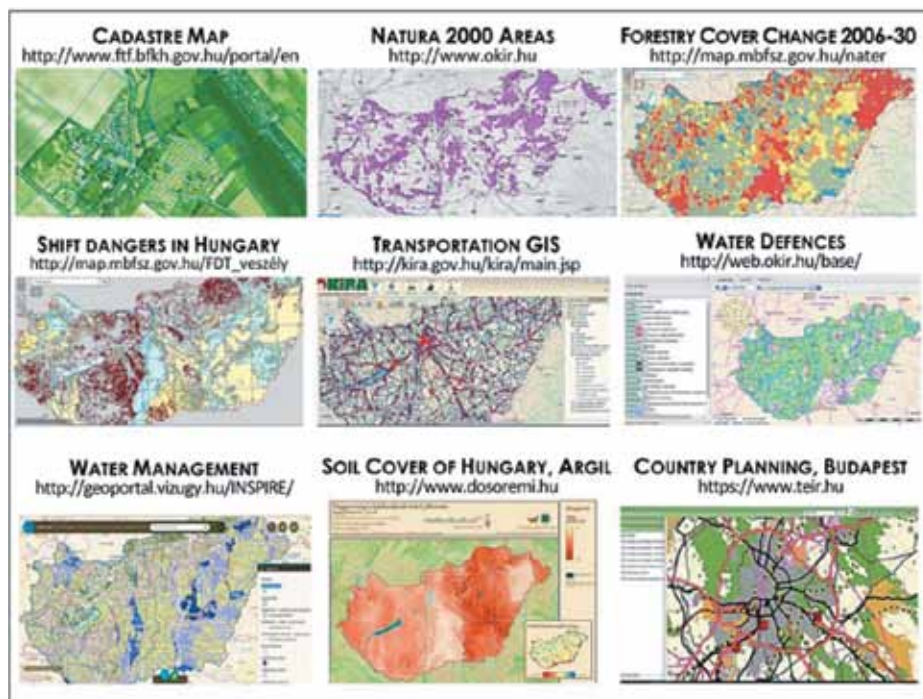


Fig. 2. Examples of cartographic visualization from Hungarian spatial data systems [Palya et al., 2018].

Currently, extensive research has been published on information support for sustainable management and development in different countries: Montenegro [Galli et al., 2018], Poland [Klimach et al., 2018], Malaysia [Samsudin et al., 2011], India [Acharya, Pandey, 2018], etc.

The sources of information used for the management of territories are very diverse. In addition to state statistics and official information from various departments and services, the provision of data by the public has been actively introduced in recent years. This type of data is called Volunteered geographic information (VGI) [Goodchild, 2007]. With the growing popularity of services based on the user's location, the collection of voluntarily provided information from the population is becoming more common and technologically feasible. However, a large number of data sources and formats entails the problem of redundancy and duplication of data, the need to combine them into a single system and ensure the convenience of working with data together.

Many spatial data systems are developed separately for rural areas [Burja, Burja, 2014; Borón et al., 2016, etc.] and urban areas [Tan et al., 2016; Mousiopoulou et al., 2010, etc.]. At the same time, in data sets for rural areas, more emphasis is usually placed on data on nature and climate [Zolfani et al., 2013; Manning et al., 2015], and for urban areas – on the features of urbanization of specific countries and regions. In recent years, the concept of a “smart city” and the use of ultra-large-scale data and BIM technologies have been actively implemented in urban development projects [El-Hallaq et al., 2019; Wang et al., 2019].

Projects for the development of territories that are tourist clusters, as a rule, include data sets not only on the characteristics of tourist flows, but also on their impact on the economy, the social sphere, and the load on the natural environment. For example, the data set for assessing the sustainability of the development of coastal territories in Spain (Figure 3) includes 32 indicators, including 8 social, 8 economic and 16 natural and environmental [Blancas et al., 2010].

Many indicators are directly related to the coastal position of the regions under consideration and contain information about beaches, their attendance, cleanliness, etc.

Even more complex spatial data management infrastructures are being developed for territories that are characterized not only by tourist attractiveness but also by high cultural and historical value and the presence of objects with a special protected status [Kolbovsky et al., 2012; Xiao et al. al., 2018; Ciski et al., 2019].

We also analyzed data systems for the sustainable development of territories characterized by the greatest degree of vulnerability. These are regions with pronounced environmental, economic or social problems, including, for example, problems of desertification and land degradation [Giuliani, 2020], the problem of poverty and hunger of the population [Mhangara, 2018, etc.] The territories of the Far North can also be attributed to this group, the problems of sustainable development of which have recently received a lot of attention [Dudin, Ivashchenko, 2015].

For a long time, geoportals were considered one of the most effective types of spatial data infrastructures, combining many functions necessary for effective territory management [Gamez et al., 2019]. However, in recent years, geoportals have been replaced by new-generation

Indicator	Definition
IS,	Ratio of tourists to locals
1S2	Ratio of peak season tourists to locals
1S3	Sports facilities per inhabitant available to the community in coastal zone
IS4	Health Centres per inhabitant available to the community in coastal zone
IS5	Public transport vehicles for travellers and merchandise per inhabitant in coastal zone
1S6	Ratio of peak season tourism employment to low season tourism employment
IS,	Percentage of beach area without security devices in coastal zone
1S8	Number of crimes and misdemeanours made at provincial level
IE,	Total number of tourist arrivals in coastal zone
1E2	Daily average expenditures of sun and beach tourists
IE3	Ratio of peak month tourists to low month tourists
1E4	Occupancy rate for official accommodations
IE5	Ratio of average peak season occupancy rate to average low season occupancy rate for official accommodations
1E6	Percentage of official tourism accommodation establishments which open all year
1E7	Ratio of tourism employment to total employment in coastal zone
IE8	Public investments in coastal issues (access, beaches, dunes, defence of coasts, boardwalk, etc.)
IE <i>N</i> _i	Number of tourists per square metre of beaches in coastal zone
IE <i>N</i> ₂	Number of peak season tourists per square metre of beaches in coastal zone
1EN3	Waste volume produced by destinations in coastal zone
IE <i>N</i> ₄	Volume of glass recycled in coastal zone
IE <i>N</i> ₅	Percentage of energy consumption attributed to tourism in coastal zone
1EN6	Percentage of renewable energy consumption attributed to tourism with respect to total energy consumption in coastal zone
ien7	Consumption of urban supplying water attributed to tourism in coastal zone
1ENS	Volume of water reused in coastal zone
ien9	Volume of sewage from coastal zone receiving treatment
IE <i>N</i> ₁₀	Percentage of coastal zone considered to be in eroded state
IE <i>N</i> _{,,}	Percentage of beach area considered to be in high urbanization state in coastal zone
1EN,2	Percentage of sampling points with good sanitary qualification in coastal zone
IE <i>N</i> ₁₃	Percentage of beach area with Blue Flag Status in coastal zone
IE <i>N</i> ₁₄	Percentage of beach area with cleaning services in coastal zone
ien15	Percentage of beach area considered to be protected natural area
IE <i>N</i> ₁₆	Percentage of beach area considered to be in high occupation state

Fig. 3. The system of indicators for the management of coastal areas in Spain [Blancas et al., 2010].

	Dimension	Sign	Evaluation	Weights	
				Dimensional indicator	Global indicator
	Social	Negative	Ratio	0.45586565	0.29421696
	Social	Negative	Ratio	0.49687318	0.32666778
	Social	Positive	Ratio	0.45274317	0.36153059
	Social	Positive	Ratio	0.17682503	0.09788285
	Social	Positive	Ratio	0.36534153	0.0000000
	Social	Negative	Ratio	0.47187854	0.29118418
	Social	Negative	Ratio	0.46075286	0.34952417
	Social	Negative	Direct	0.27440457	0.17793289
	Economic	Positive	Direct	0.35772993	0.0000000
	Economic	Positive	Direct	0.35363137	0.1 1079893
	Economic	Negative	Ratio	0.38398697	0.33362752
	Economic	Positive	Direct	0.33143275	0.0000000
	Economic	Negative	Ratio	0.31438924	0.0000000
	Economic	Positive	Ratio	0.36077562	0.30732436
	Economic	Positive	Ratio	0.36277091	0.25679136
	Economic	Positive	Direct	0.22053323	0.0000000
	Environmental	Negative	Ratio	0.27423134	0.0000000
	Environmental	Negative	Ratio	0.28765545	0.0000000
	Environmental	Negative	Direct	0.35384008	0.35243375
	Environmental	Positive	Direct	0.3608693	0.35229804
	Environmental	Negative	Indirect	0.34070902	0.31265639
	Environmental	Positive	Indirect	0.35030569	0.3232296
	Environmental	Negative	Indirect	0.35564388	0.36325468
	Environmental	Positive	Indirect	0.34116796	0.35522928
	Environmental	Positive	Indirect	0.34869441	0.35437199
	Environmental	Negative	Ratio	0.28742937	0.17668611
	Environmental	Negative	Ratio	0.30114243	0.27347287
	Environmental	Positive	Ratio	0.14037287	0.0000000
	Environmental	Positive	Ratio	0.34862475	0.25777471
	Environmental	Positive	Ratio	0.23627416	0.31907938
	Environmental	Positive	Ratio	0.20579491	0.16881199
	Environmental	Negative	Ratio	0.31405974	0.0000000

information and analytical systems that go beyond the SDI concept and are called geospatial ecosystems. The metaphor “ecosystem” in this case conveys the fundamental concept of a dynamic, complexly organized, stable, adaptive multi-user geoinformation environment [Strobl, 2021; Shao et al., 2012]. The transition from SDI to a geospatial ecosystem is driven by a continuous increase in the volume of generated spatial information, an increase in the number of platforms and services based on geodata, and the emergence of new challenges in data management, including in the field of data protection and cybersecurity.

Conclusions

Thus, summarizing the experience of different countries in ensuring sustainable development of territories with digital information, we can note the following:

1. Currently, different countries have accumulated a wide experience in the development of information systems for sustainable management of territories. The spatial data infrastructures that underlie these systems can be organized in different ways depending on the tasks, functionality and characteristics in a particular area.
2. State participation is one of the most important aspect of the functioning of territorial management systems. Public authorities can support the collection and aggregation of data in a single information space, protect data and coordinate access to data, and act as data users.
3. The composition of datasets uploaded to the information system depends on various features of the territory and may include, in addition to information from official sources, data provided by the population (Volunteered geographic information). Initial statistical data can be supplemented with aggregated indicators, for example, any estimated indices and indicators.
4. One of the most effective is the spatial data infrastructure, organized in the form of a geoportal. However, the increasing complexity of SDI functions and the constant increase in data has led to the emergence of a new

paradigm in geoinformatics: the concept of “geospatial ecosystem”, which is a complex adaptive multi-user data model.

5. The main directions of development of systems designed to support the management of territories may be the processes associated with the transition from ISD to geospatial ecosystems, including increasing the versatility and expanding the range of tasks to be solved, the transition to multiscale, improving the ability to update data, complicating the functions of data analysis, visualization information and its protection.

ACKNOWLEDGEMENT

The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation (project № 20-47-01001).

References

1. Acharya, P.S. and Pandey, S., 2018. National Spatial Data Infrastructure India (NSDI-India) — Present Status and the Future Strategies. In *Geospatial Infrastructure, Applications and Technologies: India Case Studies* (p. 7–16). Springer, Singapore.
2. Agbaje, G.I. 2008. National Geospatial Data Infrastructure (NGDI): An Enabler for Socio-Economic Improvement in Nigeria. In *GSDI 10 International Conference for Spatial Data Infrastructure*, University of West Indies, Trinidad, 25-29 February, 2008. (www.gsdi.org/gsdi10/papers/TS46.5paper.pdf), p 8.
3. Alshehri, Saad Abdulrahman F. “National spatial data infrastructure collaboration for the Kingdom of Saudi Arabia” PhD diss., University of Nottingham, 2011.
4. Blancas, F.J., González, M., Lozano-Oyola, M. and Perez, F., 2010. The assessment of sustainable tourism: Application to Spanish coastal destinations. *Ecological Indicators*, 10(2), p. 484-492.
5. Borón, V., Payán, E., MacMillan, D. and Tzanopoulos, J., 2016. Achieving sustainable development in rural areas in Colombia: Future scenarios for biodiversity conservation under land-use change. *LandUsePolicy*, 59, p. 27–37.
6. Burja C, Burja V. SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF RURAL

- AREAS: A CHALLENGE FOR ROMANIA. Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ). 2014 Aug 1;13(8).
7. Ciski, M., Rzaşa, K., & Ogryzek, M. (2019). Use of GIS Tools in Sustainable Heritage Management — The Importance of Data Generalization in Spatial Modeling. *Sustainability*, 11(20), 5616.
 8. Dudin M. N., Ivashchenko N. P. World experience and trends of innovative development of the Arctic territories // *MIR (Modernization. Innovations. Development)*. 2015. T. 6. №. 4–1 (24).
 9. El-Hallaq, M. A., Alastal, A. I., & Salha, R. A. (2019). Enhancing Sustainable Development through Web Based 3D Smart City Model Using GIS and BIM. Case Study: Sheikh Hamad City. *Journal of Geographic Information System*, 11(03), 321.
 10. Galli, A., Đurović, G., Hanscom, L. and Knežević, J., 2018. Think globally, act locally: Implementing the sustainable development goals in Montenegro. *Environmental science & policy*, 84, p. 159–169.
 11. Gamez MR, Perez AV, Falcones VA, Bazurto JJ. The geoportal as strategy for sustainable development. *International journal of physical sciences and engineering*. 2019 Jan 8;3(1):10–21.
 12. Giuliani, G., Mazzetti, P., Santoro, M., Nativi, S., Van Bemelen, J., Colangeli, G., & Lehmann, A. (2020). Knowledge generation using satellite earth observations to support sustainable development goals (SDG): A use case on Land degradation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 88, 102068.
 13. Goodchild, M. (2007). Citizens as sensors: The world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69, 211–221.
 14. Klimach, A., Dawidowicz, A. and Żróbek, R., 2018. The Polish land administration system supporting good governance. *Land Use Policy*, 79, p. 547-555.
 15. Kolbovsky E. Yu., Bragin P. N., Medovikova U. A. Geographical information systems for landscape management in territories of outstanding natural and historical value // *Yaroslavl Pedagogical Bulletin*. 2012. Vol. 3. No 4.
 16. Koshkarev A.V. Problems of the formation of Russian IPD. Materials of the International conference “InterCarto. InterGIS». 2014; 20:145-159.
 17. Manning DB, Bemmman A, Bredemeier M, Lamersdorf N, Ammer C, editors. *Bioenergy from dendromass for the sustainable development of rural areas*. John Wiley & Sons; 2015. Nov 16.
 18. Mhangara, P., Lamba, A., Mapurisa, W., & Mudau, N. (2019).

- Towards the Development of Agenda 2063 Geo-Portal to Support Sustainable Development in Africa. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(9), 399.
19. Moussiopoulos, N., Achillas, C., Vlachokostas, C., Spyridi, D. and Nikolaou, K., 2010. Environmental, social and economic information management for the evaluation of sustainability in urban areas: A system of indicators for Thessaloniki, Greece. *Cities*, 27(5), p. 377–384.
 20. Palya, T., Mihály, S., Remetey-Fülöpp, G., Zentai, L. Hungarian GIS Data for the Sustainable Development Goals, Conference EFGS, 2018, Helsinki. Web Resource: https://www.researchgate.net/profile/Tamas_Palya/publication/328232743_Hungarian_GIS_data_for_sustainable_development_goals/links/5bc05346a6fdcc2c91f71f45/Hungarian-GIS-data-for-sustainable-development-goals
 21. Samsudin, S., Lim, L.C. and McCluskey, W., 2011. A review of organizational arrangements in Malaysia land administration system towards good governance: issues and challenges. In *FIG Working Week* (pp. 18–22).
 22. Shao, J., Kuk, G., Anand, S., Morley, J.G., Jackson, M.J. and Mitchell, T., 2012. Mapping collaboration in open-source geospatial ecosystem. *Transactions in GIS*, 16(4), p. 581–597.
 23. Sinnott, R.O., Galang, G., Tomko, M. and Stimson, R., 2011, December. Towards an e-infrastructure for urban research across Australia. In *2011 IEEE Seventh International Conference on eScience* (pp. 295–302). IEEE.
 24. Strobl, J. (2021). Spatial Data Infrastructure (SDI) ist tot, es lebe das Geospatial Ecosystem!. *GIS-Business*. 16. P. 45–46.
 25. Tan, Y., Xu, H. and Zhang, X., 2016. Sustainable urbanization in China: A comprehensive literature review. *Cities*, 55, p. 82–93.
 26. Wang H., Pan Y., Luo X. Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: A review and bibliometric analysis // *Automation in Construction*. 2019. T. 103. P. 41–52.
 27. Xiao, W., Mills, J., Guidi, G., Rodríguez-González, P., Barsanti, S. G., & González-Aguilera, D. (2018). Geoinformatics for the conservation and promotion of cultural heritage in support of the UN Sustainable Development Goals. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 142, 389–406.
 28. Zolfani, Sarfaraz Hashemkhani, and Edmundas Kazimieras Zavadskas. "Sustainable development of rural areas' building structures based on local climate." *Procedia Engineering* 57 (2013): 1295–1301.

Received September 20, 2021,
accepted for publication November 20, 2021.

About authors

Chereshnya Olga Yurievna, Received September 20, 2021, accepted for publication November 20, 2021. PhD, senior scientific researcher, Integrated Mapping Laboratory, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia chereshnya.o@yandex.ru

De Maeyer Philippe,
Faculty of Sciences, Department of Geography Research group CartoGIS, Krijgslaan 281 (S8), 9000 Gent, Belgium. +32 (0)9 264 46 88. philippe.demaeyer@ugent.be

Gribok Marina Vladimirovna,
PhD, scientific researcher, Integrated Mapping Laboratory, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia. gribok.marina@gmail.com

Milleville Kenzo,
Faculty of Sciences, Department of Geography Research group CartoGIS, Krijgslaan 281 (S8), 9000 Gent, Belgium. kenzo.milleville@ugent.be

Tikunov Vladimir Sergeevich,
Doctor of Geographical Sciences, Professor of the Department of World Economy Geography, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University and Sevastopol State University, Scopus ID: 7004523729, Researcher ID: M-1475-2015, Phone: +7 (045) 939-13-39. E-mail: vstikunov@yandex.ru

Dr. Samuel Van Ackere,
Postdoctoral researcher, Faculty of Sciences, Department of Geography Research group CartoGIS, Krijgslaan 281 (S8), 9000 Gent, Belgium. samuel.vanackere@ugent.be

Van de Weghe Nico,
Faculty of Sciences, Department of Geography Research group CartoGIS, Krijgslaan 281 (S8), 9000 Gent, Belgium. +32 (0)9 264 47 12, nico.vandeweghe@ugent.be

25.00.24
УДК: 314.04; 314.7

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, ПОЛИТИЧЕСКАЯ
И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ (ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ НАУКИ)

**Белозеров В.С.,
Щитова Н.А.,
Соловьев И.А.**

ФГАОУ ВО
«Северо-Кавказский федеральный университет»,
г. Ставрополь, Россия

ДЕМОГРАФИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ В СЕВЕРО-КАВКАЗСКОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ

Doi: 10.37493/2308-4758.2021.4.5

Введение.

СКФО на фоне России выделяется благоприятной демографической ситуацией, что выражается в росте численности населения, более молодой возрастной структуре и относительно повышенных коэффициентах суммарной рождаемости. Одновременно округ теряет население в миграционном обмене с другими территориями России. Вместе с тем, очевидно, что демографическая ситуация в разных субъектах и даже разных поселениях складывается неодинаково. Целью данного исследования является выявление территориальных особенностей демографического развития СКФО.

Материалы и методы исследований.

Информационной основой исследования являются данные официальной статистики на уровне регионов и городов-ядер городских агломераций СКФО. В качестве основного метода исследования использовался графо-картографический и статистический пространственный анализ.

Результаты исследований и их обсуждение.

Выявлены региональные особенности современной динамики численности населения СКФО, региональная специфика изменения основных показателей воспроизводства населения: коэффициентов естественного прироста/убыли, миграционного прироста/убыли, общих коэффициентов рождаемости, смертности, суммарной рождаемости, возрастной структуры. Важной составляющей исследования является рассмотрение влияния пандемии на демографические процессы. Установлена роль миграционных процессов в демографическом развитии регионов.

Выводы.

По демографическому развитию регионы СКФО разделяются на три группы. В первую группу входят регионы с устойчивым ростом численности населения, преимущественно за счет естественного прироста (республики восточной части округа). Во вторую группу входят республики, в которых прирост населения, практически прекратился. К третьей группе относятся регионы с заметным снижением численности населения, обусловленной, как естественной, так и миграционной убылью. Во всех регионах преобладает миграционный отток. Наибольшие темпы оттока населения характерны для республиканских северокавказских столиц, а региональный центр равнинного Ставрополя сохраняет пока миграционную привлекательность. Пандемия COVID-19 нанесла ущерб демографическому развитию, но ее последствия выражены в округе менее критично, по сравнению с другими российскими территориями.

Ключевые слова:

демографическое развитие, миграционные процессы, естественное воспроизводство населения, Северо-Кавказский федеральный округ, территориальные особенности демографических процессов.

V.S. Belozarov,
N.A. Shchitova,
I.A. Soloviev

North Caucasus Federal University,
Stavropol, Russia

Demographic Situation in the North Caucasian Federal District

- Introduction.** The North Caucasus Federal District stands out against the background of Russia with a favorable demographic situation, which is reflected in population growth, a younger age structure and relatively higher total fertility rates. At the same time, the district is losing population in migration exchange with other territories of Russia. At the same time, it is obvious that the demographic situation in different subjects and even different settlements is not the same. The purpose of this study is to identify the territorial features of the demographic development of the North Caucasus Federal District.
- Materials and research methods.** The informational basis of the study is the data of official statistics at the level of regions and cities-cores of urban agglomerations of the North Caucasus Federal District. Graphical-cartographic and statistical spatial analysis was used as the main research method.
- Research results and their discussion.** The regional features of the modern dynamics of the population of the North Caucasus Federal District, the regional specificity of changes in the main indicators of population reproduction: the coefficients of natural growth / decline, migration growth / decline, general fertility rates, mortality, total fertility, and age structure are revealed. An important component of the study is to consider the impact of the pandemic on demographic processes. The role of migration processes in the demographic development of regions has been established.
- Conclusions.** By demographic development, the regions of the North Caucasus Federal District are divided into three groups. The first group includes regions with stable population growth, mainly due to natural growth (republics in the eastern part of the okrug. The second group includes republics in which population growth has practically stopped. migration outflow predominates in all regions. the district is less critical than other Russian territories.
- Key words:** demographic development, migration processes, natural reproduction of the population, the North Caucasus Federal District, territorial features of demographic processes.

Введение

Северо-Кавказский федеральный округ – самый маленький по площади и предпоследний по численности населения округ в России, однако плотность населения здесь наиболее высокая (почти такая же как и в ЦФО), и – это единственный округ, в котором сохраняется положительный естественный прирост и отмечается рост численности населения. За 2020 г. численность населения округа увеличилась на 0,37 % (36,4 тыс. чел.), при этом в России она

сократилась на 577,6 тыс. чел. или 0,39%. Регионы округа лидируют в стране по показателю средней ожидаемой продолжительности жизни, обладая при этом более сбалансированной возрастной структурой населения с относительно повышенной долей детей (за исключением Ставропольского края). В целом в постсоветской России регионы СКФО рассматривались как некий «остров демографического благополучия». Однако, нельзя не отметить, что негативные демографические тенденции, характерные для большей части страны, начинают обнаруживаться и в СКФО. Прежде всего, это проявляется в замедлении темпов естественного воспроизводства и усиливающемся расслоении входящих в округ регионов по характеру протекания демографических процессов. Одновременно, существенные коррективы в региональное демографическое развитие вносит распространение пандемии коронавирусной инфекции. Анализ территориальных особенностей демографической ситуации позволяет установить ее основные современные тренды и специфические черты.

Материалы и методы исследования

Работа основывается на материалах официальной статистики, а основным методом исследования является картографический и статистический пространственный анализ. В ходе исследования рассматривались абсолютные и относительные показатели демографического развития.

Накоплен значительный опыт исследования демографических и миграционных процессов в СКФО. На макрорегиональном уровне эта проблематика рассматривалась В.С. Белозеровым, С.В. Рязанцевым, Н.В. Мкртчяном, И.А. Соловьевым [3, 5, 7, 8, 9] и др. Имеются публикации, отражающие своеобразие демографического развития отдельных регионов, например, А.Д. Бадова по Северной Осетии [1], Ш.С. Мудуева и др. по Дагестану [6]. Сравнительный анализ динамики демографических и миграционных параметров в контексте общероссийских тенденций представлен в работах В.С. Белозерова, Н.А. Щитовой, А.А. Черкасова, Н.В. Сопнева [12, 14]. Демографическое развитие городских агломераций СКФО обсуждается в ряде статей В.С. Белозерова, Н.А. Щитовой, И.А. Соловьева и В.В. Чихичина [10, 11, 16].

Результаты и их обсуждение

За последние 15 лет численность населения в округе выросла на 934 тыс. чел. или 10,4%. Однако, во втором десятилетии по сравнению с началом XXI в. ежегодные темпы прироста численности снижаются (табл. 1). По характеру динамики численности населения регионы СКФО заметно дифференцированы и делятся на три группы. В первую группу входят регионы с продолжающимся приростом численности населения: в Дагестане на 22,5 тыс. чел. (0,7%), в Чеченской Республике на 19,3 тыс. чел. (1,3%), в Ингушетии на 8,5 тыс. чел. (1,7%). Вторую группу представляют регионы, в которых отмечается либо низкий прирост населения (например, в Кабардино-Балкарской Республике прирост составил 0,9 тыс. чел. или 0,1%), либо наметилось некоторое сокращение численности населения (так, в Карачаево-Черкесской Республике сокращение составило 0,2 тыс. чел. или 0,04%). В третью группу входят регионы с существенным снижением численности населения – Ставропольский край на 10,8 тыс. чел. (0,4%), Северная Осетия – Алания – на 3,8 тыс. чел. (0,5%).

Изменение численности населения тесно коррелирует с показателями естественного прироста. В целом в СКФО естественный прирост остается положительным, но снизился с 8,7‰ в 2010 г. до 4,7‰ в 2020 г. (табл. 1). При этом в регионах первой группы наблюдается высокий естественный прирост, который превышает показатели по округу в 2,5–3,8 раза, в частности, в Чечне коэффициент естественного прироста составляет – 13,7‰, в Ингушетии – 12,4 ‰, в Дагестане – 8,7‰. В регионах второй группы показатели естественного прироста заметно ниже – в Кабардино-Балкарии – 2,0‰, Карачаево-Черкесии – 0,2‰, в регионах третьей группы естественный прирост имеет отрицательные значения: Ставропольский край – 3,3‰, Северная Осетия – Алания – 0,5‰ (рис. 1).

Демографическая ситуация в городах СКФО, особенно в столичных центрах, которые являются городами-ядрами городских агломераций (Ставропольская, Грозненская, Махачкалинская, Владикавказская) отличается от ситуации в регионе. В частности, в Ставрополе естественный прирост хотя и снизился, но остается слабоположительным. В Грозном и Махачкале коэффициент естествен-

Таблица 1. ДИНАМИКА ДЕМОГРАФИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В СКФО [4, 13, 15]
Table 1. Dynamics of demographic indicators in the North Caucasus Federal District [4, 13, 15]

Показатели	2005 г.	2010 г.	2019 г.	2020 г.
Численность населения (чел.)	9 015 683	9 396 111	9 898 841	9 949 117
Темпы прироста численности населения (%)	0,4	4,6	10,2	10,8
Суммарный коэффициент рождаемости	1,64	1,99	1,78	1,82
Естественный прирост (чел.)	40 421	82 031	62 418	46 497
Коэффициент естественного прироста (‰)	4,5	8,7	6,3	4,7
Миграционный прирост (чел.)	-12 634	-14 300	1 767	-9 091
Коэффициент миграционного прироста (‰)	-14,0	-15,2	1,8	-10,2

Примечание: Численность населения – в среднем за год;
ЕП – коэффициент на 1 тыс. чел.;
МП – коэффициент на 10 тыс. чел.;
Темпы прироста численности населения – отчетный год 2004 г., в %.

Таблица 2. ДЕМОГРАФИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ В ГОРОДАХ-ЯДРАХ ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЙ СКФО, 2019–2020 гг. [2, 10]
Table 2. Demographic situation in the core cities of urban agglomerations of the North Caucasus Federal District, 2019–2020 [2, 10]

Города-ядра городских агломераций СКФО	Естественный прирост				Миграционный прирост			
	2019 г.		2020 г.		2019 г.		2020 г.	
	Чел.	‰	Чел.	‰	Чел.	‰	Чел.	‰
Ставрополь	918	2,1	21	0,1	12365	28,27	3994	8,86
Владикавказ	487	1,6	-30	-0,1	-1830	-6,0	-1647	-5,42
Грозный	4910	16,3	3543	10,9	-508	-1,69	-663	-2,17
Махачкала	3667	6,1	3560	5,9	-1178	-1,96	-1910	-3,16



Естественный прирост на 1000 чел. (‰)

убыль



прирост



Рис. 1.

Естественный прирост населения в регионах СКФО в 2020 г.
Fig. 1. Natural population growth in the regions of the North Caucasus Federal District in 2020.

Таблица 3. СУММАРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ РОЖДАЕМОСТИ, 2020 г. [13]
Table 3. Total fertility rate, 2020 [13]

	Суммарный коэффициент рождаемости, 2020 г.
Российская Федерация	1,51
Северо-Кавказский федеральный округ	1,82
Республика Дагестан	1,87
Республика Ингушетия	1,85
Кабардино-Балкарская Республика	1,64
Карачаево-Черкесская Республика	1,53
Республика Северная Осетия – Алания	1,46
Чеченская Республика	2,57
Ставропольский край	1,43

ного прироста ниже, чем в целом по республикам. Исключением является Владикавказ, где, как и в республике, отмечается отрицательный естественный прирост (табл. 2).

Суммарный коэффициент рождаемости (СКР) в СКФО (как наиболее репрезентативный показатель естественного воспроизводства), значительно превышает общероссийский показатель (1,82 против 1,51), но заметно различается по его регионам. Самый высокий СКР отмечается в Чеченской Республике – 2,5, в других республиках СКР превышает общероссийский показатель, но не дотягивают до простого воспроизводства, и колеблется от 1,53 в Карачаево-Черкесии до 1,87 в Дагестане. Ниже общероссийского показателя СКР отмечается в Ставропольском крае и Северной Осетии (табл. 3).

Возрастная структура населения в округе относительно благоприятна и отличается более высокой долей детей (0–14 лет) – 22 %, а в России – 18 %). Существенно выделяется по этому показателю Чеченская Республика – здесь почти треть населения составляют дети (31 %). В других республиках доля детей меньше, но все же

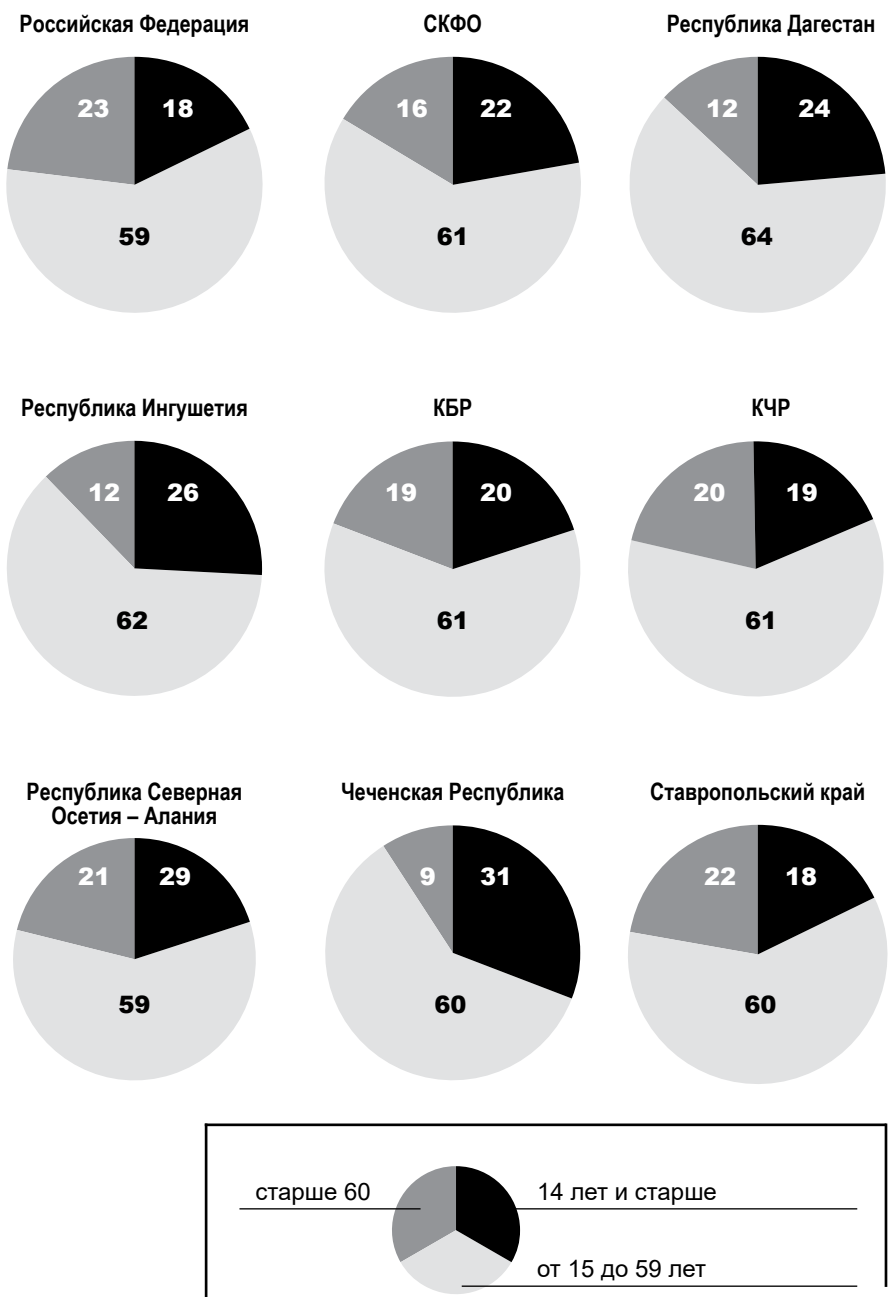


Рис. 2. Возрастная структура населения в %, 2020 г.
Fig. 2. Age structure of the population, %, 2020.

выше, чем в большинстве российских регионов. Исключение составляет Ставропольский край, возрастная структура населения которого аналогична общероссийской (рис. 2).

В 2020–2021 гг. демографические процессы заметно трансформировались под влиянием известных эпидемиологических факторов. По данным за 2020 г. и январь–август 2021 г. демографическая ситуация в регионах СКФО, как и по всей России, ухудшилась за счет роста смертности. Общий коэффициент смертности увеличился по округу в целом с 8,2‰ (январь–август 2020 г.) до 9,0‰ в 2021 году за тот же период. Наибольший рост (с 13,2 до 15,5‰) отмечался в пяти регионах (Ингушская Республика, Кабардино-Балкарская Республика, Карачаево-Черкесская Республика, Республика Северная Осетия – Алания, Ставропольский край), что в целом несколько ниже, чем в среднем по России. Показатель естественного прироста в среднем по России сократился почти вдвое (с -3,6‰ до -6,1‰). В СКФО он также снизился, хотя не так стремительно (с 4,9‰ до 3,6‰) и остался положительным. Менее резкие темпы ухудшения демографических показателей в регионах СКФО обусловлены, по всей видимости, уровнем и темпами заболеваемости COVID-19. В регионах СКФО проживают 6,82% населения РФ, в то время как их «вклад» в число заразившихся в стране составляет 3,44%, т.е., практически, в два раза ниже. Доля СКФО по отношению к России в целом по смертности населения также несколько ниже и составляет 4,27%. По числу зараженных на 100 тыс. населения регионы СКФО не входят в число «передовых»: Карачаево-Черкессия занимает 34 место, Ингушетия – 49, Кабардино-Балкария – 65, Северная Осетия – 73, Ставропольский край – 75, Дагестан – 82, Чечня – 83 места. Аналогичный рейтинг и по смертности: КЧР занимает 31 место, Ставропольский край – 45, КБР – 61, СОА – 64, Дагестан – 66, Ингушетия – 74, Чечня – 82.

СКФО традиционно входит в число регионов – «миграционных доноров». В 2020 году отрицательное сальдо миграции в округе составило 9,1 тыс. чел. По абсолютным показателям СКФО уступает ряду других округов России. В частности, Сибирскому ФО (отрицательное сальдо миграции 24,5 тыс. чел.) Дальневосточному ФО (отрицательное сальдо миграции – 19,9 тыс. чел.), Приволж-



Миграционный прирост на 1000 чел. (%)

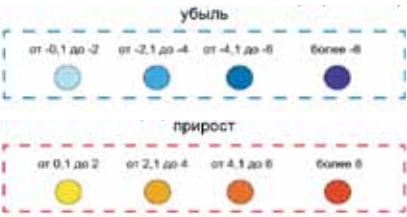


Рис. 3. Миграционный прирост населения в регионах СКФО, 2020 г. [4, 15].
Fig. 3. Migration population growth in the regions of the North Caucasus Federal District, 2020 [4, 15].

скому ФО (20,5 тыс. чел.). По относительным показателям среди федеральных округов, теряющих население, СКФО занимает третье место (коэффициент миграционного прироста (-0,91‰), после Дальневосточного ФО (-2,45‰) и Сибирского ФО (-1,44‰). Высокие показатели миграционной убыли населения из регионов СКФО обусловлены демографическими и социально-экономическими факторами, в первую очередь, сочетанием роста численности трудоспособного населения и слабо развитым рынком труда. Прослеживаются различия в величине миграционной убыли между разными регионами. Наибольшая величина отрицательного сальдо миграции в 2020 году отмечалась в Дагестане (4,5 тыс. чел. и Северной Осетии – Алании (3,3 тыс. чел.). Примерно одинаковый отток наблюдался в Чеченской Республике (1,2 тыс. чел.) и Ставропольском крае (1,1 тыс. чел.). Более низкие показатели обнаружены в Карачаево-Черкессии (0,24 тыс. чел.) и Кабардино-Балкарии (0,9 тыс. чел.). Исключением является Ингушетия, где традиционно (уже в течение нескольких лет) фиксируется положительный миграционный прирост 2,1 тыс. чел. (возможно, что такие цифры являются «погрешностью» статистического учета). Отрицательный коэффициент сальдо миграции колеблется от -4,76‰ в Северной Осетии – Алании до -0,39‰ в Ставропольском крае при среднем по округу в целом -0,91‰ (рис. 3).

Анализируя современную миграционную ситуацию, необходимо отметить, что, если в постсоветский период северокавказские республики стабильно отдавали избыток населения, то в 1990-е гг. в Ставропольском крае концентрировался значительный миграционный приток, достигавший более 40 тыс. чел. в год (или 11,4 % общероссийского миграционного прироста). Край входил в первую пятерку российских регионов по числу приема вынужденных мигрантов. Передовые позиции по приёму мигрантов сохранялись и в первые годы XXI в. (входил в число 10 регионов страны по масштабам миграционного прироста). Но в последние 4–5 лет миграционный прирост становится отрицательным.

Важным показателем, влияющим на демографическую структуру населения, является возрастная структура миграционного прироста. Миграционный отток из округа в 2020 году составило 9091

чел., при этом доля молодежи (15–39 лет) составила почти 60%. Возрастная структура миграционного оттока имеет региональные особенности. В Дагестане миграционный отток более чем на 47% формируется за счет возрастной группы 15–39 лет, при этом 33,0% приходится на молодежь в возрасте 15–29 лет. В Республике Северная Осетия-Алания доля молодежи в возрасте 15–39 лет в отрицательном миграционном приросте составляет 44,3%, одновременно повышена доля старших возрастов – 40–49 лет – 11,6%, 50–59 лет – 11,1%, старше 60-ти лет – 15,1%.

В Чеченской Республике на фоне общего отрицательного миграционного прироста в двух возрастных группах -15–19 и 20–24 года миграционный прирост положительный. Активный отток отмечается в когортах 25–29 и 30–34 года (соответственно 17,8 и 9,0), а также в более старших возрастных группах -40–44 года, 45–49 и 50–59 лет 10,7, 12,6, 13,3% соответственно. В Ставропольском крае отрицательное сальдо миграции формируется за счет молодежи в возрасте 15–19 лет (33,6%), 20–24 года (11,6%) и 25–29 лет (29,7%). В целом на эти возрастные группы приходится 78,5% миграционных потерь. Эта особенность сохраняется уже почти десять лет. Таким образом, Ставрополье теряет наиболее активное и мобильное население, среди которого основную часть составляют выпускники школ, средних специальных и высших учебных заведений.

Направленность миграционных процессов в наиболее крупных городах – центрах агломераций не совпадает с общерегиональными тенденциями. В республиканских столицах коэффициент отрицательного сальдо миграции превышает средние показатели по субъектам. В Ставрополе, наоборот, все еще отмечается приток населения при отрицательном сальдо миграции по краю [2].

Выводы

Подводя итоги, следует отметить, что в целом СК-ФО сохраняет свое демографическое преимущество, продолжая накапливать избыток людских ресурсов и поставляя их в другие регионы страны. Вместе с тем, очевидно нарастание пространственного демографического неравенства. Тенденция «сжатия» воспроизводственных процессов проявляется во всех регионах, но с

разной силой. В восточных северокавказских республиках, прежде всего в Чеченской республике, а также Ингушетии и Дагестане продолжается рост численности населения за счет естественного прироста. Здесь же наблюдаются самые высокие в стране показатели суммарной рождаемости. Повышена доля молодых возрастов. Однако, динамика всех показателей за последние десять лет нисходящая. В республиках с похожей этнической структурой – Кабардино-Балкарии и Карачаево-Черкессии аналогично действие тенденции демографического сжатия: рост населения приостановился, естественный прирост имеет слабо положительные значения, показатели суммарного коэффициента рождаемости незначительно превышают среднероссийские. Доля молодых возрастов несколько повышена, но ниже, чем у восточных соседей. Ставропольский край и Северная Осетия демонстрируют наихудшие демографические результаты. Численность населения начала сокращаться, естественный прирост отрицательный, суммарная рождаемость ниже среднероссийской. Возрастная структура приближается к средней по России.

Негативные демографические последствия распространения новой коронавирусной инфекции сказались в СКФО, однако несколько слабее, чем во многих других российских регионах.

Миграционная убыль характерна для всех регионов СКФО, кроме Ингушетии. Наибольшие показатели отрицательного сальдо миграции фиксируются в Северной Осетии, наименьшие – в Ставропольском крае. Миграционный отток из республик формируется, преимущественно, за счет трудоспособного населения, но около 10–12 % составляют лица старших возрастов. Из Ставропольского края уезжает население моложе 30 лет (около 79% всего миграционного оттока), т.е. край теряет наиболее перспективную возрастную группу, что, безусловно, требует принятия соответствующих управленческих решений и разработки адекватных мер региональной демографической политики.

Обнаружена специфика демографического развития наиболее значимых городов СКФО, являющихся центрами городских агломераций. Наибольшие успехи характерны для растущего за счет небольших, но положительных величин естественного и миграци-

онного прироста Ставрополя, развивающегося по традиционному южнороссийскому сценарию. В республиканских городах-ядрах отмечаются более низкие показатели естественного прироста и более высокие показатели миграционной убыли по сравнению со среднерегionalными. Видимо, демографический переход, в который вступают северокавказские этносы, совпадает с их первичной урбанизацией. В республиканских столицах концентрируется более мобильные и активные слои населения, вырабатывающие новые модели демографического поведения.

Благодарности

**Исследование выполнено при финансовой поддержке
РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00386 А.**

Библиографический список

1. Бадов А.Д. Геодемография Северной Осетии. Владикавказ: Изд-во СОГУ, 2013. 432 с.
2. База данных показателей муниципальных образований [электронный ресурс]. URL: <https://www.gks.ru/dbscripts/munst/> (Дата обращения: 12.02.2021 г.).
3. Белозеров В.С. Этнодемографические процессы на Северном Кавказе. Ставрополь: Изд-во СГУ, 2000, 156 с.
4. Миграционный прирост населения по полу, возрасту и потокам передвижения в 2020 г. // Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/12781> (Дата обращения: 02.11.2021).
5. Мкртчян Н.В. Миграция на Северном Кавказе сквозь призму несовершенной статистики // Журнал исследований социальной политики, 2019. №1. С. 7–22.
6. Мудуев Ш.С. Население и хозяйство Дагестана на рубеже веков. Махачкала: Даг. кн. изд-во, 2003. 304 с.
7. Рязанцев С.В. Современный демографический и миграционный портрет Северного Кавказа. Ставрополь: Изд-во «Сервисшкола», 2003, 376 с.
8. Соловьев И.А. Региональные особенности миграционных процессов на Северном Кавказе // Географический вестник, 2018. № 1 (44). С. 49–55.
9. Соловьев И.А. Региональные особенности современных

- миграционных процессов на Северном Кавказе: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Ставрополь, 2004, 23 с.
10. Соловьев И.А., Белозеров В.С., Щитова Н.А. Демографическое развитие городских агломераций Северного Кавказа // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2020. Т. 6. № 3. С. 268–278.
 11. Соловьев И.А., Чихичин В.В., Щитова Н.А. Динамика миграционных процессов в городах-ядрах агломераций Европейской России // Развитие регионов в XXI веке. Материалы III Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией А.У. Огоева. Владикавказ, 2021. С. 193–201.
 12. Сопнев Н.В., Белозеров В.С. Миграционные процессы в региональных столицах Юга Европейской России // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2021. Т. 7. № 2. С. 176–191.
 13. Суммарный коэффициент рождаемости // ЕМИСС. Государственная статистика. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/43697> (Дата обращения: 02.11.2021)
 14. Черкасов А.А., Белозеров В.С., Щитова Н.А., Сопнев Н.В. Геоинформационный мониторинг демографических процессов в регионах Юга Европейской России // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2020. Т. 26. № 1. С. 127–140.
 15. Численность населения Российской Федерации по полу и возрасту // Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13284> (Дата обращения: 02.11.2021).
 16. Щитова Н.А., Белозеров В.С., Соловьев И.А. Концепция исследования демографического развития городских агломераций (на примере агломераций Европейской России) // Наука. Инновации. Технологии. 2020. № 4. С. 125–136.

References

1. Badov A.D. Geodemography of North Ossetia. Vladikavkaz: Publishing house of SOGU, 2013. 432 p.
2. Database of indicators of municipalities [Electronic resource]. URL: <https://www.gks.ru/dbscripts/munst/> (Accessed: 12.02.2021).

2. Belozеров V.S. Ethno-demographic processes in the North Caucasus. Stavropol: SSU Publishing House, 2000, 156 p.
3. Migration population growth by sex, age and traffic flows in 2020 // Federal State Statistics Service [Electronic resource]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/12781> (Accessed: 02.11.2021)
4. Mkrtchyan N.V. Migration in the North Caucasus through the prism of imperfect statistics // Journal of Social Policy Research, 2019. No. 1. P. 7–22.
5. Muduev Sh.S. The population and economy of Dagestan at the turn of the century. Makhach-kala: State Unitary Enterprise “Dag. Book. Publishing house “, 2003. 304 p.
6. Ryazantsev S.V. Modern demographic and migration portrait of the North Caucasus. Stavropol: Publishing house “Service School”, 2003, 376 p.
7. Soloviev I.A. Regional features of migration processes in the North Caucasus // Geographical Bulletin, 2018. No. 1 (44). Pp. 49–55.
8. Soloviev I.A. Regional features of modern migration processes in the North Caucasus: author. dis Cand. geogr. sciences. Stavropol, 2004, 23 p.
9. Soloviev I.A., Belozеров V.S., Shchitova N.A. Demographic development of urban agglomerations of the North Caucasus // Geopolitics and ecogeodynamics of regions. 2020. Vol. 6. No. 3. Pp. 268–278.
10. Soloviev I.A., Chikhichin V.V., Shchitova N.A. Dynamics of migration processes in the core cities of agglomerations of European Russia // Development of regions in the XXI century. Materials of the III International Scientific and Practical Conference. Under the general editorship of A.U. Ogoeva. Vladikavkaz, 2021. P. 193–201.
11. Sopnev N.V., Belozеров V.S. Migration processes in the regional capitals of the South of European Russia // Scientific notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology. 2021. Vol. 7. No. 2. P. 176–191.
12. Total fertility rate // EMISS. State statistics [Electronic resource]. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/43697> (Accessed: 02.11.2021)
13. Cherkasov A.A., Belozеров V.S., Shchitova N.A., Sopnev N.V. Geoinformation monitoring of demographic processes in the regions of the South of European Russia // InterKarto. Inter-GIS. 2020. Vol. 26. No. 1. P. 127–140.

14. Population of the Russian Federation by sex and age // Federal State Statistics Service [Electronic resource]. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13284> Accessed: 02.11.2021)
15. Shchitova N.A., Belozеров V.S., Soloviev I.A. The concept of researching the demographic development of urban agglomerations (on the example of agglomerations of European Russia) // Science. Innovation. Technologies. 2020. No. 4. P. 125–136.

**Поступило в редакцию 05.10.2021,
принята к публикации 06.12.2021.**

Сведения об авторах

Белозеров Виталий Семенович, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры социально-экономической географии Северо-Кавказского федерального университета, Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, e-mail: vsbelozеров@yandex.ru

Щитова Наталия Александровна, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры социально-экономической географии Северо-Кавказского федерального университета, Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, e-mail: stavgeo@mail.ru

Соловьев Иван Алексеевич, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры социально-экономической географии Северо-Кавказского федерального университета, Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, e-mail: soloivan@mail.ru, тел.: +79054155624

About the authors

Belozеров Vitaly Semenovich – Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the Department of Socio-Economic Geography. North Caucasus Federal University. 355017, Stavropol, 1, Pushkin Street, Russia. E-mail: vsbelozеров@yandex.ru

- Shchitova** Natalia Alexandrovna – Doctor of Geographical Sciences, Professor, Professor of the Department of Socio-Economic Geography.
North Caucasus Federal University.
355017, Stavropol, 1, Pushkin Street, Russia.
E-mail: stavgeo@mail.ru
- Soloviev** Ivan Alexeyevich – Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Socio-Economic Geography.
North Caucasus Federal University.
355017, Stavropol, 1, Pushkin Street, Russia.
E-mail: soloivan@mail.ru

25.00.24
УДК 314.9

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, ПОЛИТИЧЕСКАЯ
И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

**Черкасов А.А.,
Махмудов Р.К.,
Сопнев Н.В.**

ФГАОУ ВО
«Северо-Кавказский федеральный университет»,
г. Ставрополь, Россия
cherkasov_stav@mail.ru

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ГОРОДОВ И АГЛОМЕРАЦИЙ: ИНТЕГРАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ГИС И BIG DATA

Doi: 10.37493/2308-4758.2021.4.6

Введение.

Традиционные источники информации, которые принято использовать для проведения пространственного анализа геодемографических процессов не всегда способны обеспечить обширное представление об эффектах связанных с ростом или сокращением численности населения городов и агломераций. В этой связи для пространственного анализа важное значение приобретают данные, полученные с помощью технологий Big Data. Для решения задачи по обработке и интерпретации больших данных эффективным инструментом являются современные ГИС. ГИС позволяют структурировать данные и производить их визуализацию, таким образом, получая географическую интерпретацию информации. Апробация возможностей применения данных полученных по технологии Big Data, основанная на интеграции с ГИС, а также с использованием традиционных источников информации (госкомстат) проведена на примере городов и городских агломераций Липецка и Ставрополя.

Материалы и методы
исследования.

Для анализа динамики застроенных территорий Липецка и Ставрополя в период с 2000 по 2020 год использованы космические снимки со спутников Sentinel-2 и Landsat-8. Для обработки космических снимков применялись возможности программного обеспечения ScanEx Image Processor. Работа по выделению границ застройки в разные годы проводилась методом обратного дешифрирования. Для анализа плотности населения городов, использовались тепловые карты предоставляемые сервисом Export Base. Оценка стоимости жилых помещений производилась за счет обработки информации, взятой из интернет-сервисов для размещения объявлений (Авито и ЦИАН). В качестве основного геоинформационного инструмента использован Quantum GIS.

Результаты исследования
и их обсуждения.

Апробация интеграционных технологий и методов исследования на примере городов-ядер Липецка и Ставрополя позволила выявить, что демографически благоприятный город Ставрополь имеет более высокие темпы застройки, обладает более высокими ценами на жилую недвижимость. Этот процесс приводит к концентрации населения, в том числе в новых микрорайонах, что не так ярко выражено в депопулирующем Липецке. Пригородные зоны, входящие в получасовую и часовую транспортную доступность в целом сопоставимы по стоимости жилых помещений в рамках обоих агломераций.

Выводы.

Развитие и интеграция технологий сбора, обработки и анализа пространственно-временных данных способствует расширению методического инструментария геодемографических исследований и открывает широкие возможности комплексно подойти к вопросу развития внутри агломерационных и внутригородских процессов. Традиционные источники позволили оценить динамику численности городов, а применение технологии Big Data с интеграцией ГИС раскрыли особенности развития застройки территории городов и пригородов, тепловые карты плотности дали представление об особенностях концентрации населения, в том числе вновь застроенных районах. Анализ стоимости жилья с использованием данных интернет-сервисов для размещения объявлений в центральных городах и их пригородах подтвердили основные тенденции связанные с центральной мест и периферией.

Ключевые слова:

ГИС, Big Data, ДДЗ, Авито, ЦИАН, пространственный анализ, демографическое развитие, Липецк, Ставрополь.

**Cherkasov A.A.,
Maxmudov R.K.,
Sopnev N.V.**

North Caucasus Federal University,
Stavropol,
Russia

Spatial Analysis of Cities and Agglomerations: Integration of GIS and Big Data Technologies

Introduction.

Traditional sources of information that are commonly used for spatial analysis of geodemographic processes are not always able to provide an extensive understanding of the effects associated with the growth or decline in the population of cities and agglomerations. In this regard, data obtained with the help of Big Data technologies are of great help for spatial analysis. Modern GIS is an effective tool for solving the problem of processing and interpreting big data. GIS allows you to structure data and visualize it, thus obtaining a geographical interpretation of information. The approbation of the possibilities of using data corrupted by big data technology, based on integration with GIS, as well as the use of traditional information sources (goskomstat) was carried out on the example of cities and urban agglomerations of Lipetsk and Stavropol.

Materials and research methods.

To analyze the dynamics of the built-up areas of Lipetsk and Stavropol in the period from 2000 to 2020, satellite images from Sentinel-2 and Landsat-8 satellites were used. The capabilities of the ScanEx Image Processor software were used to process satellite images. Work on the allocation of building boundaries in different years was carried out by the method of reverse decryption. To analyze the population density of cities, heat maps provided by the Export Base service were used. The cost of residential premises was estimated by processing information from Internet services for placing ads (Avito and CIAN). Quantum GIS is used as the main geoinformation tool.

The results of the study and their discussion.

The approbation of integration technologies and research methods on the example of the core cities of Lipetsk and Stavropol revealed that the demographically favorable city of Stavropol has higher rates of development, has higher prices for residential real estate. This process leads to a concentration of the population, including in new neighborhoods, which is not so pronounced in depopulating Lipetsk. Suburban areas included in the half-hour and hourly transport accessibility are generally comparable in terms of the cost of residential premises within both agglomerations.

Results.

The development and integration of technologies for the collection, processing and analysis of spatial and temporal data contributes to the expansion of the methodological tools of geodemographic research and opens up wide opportunities to comprehensively approach the issue of the development of intra-agglomeration and intra-urban processes. Traditional sources made it possible to assess the dynamics of the number of cities, and the use of big data technology with GIS integrations revealed the features of the development of urban and suburban development, heat maps of density gave an idea of the features of population concentration, including newly built-up areas. An analysis of the cost of housing using data from Internet services for placing ads in central cities and their suburbs confirmed the main trends related to the centrality of places and the periphery.

Key words:

GIS, Big Data, remote sensing data, Avito, CIAN, spatial analysis, demographic development, Lipetsk, Stavropol.

Введение

Большую значимость на современном этапе приобретают исследования посвященные изучению агломерационных форм расселения, городов и внутригородских процессов [2]. Между тем, традиционные источники информации, которые принято использовать для проведения пространственного анализа, в том числе геодемографических процессов, (материалы Переписей населения, данные Росстата, ведомственные данные и т.д.) не всегда способны обеспечить представления об эффектах связанных с ростом или сокращением численности населения в конкретных населенных пунктах или агломерационных зонах. В этой связи серьезное подспорье для пространственного анализа приобретают данные, полученные с помощью технологий Big Data.

Применение технологий Big Data представляется достаточно перспективным, и уже сегодня получает широкое применение в решении прикладных задач. В настоящее время Big Data разделяются по доступности информации и по форме данных. По доступности информации такие данные разделены на:

- общедоступные, открытые – технически доступные (можно скачать датасет с сайта, использовать API), свободное право пользования, в том числе в коммерческих целях;
- условно-доступные – технически доступные (можно скачать датасет с сайта, использовать API), но использовать можно либо с ограничениями, либо вообще формально нельзя;
- закрытые – данные, которых нет в интернете, но их можно получить через запросы, либо купить [12].

По форме Big Data бывают структурированные, полуструктурированные и неструктурированные. Структурированные обладают структурой таблиц, отношений. Сюда можно отнести, например Excel, а также документы CSV. Полуструктурированные, еще называются слабоструктурированными, содержат сведения, не обладающие строгой табличной составляющей и отношениями, имеют разнообразные маркеры, при помощи которых в реальной жизни удастся отделить семантику и обеспечение иерархии

полей и записей. Неструктурированные данные не имеют никакой четкой организации и структуры: текст на естественном языке, аудиодорожки, видеоролики, изображения [12].

Важно отметить, что технология Big Data различными авторами интерпретируется по-разному, мы же придерживаемся следующего определения: Big Data для пространственного анализа, это данные обладающие существенным увеличением скорости поступления объема информации и обладающие свойством быстрого дополнения с дальнейшей возможностью пространственной визуализации.

В качестве источников Big Data для пространственного анализа выступают данные полученные в результате обработки операций банковских карт (Сбербанк, Тинькоф, ВТБ и др.), сотовых операторов (Билайн, МТС и др.), социальных сетей (ВКонтакте, Instagram и др.) [9], материалы краудсорсинговых ресурсов (wikimapia, народная карта Яндексa), геолокации фотографий пользователей (Flickr, sightsmar.com и др.) данные ДДЗ, интернет-сервисов для размещения объявлений о товарах, недвижимости, вакансиях и резюме на рынке труда (Авито, ЦИАН), данные о кадастре недвижимости и т.д. [1, 8, 10, 13]. Не смотря на это, на современном этапе исследователи сталкиваются с трудностями применения Big Data в геодемографических исследованиях. Среди основных проблем и ограничений выделим проблему отсутствия единых методов и алгоритмов обработки данных; доступность и дороговизну полных наборов пространственных данных; репрезентативность данных, которые, как правило охватывают не все население; невозможность оценить достоверность данных, значительная часть информации генерируется пользователями; ограничения предоставления такой информации, в первую очередь связанную с персональными данными пользователей. Последнюю задачу удастся решать посредством предоставления такой информации в обезличенном, обобщенном виде.

Для решения задач по обработке и интерпретации больших данных эффективным инструментом представляется ГИС, обладает широким функционалом, что позволяет структурировать данные и производить их визуализацию, таким образом, получая географическую интерпретацию информации [3, 6, 7].

В настоящей статье авторы апробируют возможности использования геоинформационных технологий Big Data (ДДЗ, интернет-сервисов для размещения объявлений (Авито, ЦИАН, тепловые бизнес-карты ExportBase), как инструментария позволяющего получить новые знания, связанные с демографическими процессами. В качестве территории исследования выбраны города Ставрополь и Липецк, рассмотрены пригородные зоны этих городов.

Материалы и методы исследования

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) одни из самых распространенных источников получения Big Data, позволяющие провести пространственный анализ. В настоящее время ДДЗ характеризуются существенным увеличением объема информации, а также наращиванием скорости её поступления [4]. Только дюжина спутников формирует более 2 терабайтов данных в день или пол петабайта в год, причём два из них обеспечивают почти половину этого объёма [8].

Космические снимки высокого разрешения открывают широкие возможности для пространственного анализа, в том числе анализа площадей застроенных территорий. Процесс формирования процедур обработки/анализа носит исследовательский характер. При решении конкретных задач обработки ДЗЗ и связанной с ними информации зачастую необходимо реализовывать многовариантный подход, при котором используются различные методики формирования результатов с их последующим анализом.

В качестве исходных данных для анализа застроенных территорий Липецка и Ставрополя использованы космические снимки со спутников Sentinel-2 и Landsat-8, скачанные с сайта Геологическая служба США¹ с интервалом в 10 лет – 2000, 2010, 2020 гг. Такой временной охват позволяет рассмотреть продолжительный промежуток времени, и в достаточной степени выявить изменения застройки исследуемых территорий. Для обработки космических снимков применялись возможности программного обеспечения ScanEx Image Processor. Так, в программу подгружались ранее

1 <https://earthexplorer.usgs.gov/>

скачанные космические снимки, использовалось следующее сочетание каналов для воспроизведения естественного цвета съемки: для Landsat-8 каналы 4,3,2; для Sentinel-2 каналы 2,3,4,8. Работа по выделению границ застройки за разные годы проводилась методом обратного дешифрирования, где снимком за 2020 год был базовым, а более ранние снимки использовались для выделения пятен застройки [5]. Для анализа плотности населения городов, использовались тепловые карты предоставляемые сервисом ExportBase имеющие возможность на основе обработки разрозненных источников рассчитывать плотность населения на уровне внутригородских пространств, что позволило оценить плотность населения в районах новой застройки [1].

Второй блок исследования заключается в оценке стоимости жилых помещений, за 1 м² в Ставрополе и Липецке, а также сравнения стоимости жилья в пригородных населенных пунктах городов, в поселениях численностью более 1 тыс. чел. Данную задачу авторы решали за счет обработки информации интернет-сервисов для размещения объявлений. В России наиболее популярными сервисами являются Авито и ЦИАН. Тысячи пользователей ежедневно вносят сюда свою информацию, а система менеджмента качества позволяет достаточно четко контролировать правила формирования объявлений. Таким образом, данные ресурсы содержат большой пласт информации, позволяющий проводить анализ средней стоимости объектов недвижимости [1]. Для систематизации информации авторы использовали онлайн калькулятор стоимости жилья², позволяющий рассчитывать среднюю стоимость жилых помещений за 1 м². Анализ динамики численности населения городов произведен на основе данных Федеральной службы государственной статистики Российской Федерации.

В качестве источника информации для оценки динамики численности населения использовались материалы федеральной службы государственной статистики (Росстат)³.

В качестве базового ГИС для обработки статистических данных, дешифрирования и построения визуальных моделей применялся Quantum GIS⁴. При работе со снимками за разные периоды, границы переводились из формата shp. в формат km.l и подгружа-

лись в геопортал Google Earth⁵, чтобы осуществить дальнейшую оцифровку для всех временных периодов.

Результаты исследований и их обсуждение

Ставрополь и Липецк региональные центры Ставропольского края и Липецкой области, ядра первого порядка одноименных городских агломераций. Специализация городов различна, так Липецк специализируется на чёрной металлургии полного цикла, является агротехнологическим и авиационным центром Черноземья. Ставрополь культурный, деловой, промышленный, образовательный центр Северного Кавказа.

В Ставрополе отмечается стабильный устойчивый прирост численности населения на протяжении всего рассматриваемого периода. По классификации Ставрополь крупный город, его численность на начало 2021 г. 454 тыс. чел. (для сравнения в 2010 г. 399 тыс. чел., а в 2000 г. 355 тыс. чел.) [11] (рис. 1). Таким образом, в период с 2000-го по 2021 г. его численность увеличилась на 22%. Липецк по той же классификации относится к крупнейшим городам, с численностью в 2021 г. 503 тыс. чел. (в 2010 г. составляла 509 тыс. чел., а в 2000 г. 521 тыс. чел.) [11] (рис. 1). С 2000-го по 2021 г. его численность сократилась на 3,6%, причем сокращение носило волнообразный характер (в период с 2007 по 2017 год наблюдался прирост численности населения, а затем вновь население сокращается).

Таким образом, Ставрополь по всем признакам относится к городам с положительной динамикой численности населения, а в Липецке наметились устойчивые депопуляционные процессы.

Рассмотрим особенности развития застройки территории городов. Липецк к 2000 г. сформировал устойчивое пятно застройки, и в этом же году его численность являлась максимальной за всю историю

2 <https://onrealt.ru/>

3 <https://rosstat.gov.ru/>

4 <https://qgis.org/ru/site/>

5 <https://www.google.ru/intl/ru/earth/>

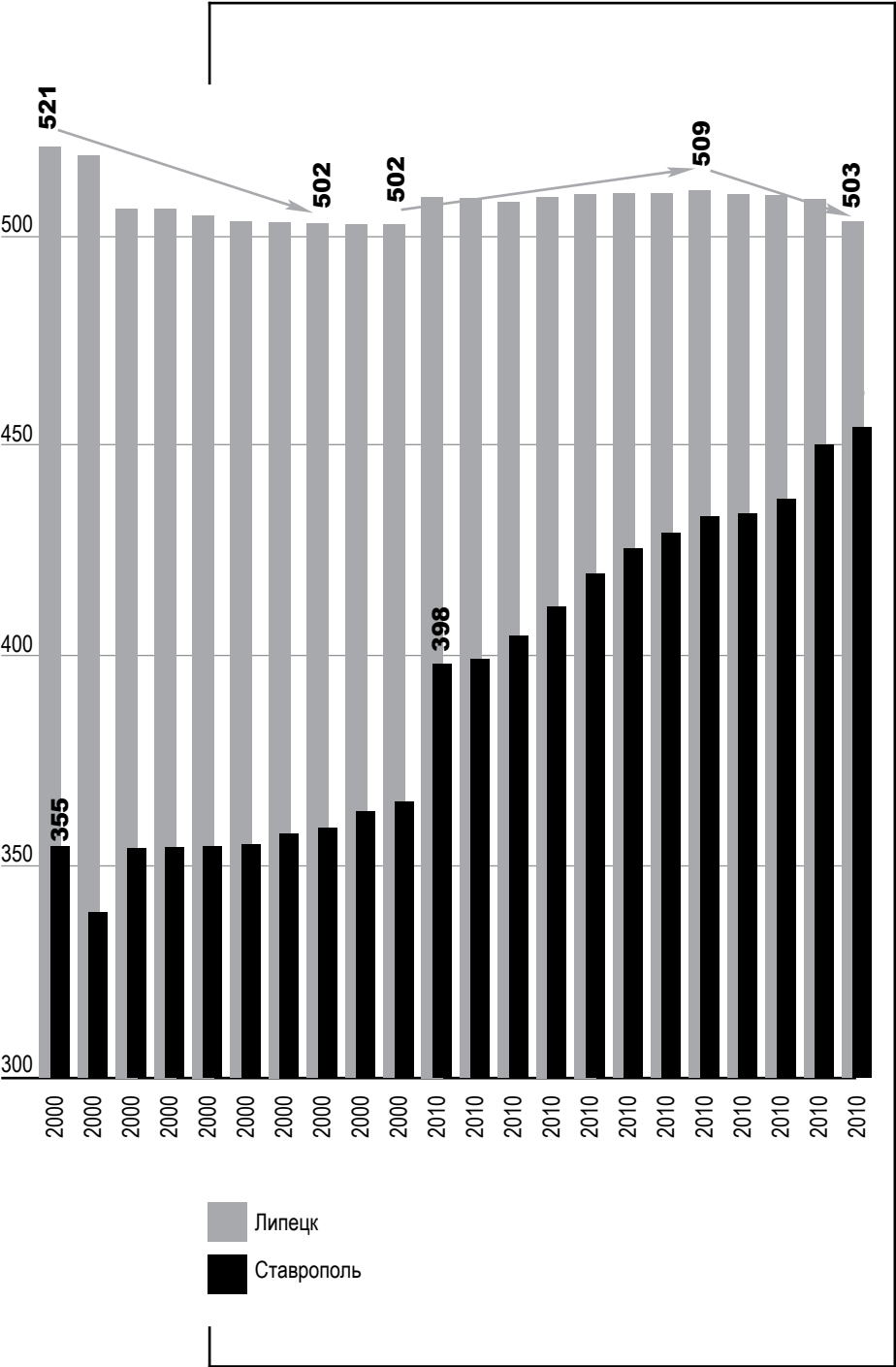


Рис. 1. Динамика численности населения Липецка и Ставрополя, 2000-2021 г.
Fig. 1. Population dynamics of Lipetsk and Stavropol, 2000-2021

города, росла устойчивым темпом. Застройка Липецка в 2000-е годы во многом продолжается за счет сложившихся районов, развиваются многоэтажные формы застройки, преимущественно в формате микрорайонов в юго-западной части города. Формируются в этот период и дачные товарищества, при этом активного уплотнения существующей застройки не отмечается. В период с 2010 по 2020 г. завершается строительство существующих кварталов микрорайонной застройки, а также происходит незначительное уплотнение сложившейся частной застройки в пригородах и дачах. В пригородных населенных пунктах и на периферии агломерации города (рассматривалась 30 км зона от Липецка) не происходит активной застройки территорий.

Формирование застроенных территорий в Ставрополе происходит активно. Наблюдается формирование зон нового многоэтажного жилья (12 и более этажей), двигаясь преимущественно в юго-западном направлении. Разрастается и ближайший пригород, в частности за счет бурного роста дачных кооперативов, по сути превратившихся в ИЖС (рис. 2). Демонстрируют высокие темпы застройки и пригородные зоны, например, численность населения города Михайловска, спутника Ставрополя, за последние 20 лет выросла на 90% и составила 98 тыс. чел.

Тепловые карты плотности населения, предоставляемые сервисом ExportBase (рис. 3), достаточно наглядно показывают увеличение плотности населения во вновь застраиваемых территориях. Этот процесс коррелирует с этажностью застройки и компактностью размещения многоэтажных жилых домов (чем выше, тем плотнее).

Сравнительный анализ стоимости жилых помещений за 1 м² показал, что в Ставрополе средняя стоимость жилья составляет 53 тыс. руб. а в Липецке – 43 тыс. руб. То есть, продолжающийся рост численности населения Ставрополя (в том числе положительное сальдо миграции) обеспечивает больший спрос на жилье, что с одной стороны увязано с более активной застройкой города, с другой стороны формирует более высокие цены за м². Интересно отметить, что в ближайших городах, входящих в пригородную зону агломерационных центров стоимость значительно отличается. Так в г. Грязи (ближайший город Липецк) стоимость составила 29 тыс. руб. а в г. Михайловске (ближайший город Ставрополь) стоимость

ЛИПЕЦК



-  ареал застроенных территорий в 2000 году
-  новая малоэтажная застройка
-  новая многоэтажная застройка

СТАВРОПОЛЬ**Рис. 2.**

Градостроительное освоение территории г. Липецка и г. Ставрополя в период с 2000 по 2020 год.

Fig. 2. Urban development of the territory of Lipetsk and Stavropol in the period from 2000 to 2020.

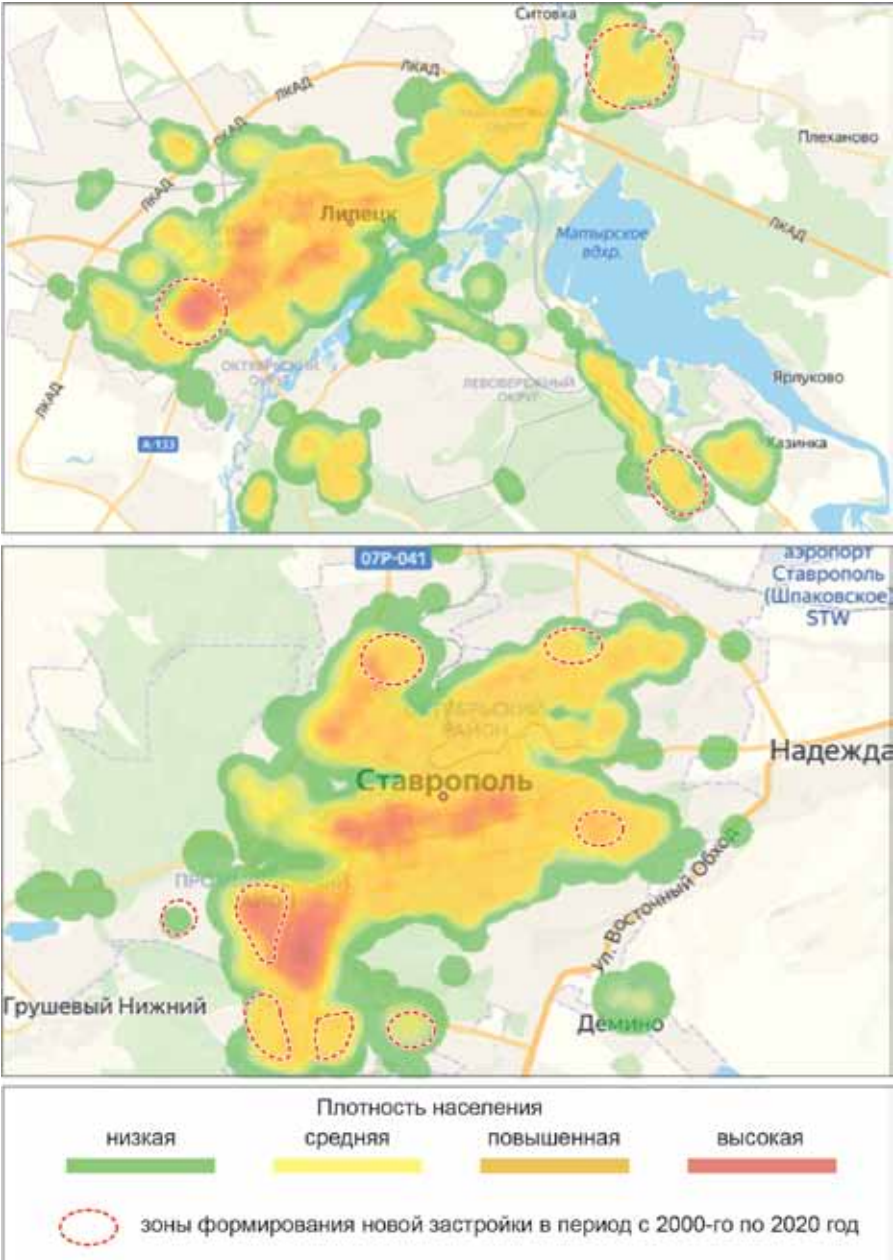


Рис. 3. Тепловая карта плотности населения г. Липецка и г. Ставрополя [https://map.export-base.ru/].
Fig. 3. Heat map of population density in Lipetsk and Stavropol.

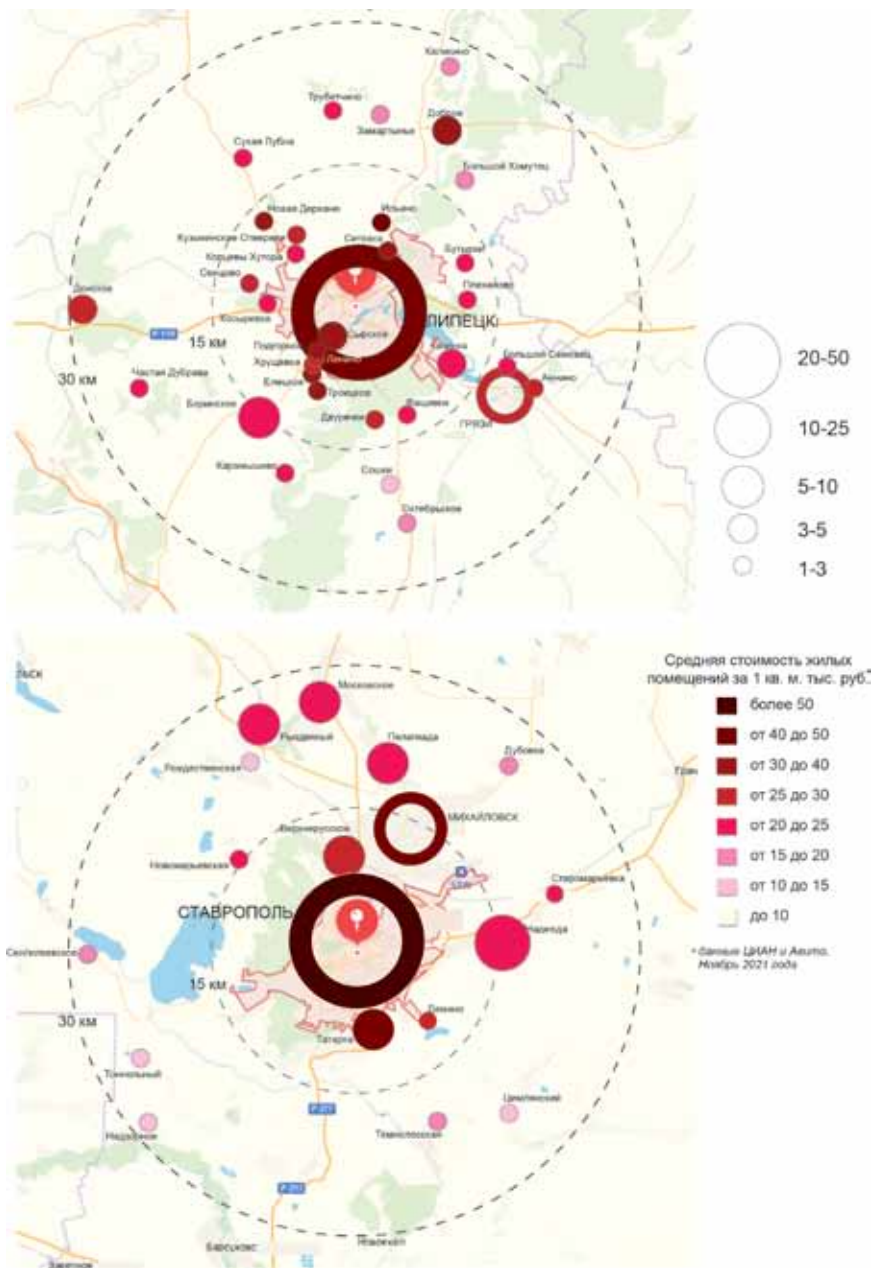


Рис. 4. Карта средней стоимости жилых помещений за 1 м².
Fig. 4. Map of the average cost of residential premises per 1 m².

составила 40 тыс. руб., что также коррелируется с динамикой численности и темпами застройки новых территорий (рис. 4).

Выявлены следующие пространственные особенности стоимости жилья в пригородных зонах (получасовая в 15 км, часовая 30 км зоне доступа от центральных городов): в 15 км зоне г. Липецка средняя стоимость жилья за 1 м² составила 27,8 тыс. руб., в Ставрополе 28,2 тыс. руб., а в зоне от 15 до 30 км 18,8 и 17,6 тыс. руб. соответственно.

Таким образом, достаточно четко прослеживается, что стоимость жилья в Ставрополе выше, чем в Липецке, а ближайшие города различаются по стоимости жилья в сторону более дорогого города Михайловска (пригород Ставрополя). В данном случае прослеживается, что демографически благоприятные города, с растущим населением, формируют более высокую стоимость жилья. Что касается непосредственно пригородной зоны часовой доступности, то здесь стоимость в целом сопоставима, что подтверждает низкую востребованность периферийных агломерационных территорий.

Выводы

Развитие и интеграция технологий сбора, обработки и анализа пространственно-временных данных способствует расширению методического инструментария геодемографических исследований и открывает широкие возможности для комплексного исследования внутри агломерационных и внутригородских процессов. Традиционные источники позволили оценить динамику численности городов, а применение технологии Big Data с интеграций ГИС раскрыли особенности развития застройки территории городов и пригородов, тепловые карты плотности дали представление об особенностях концентрации населения, в том числе вновь застроенных районах. Анализ стоимости жилья с использованием данных интернет-сервисов для размещения объявлений в центральных городах и их пригородах подтвердил основные тенденции, связанные с центральностью мест и периферией.

Авторы, на примере Ставрополя и Липецка, делают вывод, что в демографически более благоприятных городах, с растущей числен-

ностью населения, сформирован более высокий спрос на недвижимость, что увязано с разрастанием площадей застраиваемых территорий и формированием более высокой цены на жилье. При этом, периферийные зоны по динамике развития находятся в тени центральных мест, что выражается в темпах застройки и в стоимости жилья.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках:

- гранта РФФИ 20-05-00386 «Пространственно-временные диспропорции демографического развития городских агломераций разного типа в Европейской части России»;
- гранта Президента Российской Федерации МК-858.2020.5 «Геоинформационный мониторинг формирования сети больших городов в условиях современной этнодемографической и миграционной ситуации в России».

Библиографический список

1. Аксенов К. Э. Трансформация городских пространственно-временных систем (на примере влияния ритейла на районы массовой жилой застройки в Ленинграде–Санкт-Петербурге, 1989–2016 гг.) // Известия Русского географического общества. 219. Т. 151. № 1. С. 29–44.
2. Антонов Е. В., Махрова А. Г. Крупнейшие городские агломерации и формы расселения на агломерационного уровня в России // Известия РАН. Серия географическая. 2019. № 4. С. 31–45.
3. Белозеров В.С., Гладилин А.В., Щитова Н.А., Черкасов А.А. Геоинформационно-картографическое-сопровождение миграционных и демографических исследований: технологии, методы, базы данных // Наука. Инновации. Технологии. 2019. № 3. С. 49–62.
4. Волынский В. Э. «Большие данные» (BigData) в градостроительстве // Academia. Архитектура и строительство. 2017. № 3. С. 99–102.
5. Дохов Р.А., Алов И.Н., Шубина Д.О., Волков М. С., Мазур В.Н., Умнова Т.Н., Шерстнёва А.Р. Пространственные структуры постсоциалистических пригородов: функцио-

- нальные и социальные ядра субурбии Махачкалы // Городские исследования и практики. 2020. С. 35-53.
6. Краак М.-Я., Ормелинг Ф. Картография: визуализация геопространственных данных. М.: Научный мир, 2005. 325 с.
 7. Новиков А.В. Проблема больших данных в городских исследованиях // Видеоинтервью. <https://www.youtube.com/watch?v=6n6TVg-KAgM> (режим доступа 27.11.2021).
 8. Попов С. Б. Большие данные дистанционного зондирования земли: проблемы и возможности // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2016). Институт систем обработки изображений РАН. 2016. С. 1004–1007.
 9. Тикунов В.С., Белозеров В.С., Антипов С.О., Супрунчук И.П. Социальные медиа как инструмент анализа посещаемости туристических объектов (на примере Ставропольского края) // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2018. № 3. С. 89-95.
 10. Сизов О.С. Вопросы практического внедрения Big Geo Data на примере развития технологий дистанционного зондирования // GEOMATICS. 2015. №3. С. 16–25.
 11. Федеральная служба государственной статистики. URL: <http://www.gks.ru/> (режим доступа 04.11.2020).
 12. Большие данные: свойства, методы обработки, описание. Otus Journal. <https://otus.ru/journal/bolshie-dannye-svoystva-metody-obrabotki-opisanie/> (режим доступа 27.10.2021).
 13. Как мы визуализировали большие данные на картах: трудности и особенности. Хабр. <https://habr.com/ru/company/lineate/blog/592741/> (режим доступа 02.12.2021).

References

1. Aksenov K.E`. (2019) Transformaciya gorodskix prostanstvenno-vremenny`x sistem (na primere vliyaniya ritejla na rajony` massovoj zhiloj zastrojki v Leningrade–Sankt-Peterburge, 1989–2016 gg.) (Transformation of urban spatio-temporal systems (on the example of the influence of retail on the areas of mass residential development in Leningrad. St. Petersburg, 1989–2016) // Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshhestva. T. 151. № 1. P. 29–44. (in Russian).
2. Antonov E.V., Maxrova A.G. Krupnejshie gorodskie aglomeracii i formy` rasseleniya nadaglomeracionnogo urovnya v Rossii (The largest urban agglomerations and forms of settlement at the subagglomeration level in Russia) // Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. 2019. № 4. P. 31–45 (in Russian).

3. Belozеров V.S., Gladilin A.V., Shchitova N.A., Cherkasov A.A. Geoinformatsionno-kartograficheskoye soprovozhdeniye migratsionnykh i demograficheskikh issledovaniy: tekhnologii, metody, bazy dannykh (Geoinformation-cartographic support of migration and demographic research: technologies, methods, databases) // Nauka. Innovatsii. Tekhnologii. 2019. № 3. P. 49–62 (in Russian).
4. Voly`nskov V.E. «Bol'shie danny`e» (BigData) v gradostroitel'stve («Big Data» (BigData) in urban planning) // Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. 2017. № 3. P. 99–102 (in Russian).
5. Doxov R.A., Alov I.N., Shubina D.O., Volkov M.S., Maczur V.N., Umnova T.N., Sherstnyova A. R. Prostranstvenny`e struktury` postsocialisticheskix prigorodov: funktsional'ny`e i social'ny`e yadra suburbii Maxachkaly` (Spatial structures of post-socialist suburbs: functional and social cores of the Makhachkala suburb) // Gorodskie issledovaniya i praktiki. 2020. P. 35–53 (in Russian).
6. Kraak M.-Ya., Ormeling F. Kartografiya: vizualizatsiya geoprostranstvenny`x danny`x (Cartography: visualizing geospatial data). M.: Nauchny`j mir, 2005. 325 s. (in Russian).
7. Novikov A. V. Problema bol'shix danny`x v gorodskix issledovaniyax (The Big Data Challenge in Urban Research) // Videointerv`yu. <https://www.youtube.com/watch?v=6n6TVg-KAgM> (rezhim dostupa 27.11.2021) (in Russian).
8. Popov S.B. Bol'shie danny`e distantsionnogo zondirovaniya zemli: problemy` i vozmozhnosti (Earth Remote Sensing Big Data: Challenges and Opportunities) // Informacionny`e tekhnologii i nanotekhnologii (ITNT-2016). Institut sistem obrabotki izobrazhenij RAN. 2016. P. 1004-1007 (in Russian).
9. Tikunov V.S., Belozеров V.S., Antipov S.O., Suprunchuk I.P. Sotsial'nyye media kak instrument analiza poseshchayemosti turisticheskikh ob`yektov (na primere Stavropol'skogo kraya) (Social media as a tool for analyzing the attendance of tourist sites (on the example of the Stavropol Territory)) // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. 2018. (in Russian).
10. Sizov O.S. Voprosy` prakticheskogo vnedreniya Big Geo Data na primere razvitiya tekhnologij distantsionnogo zondirovaniya (Questions of the practical implementation of Big Geo Data on the example of the development of remote sensing technologies) GEOMATICS 2015. №3. P. 16-25 (in Russian).
11. Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj statistiki (Federal State Statistics Service). URL: [http:// www.gks.ru/](http://www.gks.ru/) (rezhim dostupa 04.11.2021) (in Russian).

12. Bol'shie danny'e: svoystva, metody obrabotki, opisanie. (Big Data: properties, processing methods, description) Otus Journal. <https://otus.ru/journal/bolshie-dannye-svoystva-metody-obrabotki-opisanie/> (rezhim dostupa 27.10.2021) (in Russian).
13. Kak my` vizualizirovali bol'shie danny'e na kartax: trudnosti i osobennosti How we visualized Big Data on maps: difficulties and peculiarities. Xabr. <https://habr.com/ru/company/lineate/blog/592741/> (rezhim dostupa 02.12.2021) (in Russian).

Поступило в редакцию 18.10.2021,
принята к публикации 15.12.2021

Об авторах

- Черкасов** Александр Александрович, кандидат географических наук, заведующий кафедрой картографии и геоинформатики Северо-Кавказского федерального университета. Scopus ID: 57192379694, Researcher ID: 57192379694, Телефон: +7(906) 460-99-98. E-mail: cherkasov_stav@mail.ru.
- Махмудов** Рахим Камилович, кандидат географических наук, доцент кафедры картографии и геоинформатики Северо-Кавказского федерального университета. Scopus ID: 57211744797, Телефон: +7 (909) 773-31-00. E-mail: rakimkam@mail.ru.
- Сопнев** Николай Владимирович, аспирант кафедры социально-экономической географии Северо-Кавказского федерального университета. Телефон: +7 (961) 451-41-65. E-mail: sopnev.stav@gmail.com.

About the authors

- Cherkasov** Alexander Alexandrovich, Candidate of geographical sciences, head of the department of cartography and geoinformatics of the North-Caucasus federal university. Scopus ID: 57192859694, Researcher ID: 57192379694, Phone: +7(906) 460-99-98. E-mail: cherkasov_stav@mail.ru.
- Makhmudov** Rakim Kamilovich, candidate of geographical sciences, head of the Department of Cartography and Geoinformatics of the North-Caucasus federal university. Scopus ID: 57211744797, Phone: +7 (909) 773-31-00. E-mail: rakimkam@mail.ru.
- Sopnev** Nikolay Vladimirovich, graduate student of the department of socio-economic geography of the North-Caucasus federal university. Phone: +7 (961) 451-41-65. E-mail: sopnev.stav@gmail.com.

25.00.30
УДК 551.578.7

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ, АГРОМЕТЕОРОЛОГИЯ
(ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Кагермазов А.Х.,
Созаева Л.Т.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»,
г. Нальчик, Россия

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕНСИВНОСТИ ГРАДА ПО ВЫХОДНЫМ ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ GFS NCEP

DOI: 10.37493/2308-4758.2021.4.7

Введение.

Опасные конвективные явления погоды имеют выраженную тенденцию к росту, что вызывает необходимость разработки новых подходов к их прогнозированию. Этому благоприятствует оперативная доступность результатов моделирования атмосферы Земли. В данной работе рассматривается возможность прогнозирования характеристик интенсивности града по данным значений стратификации атмосферы, полученных по глобальной модели (GFS NCEP). Рассматриваются такие характеристики интенсивности града как площадь погибших сельхозкультур и максимальный диаметр града, нашедшие применение в исследованиях града и эффективности активных воздействий на градовые процессы.

Материалы и методы
исследования.

Материалами исследований послужили выходные данные глобальной модели атмосферы GFS NCEP с заблаговременностью 24 часа и характеристики интенсивности града, предоставленные военизированными службами по активному воздействию в радиусе репрезентативности фактических данных аэрологического зондирования на станции «Минеральные Воды». Предварительно рассчитывались параметры атмосферы, из которых были отобраны наиболее информативные с помощью бисериального коэффициента корреляции и факторного анализа. Последующая оценка характеристик интенсивности града была проведена методом множественного регрессионного анализа.

Результаты исследования
и их обсуждение.

Были построены уравнения регрессии для площади погибших сельскохозяйственных культур и максимального диаметра града. Оценка параметров уравнения регрессии, характеризующих статистическую значимость и практическую применимость модели, показала их соответствие предъявляемым к ним критериям. Предлагаемый подход прогноза характеристик интенсивности града по данным глобальной модели атмосферы показал свою работоспособность и может быть использован на практике при качественном и достаточном объеме исходных данных.

Ключевые слова:

глобальная модель атмосферы, аэрологическое зондирование, метеорологические параметры, дискриминантный анализ, интенсивность града.

Kagermazov A.Kh., Federal state budgetary institution
Sozaeva L.T. «High-Mountain geophysical institute», Nalchik,
Russia

Estimation of the Characteristics of the Intensity of Hail on Global Atmospheric Model Output Data GFS NCEP

Introduction. Dangerous convective weather phenomena have a pronounced tendency to increase, which necessitates the development of new approaches to their forecasting. This is favored by the operational availability of the Earth's atmosphere modeling results. In this paper, the possibility of predicting the characteristics of hail intensity based on the atmospheric stratification values obtained by the global forecast model (GFS NCEP) is considered. Such characteristics of hail intensity as the area of dead crops and the maximum diameter of hail, which have found application in research of hail and the effectiveness of active effects on hail processes, are considered.

**Materials and methods
of research.**

The research materials were the output data of the GFS NCEP global atmospheric model with a 24-hour lead time and the characteristics of hail intensity provided by paramilitary services for active impact within the radius of representativeness of the actual aerological sounding data at the Mineralnye Vody station. The parameters of the atmosphere were preliminarily calculated, the most informative ones were selected using a biserial correlation coefficient and factor analysis. The subsequent assessment of the characteristics of the hail intensity was carried out by the method of multiple regression analysis.

**The results of the research and their
discussion.**

Regression equations were derived for the area of dead crops and the maximum diameter of hail. Estimation of the regression equation's parameters characterizing the statistical significance and practical applicability of the model showed their compliance with the criteria imposed on them.

Conclusions.

The proposed approach to forecasting the characteristics of hail intensity according to the global atmospheric model has shown its efficiency and can be used in practice with a high-quality and sufficient amount of initial data.

Key words:

global model of the atmosphere, aerological sounding, meteorological parameters, discriminant analysis, intensity of hail.

Введение

Опасные явления погоды, связанные с атмосферной конвекцией, наносят существенный ущерб экономике стран, и имеют выраженную тенденцию к росту, усугубляемую недостаточной их предсказуемостью.

Американский Геофизический Союз (AGU) по результатам анализа 176 научных трудов [1] опубликовал обзорную статью [2], в которой отмечается, что «град является одним из самых дорогостоящих стихийных бедствий для большей части мира. Только в Соединённых Штатах убытки от ливней с градом составляют около 10 миллиардов долларов в год. Но в настоящее время мы не можем предсказывать град с удовлетворительной точностью, так как он является один из самых сложных для прогнозирования событий, даже для стандартного трёхдневного прогноза погоды, не говоря уже о масштабах изменения климата на десятилетия».

Основными причинами недостаточной предупрежденности опасных явлений конвективного характера является дефицит исходной информации, а также недостаточность традиционных подходов для прогнозирования локальных быстроразвивающихся процессов.

Известно, что опасные явления погоды и, в частности, град, связанные с зонами активной конвекции, относятся к мезомасштабным метеорологическим явлениям погоды. Они образуются в результате сложного взаимодействия атмосферных процессов макро-, мезо- и микромасштаба. Размер таких явлений в пространстве сравнительно мал, как и продолжительность во времени. Площадь, на которой наблюдаются рассматриваемые явления, как правило, во много раз меньше расстояния между пунктами метеорологических и аэрологических наблюдений. Успехи в развитии гидродинамических моделей прогноза состояния атмосферы Земли позволяют использовать их выходные данные для прогноза таких опасных явлений с требуемым пространственным и временным разрешением.

В то же время, возросшие требования к прогнозу опасных явлений погоды (града) предполагают разработку новых способов прогноза количественных характеристик градовых процессов. В решении этой задачи возникают дополнительные трудности, связанные с определением критериев интенсивности градового про-

цесса. Для системы противогодовой защиты наиболее важным является предсказание размеров площади сельскохозяйственных культур, погибших от града, а с физической точки зрения мощность годового процесса оценивается кинетической энергией гидрометеоров, достигающих поверхности земли, с одновременным определением размеров площади повреждений сельскохозяйственных культур. При этом, как правило, чем мощнее годовый процесс, тем больше среднекубический диаметр града и тем большим максимальным количеством осадков он сопровождается. Исключения составляют весенние и осенние градобития, когда из-за низкого положения нулевой изотермы почти весь водный запас облака выпадает в виде градин разного размера. Количество осадков при этом может быть невелико. Исходя из этого, предполагается в качестве характеристики интенсивности годовых процессов использовать, наряду с площадью погибших сельхозкультур, максимальный диаметр градин [3–6].

Целью данной работы является исследование возможности замены фактических данных аэрологического зондирования данными глобальной модели атмосферы для прогноза характеристик интенсивности града методом регрессионного анализа. В качестве независимых переменных рассматриваются параметры атмосферы, рассчитанные по выходным данным глобальной модели атмосферы, а в качестве зависимой переменной указанные выше характеристики интенсивности града.

Предлагаемый подход можно применять для регионов, находящихся в радиусе репрезентативности пункта аэрологического зондирования «Минеральные Воды», расположенного на Северном Кавказе.

Материалы и методы исследований

Материалом для исследования послужили стратифицированные поля метеопараметров тропосферы, полученные по выходной продукции глобальной системы прогнозов Национальных центров прогнозирования процессов в окружающей среде (GFS NCEP) США [7–9].

Глобальная модель получила развитие в начале 90-х годов. С ростом вычислительных ресурсов и изменения компьютерной архитектуры увеличивается и разрешающая способность глобальной модели атмосферы. Так, за период накопления информации разрешающая способность глобальной модели улучшилась с 55 до 13 км. В настоящее время (по состоянию на 2021 год) горизонтальное разрешение варианта T574 составляет около 13 км для прогнозов с заблаговременностью до 10 дней и 34 км с заблаговременностью от 10 до 16 дней [11]. Кроме того, в июне 2019 года глобальная система прогнозирования NOAA (GFS) в рамках проекта NGGPS (Next generation global prediction system) была значительно обновлена. Был осуществлен переход на новый, неспектральный блок решения уравнений динамики (FV3), а также введен ряд усовершенствований в описании физических процессов подсеточного масштаба. Динамическое ядро FV3 делит атмосферу на небольшие кубы, расположенные на сетке, и вычисляет изменения параметров внутри каждого куба. Модели, использующие FV3, имеют возможность телескопировать масштаб расчетной сетки для обчета мезомасштабных штормовых систем для улучшения их прогноза.

Используемая нами выходная продукция действующей модели GFS уже сейчас обладает достаточно высокой достоверностью. Подтверждением этому является валидация этих полей с заблаговременностью до трех суток по фактическим данным аэрологического зондирования [10]. Показано, что коэффициенты корреляции между прогностическими и фактическими параметрами атмосферы на уровне 0,9. Поэтому непрерывно проводимое усовершенствование глобальной модели, несильно скажется на той части выходной продукции, которую мы используем, и коэффициенты регрессионных уравнений не потеряют своей актуальности.

Фактические данные об опасных явлениях погоды были предоставлены военизированными службами по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы (Ставропольской, Северо-Кавказской и Краснодарской) в ходе оперативно-производственной работы НИУ Росгидромета «Ведение Единого государственного фонда данных о состоянии окружающей

среды, ее загрязнении». Были отобраны 72 даты выпадения града в градоопасные сезоны 2005-2019 гг.

Для каждой из этих дат по данным глобальной модели атмосферы были рассчитаны около 45 параметров атмосферы, известных из существующих методов прогноза опасных явлений погоды [12]. Такое количество признаков предъявляет слишком жесткие требования к объему эмпирических данных и делает чрезвычайно трудоемкой вычислительную процедуру прогноза. Поэтому возникла необходимость отбора наиболее информативных признаков. Эта задача решалась с помощью бисериального коэффициента корреляции и факторного анализа [13]. В результате было получено, что на формирование явлений конвективной природы (град, ливень и т.д.) оказывают наибольшее влияние следующие параметры атмосферы:

- DTM* – максимальная разность температур в облаке и окружающем воздухе;
- HM* – уровень, на котором разность температур в облаке и окружающем воздухе максимальна;
- DTK* – вертикальный градиент температуры в слое выше уровня конденсации на 4-4,5 км;
- SQZ5* – суммарная удельная влажность в слое Земля-5 км;
- TDSR5* – средний дефицит влажности в слое выше уровня конденсации на 5 км;
- PH1* – уровень конвекции;
- TH1* – температура на уровне конвекции;
- DJ* – индекс неустойчивости Джорджа;
- TTMI* – индекс интегральной суммы Миллера;
- DSS* – энергетическая характеристика подоблачного слоя.

Такое количество предикторов, при имеющемся числе случаев все еще избыточно для оценки характеристик интенсивности конвективных явлений. Желательно, отобрать из них те предикторы, которые оказывают наиболее значимое влияние на предсказываемую переменную. Для этого привлекался множественный регрессионный анализ.

В настоящее время для обработки и анализа статистической информации широкое распространение получила программа SPSS, с помощью которой в данном исследовании проводился регрессионный анализ [14].

По каждой из дат с градом были выбраны фактические значения характеристик интенсивности града (площади погибших сельскохозяйственных культур (*Square*, га) и максимальный диаметр града (*Diam*, см)).

Для выявления и описания зависимости между характеристиками интенсивности града $I(Square, Diam)$ и параметрами атмосферы была использована регрессионная модель вида:

$$I(Square, Diam) = aDTM + bHM + cDTK + dSQZ5 + eTDSR5 + fPH1 + gTH1 + hDJ + iTTMI + jDSS + const, \quad (1)$$

где $a, b, c, d, e, f, g, h, i, j$ – коэффициенты; $const$ – свободный член.

Регрессионный анализ сводится к определению коэффициентов и свободного члена уравнения, расчету параметров, характеризующих статистическую значимость и практическую применимость модели.

Результаты исследований и их обсуждение

Для оценки площади погибших сельхозкультур и максимального диаметра града при сильных градовых процессах для условий Северного Кавказа были построены следующие уравнения регрессии:

$$Square = 563,02TDSR5 + 1,506PH1 - 732,961DTM - 489,495DTK - 4929,01, \quad (2)$$

$$Diam = 0,149TDSR5 + 0,083DJ + 0,003DSS - 24,257, \quad (3)$$

где $TDSR5$ – средний дефицит влажности в слое выше уровня конденсации на 5 км;

<i>DJ</i> –	индекс неустойчивости Джорджа;
<i>DSS</i> –	энергетическая характеристика подоблачного слоя;
<i>PH1</i> –	уровень конвекции;
<i>DTM</i> –	максимальная разность температур в облаке и окружающем воздухе;
<i>DTK</i> –	вертикальный градиент температуры в слое выше уровня конденсации на 4–4,5 км.

В сводной таблице 1 представлены параметры регрессионных уравнений для площади погибших сельхозкультур и максимального диаметра града и показатели, характеризующие их качество. Качество регрессионной модели оценивается коэффициентом множественной корреляции R , характеризующим тесноту связи между переменными и коэффициентом детерминации R^2 , представляющим долю изменения зависимой переменной, вызванной независимыми переменными.

Статистическая значимость регрессионной модели *Sig.* должна быть меньше 0,05. Для модели прогноза площади погибших сельхозкультур *Sig.* = 0,017, а для максимального диаметра града – *Sig.* = 0,02. Это означает, что отобранные коэффициенты регрессии значимы и справедливы для генеральной совокупности, т.е. уравнение (2) можно использовать для оценки площади погибших сельхозкультур, а уравнение (3) – для оценки максимального диаметра града.

Стандартные ошибки σ указывают, что при доверительном интервале 95% каждый коэффициент регрессии может на $\pm 2\sigma$ отклоняться от среднего значения.

Стандартизированные коэффициенты регрессии (*beta*) – позволяют оценить, в какой степени значения площади погибших сельхозкультур и максимального радиуса града определяются значениями параметров атмосферы, т.е. они характеризуют удельный вклад каждого параметра атмосферы в вариации характеристик интенсивности града.

Значения показателей толерантности (*tol*) характеризуют коллинеарность, т.е. наличие связи между переменными модели. Для

нормального распределения считается существенным при значении $p < 0,05$ (при 95% доверительном интервале). Для обеих моделей прогноза $p \gg 0,05$ т.е. вероятность отклонения от нормального распределения остатков является незначимой.

Условие независимости остатков между собой проверяется с помощью теста Дарбина-Уотсона (DW). Для построенных моделей прогноза коэффициенты DW близки к 2, что является показателем отсутствия автокорреляции остатков.

Таким образом, все показатели, характеризующие статистическую значимость и практическую применимость регрессионных уравнений, соответствуют, предъявляемым к ним критериям и свидетельствуют о возможности прогнозирования площади погибших сельхозкультур и максимального диаметра града по уравнениям (2) и (3).

Следует отметить, что коэффициент R^2 для модели прогноза площади погибших сельхозкультур равен $0,16$, а для модели прогноза максимального диаметра града – $0,2$. Это означает, что только 16% вариации площади погибших сельхозкультур и 20% максимального диаметра града объясняются совместной вариацией параметров атмосферы. Кроме того, связь между характеристиками интенсивности града и параметрами атмосферы является умеренной по коэффициентам множественной корреляции ($R = 0,402$ для модели прогноза площади погибших сельхозкультур и $R = 0,446$ – максимального диаметра града соответственно). Это связано с тем, что характеристики града были отобраны на защищаемой территории, на которой проводилось активные воздействия на градовые процессы. Такое вмешательство в естественный процесс приводит к уменьшению значений параметров облаков ответственных за образование града. Для более точной оценки характеристик интенсивности града предпочтение должно отдаваться территории, где не проводится воздействие на градовые процессы и имеется необходимая исходная информация.

Выводы

Схема прогноза характеристик интенсивности града, основанная на использовании выходной продукции Глобальной

системы прогнозов Национальных центров прогнозирования процессов в окружающей среде (GFS NCEP) США показала свою работоспособность.

Проведенное исследование показывает, уравнения регрессии, построенные по выходной продукции глобальной модели GFS NCEP, сохраняют прогностический потенциал при оценке характеристик интенсивности градовых процессов даже при увеличении заблаговременности до пяти суток. Особое значение это будет иметь для служб по борьбе с градом при определении времени начала градоопасного сезона, а также при переходе от длительного периода хорошей погоды к дням, когда необходимо проводить активные воздействия. Качество полученных статистических схем улучшатся по мере накопления данных и их большей детализации.

В дальнейшем, при наличии экспериментальных данных о характеристиках интенсивности града на территории без воздействия, и по мере накопления прогностических данных глобальной модели, будет уточняться регрессионная модель прогноза характеристик интенсивности града для Северного Кавказа.

Библиографический список

1. Raupach, T.H., Martius, O., Allen, J.T. et al. The effects of climate change on hailstorms. *Nat Rev Earth Environ.* 2021. Vol. 2. P. 213–226. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00133-9>.
2. Dzombak B. Severe hailstorms are costly and hard to predict // *Eos*. 2021. № 102. <https://doi.org/10.1029/2021EO158268>.
3. Беленцова В.А., Федченко Л.М., Чеповская О.И. Оценка интенсивности градовых процессов на Северном Кавказе // *Труды ВГИ*. 1974. Вып. 25. С. 3–16.
4. Беленцова В.А., Федченко Л.М. О влиянии циркуляции и термодинамического состояния нижнего слоя тропосферы на локализацию и интенсивность конвективных процессов на Северном Кавказе // *Труды ВГИ*. 1979. Вып. 44. С. 48–59.
5. Данилова Н.Е., Семенова Ю.А., Смерек Ю.Л., Закинян Р.Г. Влияние подоблачной конвекции на развитие облачной конвекции // *Наука. Инновации. Технологии*. 2018. № 4. С. 131–150.

6. Федченко Л.М., Беленцова В.А., Берова М.А. Прогноз интенсивности градовых процессов на Северном Кавказе // Труды ВГИ. 1983. Вып. 50. С. 21–35.
7. Kalnay E., Kanamitsu M., and Baker W.E. Global numerical weather prediction at the National Meteorological Center // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1990. Vol. 71. P. 1410–1428.
8. Kanamitsu M. Description of the NMC global data assimilation and forecast system // Weather and Forecasting. 1989. Vol. 4. P. 335–342.
9. Kanamitsu M., Alpert J.C., Campana K.A. et al. Recent changes implemented into the global forecast system at NMC // Weather and Forecasting. 1991. Vol. 6. P. 425–435.
10. Каргмазов А.Х., Созаева Л.Т. Прогноз града с заблаговременностью до трех суток по выходным данным глобальной модели атмосферы // Труды ГГО. 2020. Вып. 598. С. 204–214.
11. URL: <http://www.emc.ncер.noaa.gov> (дата обращения: 14.04.2020).
12. Каргмазов А.Х. Цифровая атмосфера. Современные методы и методология исследования опасных метеорологических процессов и явлений. Нальчик: Печатный двор, 2015. 215 с.
13. Иберла К. Факторный анализ. М.: Статистика, 1980. 398 с.
14. Бьюль А., Цёфель П. SPSS: Искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей: Пер. с нем. СПб.: ДиаСофтЮП, 2005. 608 с.

References

1. Raupach, T.H., Martius, O., Allen, J.T. et al. The effects of climate change on hailstorms. Nat Rev Earth Environ. 2021. Vol. 2. P. 213–226. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00133-9>
2. Dzombak B. Severe hailstorms are costly and hard to predict // Eos. 2021. № 102. <https://doi.org/10.1029/2021EO158268>
3. Belentsova V.A., Fedchenko L.M., Chepovskaya O.I. Assessment of the intensity of hail processes in the North Caucasus // Trudy VGI. 1974. Vol. 25, 3-16 p.
4. Belentsova V.A., Fedchenko L.M. On the influence of circulation and thermodynamic state of the lower tropospheric layer on the localization and intensity of convective processes in the North Caucasus // Trudy VGI. 1979. Vol. 44. P. 48-59.

5. Danilova N. E., Semyonova Yu. A., Smerek Yu. L., Zakinyan R. G. Influence under-cloudy convections on development of a cloudy convection // Nauka. Innovatsii. Tekhnologii. 2018. № 4. P. 131–150.
6. Fedchenko L.M., Belentsova V.A., Berova M.A. Forecast of the intensity of hail processes in the North Caucasus // Trudy VGI. 1983. Vol. 50. P. 21–35.
7. Kalnay E., Kanamitsu M., and Baker W.E. Global numerical weather prediction at the National Meteorological Center // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1990. Vol.71. P. 1410–1428.
8. Kanamitsu M. Description of the NMC global data assimilation and forecast system // Weather and Forecasting. 1989. Vol. 4. P. 335–342.
9. Kanamitsu M., Alpert J.C., Campana K.A. et al. Recent changes implemented into the global forecast system at NMC // Weather and Forecasting. 1991. Vol. 6. P. 425–435.
10. Kagermazov A.Kh., Sozaeva L.T. Hail forecast on the output data of the global atmospheric model with tree-day advance time // Proceedings of the Voeikov Main Geophysical Observatory. 2020. Vol. 598. P. 204–214.
11. URL: <http://www.emc.ncep.noaa.gov> (date of access: 14.04.2020).
12. Kagermazov A.Kh. Digital atmosphere. Modern methods and methodology for the study of hazardous meteorological processes and phenomena. Nalchik: Pechatnyy dvor, 2015. 215 p.
13. Iberla K. Factor Analysis. Moscow: Statistics, 1980. 398 p.
14. Büyül A., Zöfel P. SPSS: The Art of Information Processing. Analysis of statistical data and recovery of hidden patterns: Per. with him. SPb.: DiaSoftYUP, 2005. 608 p.

Поступило в редакцию 17.09.2021, принята к публикации 18.11.2021

Сведения об авторах

Кагермазов Артур Хасанбиевич – заведующий лабораторией атмосферных конвективных явлений, кандидат физико-математических наук, ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»
Адрес: РФ, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, пр. Ленина, 2.
Scopus ID 55185153100 ka5408@mail.ru
+7 (928) 720 35 96

Созаева Лежинка Танашевна – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»
Адрес: РФ, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, пр. Ленина, 2
Scopus ID 57204527832 ljk_62@rambler.ru
+7 (928) 723 20 08

About the authors

Kagermazov Artur Khasanbievich – candidate of physical and mathematical sciences, head of the laboratory of atmospheric convective phenomena of Federal state budgetary institution «High-Mountain Geophysical Institute»
Address: Russia, Kabardino-Balkar Republic, Nalchik, Lenin Ave., 2.
Scopus ID 55185153100 ka5408@mail.ru
+7 (928) 720 35 96

Sozaeva Lezhinka Tanashevna – candidate of physical and mathematical sciences, docent, senior research associate the laboratory of atmospheric convective phenomena of Federal state budgetary institution «High-Mountain Geophysical Institute»
Address: Russia, Kabardino-Balkar Republic, Nalchik, Lenin Ave., 2.
Scopus ID 57204527832 ljk_62@rambler.ru
+7 (928) 723 20 08

25.00.30
УДК 551.583

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Кешева Л.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Высокогорный геофизический институт», Россия; kesheva.lara@yandex

ОЦЕНКА ТЕНДЕНЦИЙ ИЗМЕНЕНИЯ ВЫСОТЫ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА МЕТЕОСТАНЦИЯХ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

DOI: 10.37493/2308-4758.2021.4.8

Введение.

На фоне глобального потепления, наблюдаемого в последние десятилетия, происходят изменения всех климатических характеристик. В эпоху глобального потепления, по мере увеличения температуры воздуха растет и влагосодержание воздушных масс, поэтому в холодных районах возрастает количество выпадающего снега. Это свидетельствует о большой чувствительности снежного покрова к любым изменениям в составе атмосферы и ее циркуляции. Снежный покров является важным компонентом природной среды зимнего периода. В данной работе проведена оценка тенденций изменения высоты снежного покрова на трех метеорологических станциях Северного Кавказа, расположенных в различных климатических зонах. Для анализа были использованы данные наблюдений за снежным покровом за период 1961-2018 гг.

Материалы и методы исследований.

Для получения результатов изменения режима снежного покрова с 1960/1961 по 2017/2018 гг. на территории Северо-Кавказского региона были исследованы осредненные ряды характеристик снежного покрова по данным 3-х метеорологических станций: Прохладная, Нальчик и Теберда. С помощью статистического пакета программы SPSS 13.0 были рассчитаны следующие статистики: среднее, стандартное отклонение, минимум, максимум, размах, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса, экстремальные значения, климатическая норма, тест Колмогорова – Смирнова на нормальность кривой распределения, Т-тест на сравнение равенства среднего с климатической нормой. Получены линейные тренды, скорость изменения метеопараметра, произведена оценка устойчивости климатических изменений, выявлены аномалии для каждого исследуемого ряда.

Результаты исследований и их обсуждение.

Для оценки изменения характеристик снежного покрова использовались данные рядов высоты снежного покрова в холодные сезоны 1961-2018 гг. (с октября по апрель за 1960/61-2017/18 гг.). Сезоны с октября по апрель 1960/1961 гг., 1961/1962 гг., ..., 2017/2018 гг. далее по тексту для краткости записаны как 1961, 1962, ..., 2018 гг. Анализируя среднедекадную высоту снежного покрова, например 1961 года, использовались данные октября, ноября, декабря 1960 года и января, февраля, марта и апреля 1961 года. В ходе исследования произведена оценка устойчивости климатических изменений. В качестве ее интегральной характеристики использовали показатель Херста (H), который показал

Выводы.	трендоустойчивость и устойчивую тенденцию увеличения высоты снежного покрова на исследуемых м/станциях. Стандартное отклонение σ использовалось в качестве меры типичной изменчивости высоты снежного покрова (СП) за период 1960/61-2017/18 гг. Для каждого ряда метеопараметров посчитаны минимальные и максимальные значения высоты СП. Для выявления аномалий исследовались отклонения текущих значений от многолетнего среднего за период 1961-1990 гг. (климатическая норма). Проведен анализ изменения высоты снежного покрова за весь период исследования 1961-2018 гг. и в период глобального потепления с 1976 по 2018 г. Исследования показали, что за период с 1961 года по 2018 г. на всех м/станциях имело место увеличение скорости роста среднедекадной высоты снежного покрова с последующим ее усилением в период с 1976 г. Выявлены экстремальные значения для всех исследуемых рядов. Проведен анализ среднедекадной высоты СП по месяцам (октябрь-апрель) с целью выявления среднеснежных и малоснежных месяцев. Анализ изменений скорости роста среднедекадной высоты снежного покрова показал, что имело место ее увеличение, как в базовый (1961-2018 гг.), так и в период 1976-2018 гг. Для всех исследуемых рядов среднедекадной высоты снежного покрова показатель Херста демонстрирует высокую трендоустойчивость ряда. Выявлено, что за весь период исследований положительных аномалий меньше, чем отрицательных. За весь период наблюдений на рассматриваемых м/станциях было выявлено 9 экстремальных значений высоты снежного покрова. В современный период (1991-2018 гг.) отмечалось увеличение количества экстремальных значений среднедекадной высоты снежного покрова в 3,5 раза (7:2) по сравнению с базовым периодом.
Ключевые слова:	метеостанция, среднедекадная высота снежного покрова, линейный тренд, показатель Херста, экстремумы, аномалии.
Kesheva L.A.	Federal State Budgetary Institution "Vysokogorny Geophysical Institute", Russia
Estimation of Tendencies in the Height of the Snow Cover at Weather Stations in the Northern Caucasus	
Introduction.	Against the background of global warming observed in recent decades, changes in all climatic characteristics are taking place. In the era of global warming, as the air temperature rises, the moisture content of the air masses also increases, therefore, the amount of snow falling increases in cold regions. This indicates a high sensitivity of the snow cover to any changes in the composition of the atmosphere and its circulation. Snow cover is an important component of the natural environment during the winter. In this work, the assessment of trends in the height of snow cover at three meteorological stations in the North Caucasus, located in different climatic zones, is carried out. For the analysis, data from observations of snow cover for the period 1961–

2018 were used. Materials and research methods: To obtain the results of changes in the snow cover regime from 1960/1961 to 2017/2018. On the territory of the Caucasus region, the averaged series of snow cover characteristics were studied according to data from 3 meteorological stations: Prokhladnaya, Nalchik and Teberda. Using the statistical software package SPSS 13.0, the following statistics were calculated: mean (standard error), standard deviation, minimum, maximum, range, skewness coefficient, kurtosis coefficient, extreme values, climatic norm, Kolmogorov-Smirnov test for normal distribution curve, T- test for comparing the equality of the mean with the climatic norm. Linear trends, the rate of change of the meteorological parameter were obtained, the stability of climatic changes was assessed, and anomalies were identified for each series under study. Research results and their discussion: To assess the change in the characteristics of the snow cover, data from the series of the snow cover depth in the cold seasons of 1961-2018 were used (from October to April for 1960/61-2017/18). Seasons from October to April 1960/1961, 1961/1962, ..., 2017/2018 hereinafter, for brevity, they are written as 1961, 1962, ..., 2018. When analyzing the average ten-day snow cover, for example, in 1961, data from October, November, December 1960 and January, February, March and April 1961 were used. In the course of the study, the sustainability of climatic changes was assessed. As its integral characteristic, the Hurst exponent (H) was used, which showed the trend stability and a stable tendency to increase the height of the snow cover at the studied m/stations. The standard deviation σ was used as a measure of the typical variability of snow cover (SC) over the period 1960/61-2017/18. For each row of meteorological parameters, the minimum and maximum values of the SC altitude were calculated. To identify anomalies, deviations of the current values from the long-term average for the period 1961-1990 were investigated (climatic norm). The analysis of changes in the height of snow cover for the entire period of the study (1961-2018) and during the period of global warming (from 1976 to 2018) was carried out. Studies have shown that for the period from 1961 to 2018 at all m/stations, there was an increase in the growth rate of the average 10-day snow cover, with its subsequent increase in the period from 1976. The extreme values are revealed for all studied series. The analysis of the average 10-day SC altitude by months (October-April) was carried out in order to identify the medium-snow and little-snow months.

Conclusions.

Analysis of changes in the growth rate of the average ten-day snow cover showed that there was an increase, both in the baseline (1961-2018) and in the period 1976-2018. For all the studied series of mean ten-day snow cover, the Hurst exponent demonstrates a high trend resistance of the series. It was revealed that for the entire period of research there are fewer positive anomalies than negative ones. Over the entire observation period at the considered m/stations, 9 extreme values of the height of the snow cover were identified. In the modern period, there has been an increase in the number of extreme values of the average ten-day snow cover by 3.5 times (7: 2) compared to the base period.

Key words:

meteorological station, average ten-day snow cover, linear trend, Hurst exponent, extrema, anomalies.

Введение

На фоне глобального потепления, наблюдаемого в последние десятилетия, происходят изменения всех климатических характеристик. В настоящее время изменения климата становятся все более очевидными, с каждым годом они наносят все больший экономический ущерб и нередко влекут за собой необратимые экологические последствия.

В ежегодных Докладах об особенностях климата на территории Российской Федерации [1] приводятся результаты исследований по данным инструментальных наблюдений (температура приземного воздуха, атмосферные осадки, высота снежного покрова, протяженность морского льда и др.) за достаточно длительный период времени, которые подтверждают реальность изменения климата.

В эпоху глобального потепления, по мере увеличения температуры воздуха растет и влагосодержание воздушных масс, поэтому в холодных районах возрастает количество выпадающего снега. Это свидетельствует о большой чувствительности снежного покрова к любым изменениям в составе атмосферы и ее циркуляции. Снежный покров является важным компонентом природной среды зимнего периода. Изучение снежного покрова, его высоты, плотности и распределения по территории имеет практическое значение. Снег оказывает большое влияние на водность рек, на работу транспорта, на урожаи зерновых и многих сельскохозяйственных культур, и на эрозионные процессы. Изучение снежного покрова – важная физическая и экономическая задача, потому что от него зависит развитие с/х культур и возобновляемость запасов пресной воды. При потеплении климата ожидается сокращение площади снежного покрова на значительной части территории страны.

Исследование регионального климата является важнейшей составляющей понимания современного глобального изменения климата.

В данной работе проведена оценка тенденций изменения высоты снежного покрова на трех метеорологических станциях Северного Кавказа, расположенных в различных климатических зонах. Для анализа были использованы данные наблюдений за снежным покровом за период 1961–2018 гг.

Материалы и методы исследований

При потеплении климата ожидается сокращение площади снежного покрова на значительной части территории страны. Изменения климата и вызванные этим последствия неоднородны в пространстве (климатические зоны) и во времени (сезоны), в частности, это касается и основной характеристики снежного покрова – среднедекадной высоты. В работе А.Н. Кренке и др. [2] отмечается, что в условиях интенсивного изменения климата последних десятилетий снежный покров рассматривается как один из наиболее чувствительных индикаторов изменений окружающей среды.

Следует подчеркнуть важность знания закономерностей распределения снежного покрова для оценки климатических ресурсов страны. Результаты исследований в этом направлении представлены во многих статьях О.Н. Булыгиной и др. [3, 4]. В своих работах авторы проводят исследования изменений состояния снежного покрова на основе эмпирико-статистического анализа временных рядов ежедневных данных о высоте снежного покрова на 450 станциях РФ. Исследования показали, что тенденции изменения характеристик снежного покрова в тридцатилетие (1977–2006 гг.) в отдельных районах существенно отличаются от тенденций, полученных за период 1951–2006 гг.

В исследованиях проведенных ранее Ашабоковым Б.А. и др. [5, 6] отмечено, что за последние 50–60 лет на юге европейской территории России (за исключением высокогорной части) наблюдалось **увеличение среднедекадной высоты снежного покрова** на 0,35 см/10 лет с максимальной скоростью роста высоты снежного покрова в предгорной зоне. В современный период наблюдалось увеличение количество экстремумов среднедекадной высоты снежного покрова примерно в 2,5 раза по сравнению с базовым периодом.

Наблюдения за снежным покровом начинаются в осенний период, с момента появления первого (временного) снежного покрова и продолжаются до полного его исчезновения в весенний период. По отсчетам трех стационарно установленных (постоянных) реек ежедневно вычисляется среднее значение высоты снежного покрова. Значение меньше 0,5 см, записывается как 0, большее или равное 0,5 см, как 1 см. Для характеристики среднедекадной *высоты*

снежного покрова вычисляют ее средние значения по декадам месяцев холодного сезона.

Для получения результатов изменения режима снежного покрова с 1960/1961 по 2017/2018 гг. на территории Северного Кавказа были исследованы осредненные ряды высоты снежного покрова по данным трех метеорологических станций: Прохладная (равнинная зона, 198 м над уровнем моря (н.у.м.)), Нальчик (предгорная зона, 500 м н.у.м.) и Теберда (горная, 1280 м н.у.м.).

Характеристики линейных (временных) трендов за полный период исследования с 1961 г. по 2018 г. и с 1976 г. по 2018 г. (1976 г. – начало глобального потепления по рекомендации Всемирного метеорологического общества) представлены через угловой коэффициент b и характеризуют скорость изменения исследуемого метеопараметра (см/10 лет). Значимость тренда за исследуемый период определялась величиной вклада в объясненную дисперсию (D , %). В ходе исследования произведена оценка устойчивости климатических изменений. В качестве ее интегральной характеристики использовали показатель фрактальных свойств временных рядов – показатель Херста (H) [7, 8].

Для определения устойчивости тренда использовали метод нормированного размаха (метод Херста) по формуле (1). Устойчивость тренда определяется по величине значения показателя Херста:

$$\frac{R_n}{S_n} = (aT)^H, \quad (1)$$

где H – показатель Херста;
 R – размах накопленного отклонения;
 S – среднеквадратичное отклонение ряда наблюдений X_i ;
 T – период наблюдений;
 a – заданная константа.

Выделяют три различных значения показателя Херста, характеризующих трендоустойчивость:

- 1) $H = 0,5$. Такое значение указывает на то, что ряд является случайным (броуновское движение). Собы-

- тия не коррелированы между собой, настоящее не влияет на будущее.
- 2) $0 \leq H < 0,5$. Данный диапазон значений показателя Херста соответствует антиперсистентным корреляциям значений временного ряда. Стохастический характер динамики сигнала состоит из частых изменений спад – подъем.
- 3) $0,5 < H < 1,0$. Значения показателя, принадлежащие данному диапазону, характерны для персистентных или трендоустойчивых рядов [9].

Стандартное отклонение σ использовалось в качестве меры типичной изменчивости высоты снежного покрова (СП) за период 1960/61–2017/18 гг. Для выявления аномалий исследовались отклонения текущих значений от многолетнего среднего за период 1961–1990 гг. (климатическая норма). Используя Т-тест, было выяснено, можно ли объяснить имеющиеся различия среднего значения за исследуемый период от нормы статистическими колебаниями.

Для каждого ряда за весь исследованный период 1961–2018 гг. были выявлены экстремальные значения. Согласно определению, данному в «Глоссарии терминов» [10], «Климатический экстремум (экстремальное метеорологическое или климатическое) – это достижение метеорологической или климатической переменной значения, которое выше (ниже) некоторого порога, близкого к верхнему (или нижнему) диапазону наблюдаемых значений переменной». Для нахождения экстремальных значений строился ранжированный ряд, разбивался на квантили (25 %, 50 %, 75 %), находилась разница между 75 % и 25 % квантилями. Значения, удаленные от значения 75 % -го квантиля более чем на полторы разницы, определяются как экстремальные.

Результаты и их обсуждение

Для рядов среднедекадной высоты снежного покрова на 3-х м/станциях Северного Кавказа были рассчитаны следующие статистики: среднее, стандартное отклонение, минимум, максимум, размах, коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса.

Статистические характеристики среднедекадной вы-
соты снежного покрова представлены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОТЫ СП ЗА 1960/1961–
2017/2018 ГГ.
Table 1. Statistical characteristics of the SC height for 1960/1961–
2017/2018

Метеостанции Статистики	Прохладная	Нальчик	Теберда
1. Среднее (ст. ошибка), $\bar{x}$	4,7 (0,3) см	4,1 (0,4) см	7,4 (0,6) см
2. Стандартное отклонение, σ	2,4 см	2,7 см	3,9 см
3. Минимум, min (сезон, гг.)	0,3 см (1980/1981)	0,8 см (1980/1981)	1,4 см (1965/1966)
4. Максимум, max (сезон, гг.)	12,0 см (2012/2013)	15,1 см (2011/2012)	22,1 см (2011/2012)
5. Размах, R	11,7 см	14,3 см	20,7 см
6. Асимметрия, As	0,9	1,7	1,4
7. Эксцесс, E	0,6	4,1	1,3
8. Нормальность распределения, $P > 0,05$	0,2 > 0,05 норм.	0,22 > 0,05 норм.	0,1 > 0,05 норм.
9. Климатическая норма (1961– 1990 гг.), N	3,8 см	4,2 см	4,4 см
10. Т-тест Sig > 0,05 (равны)	0,88>0,05 равны	0,92 > 0,05 равны	0,99 > 0,05 равны
11. Экстремумы	3 экстр ≥ 12 см	3 экстр ≥ 10 см	5 экстр ≥ 14 см
12. Угловой коэффициент тренда, a_1 /10 лет, к-т детерм. D, %	0,15 см/ 10 лет; 1,9 %	0,2 см/ 10 лет; 0,9 %	0,54 см/10 лет; 3,5 %
13. H, показатель Херста (формула)	0,56	0,57	0,58

Из таблицы 1 видно, что осредненное значение среднедекадной высоты снежного покрова в холодные сезоны 1960/61–2017/18 гг. составило: в горной зоне – 7,4 см ($\sigma = 3,9$ см), в предгорной – 4,1 см ($\sigma = 2,7$ см) и в равнинной – 4,7 см ($\sigma = 2,4$ см).

В равнинной (Прохладная) и предгорной (Нальчик) зоне минимальные значения среднедекадной высоты снежного покрова пришлось на зимний сезон 1980/81 гг., со значениями 0,3 см и 0,8 см соответственно. На горной м/станции Теберда минимальное значение высоты снежного покрова наблюдалось в сезон 1965/1966 гг. и составило 1,4 см.

Максимальное значение среднедекадной высоты снежного покрова на м/станции Прохладная составило 12,0 см и пришлось на сезон 2012/13 гг. На м/станциях Нальчик (15,1 см) и Теберда (22,1 см) максимальные значения пришлось на сезон 2011/2012 гг.

Размах между минимальными и максимальными значениями высоты СП увеличивается по мере увеличения высоты станций над уровнем моря (от равнинной м/станции $R = 11,7$ см до горной $R = 20,7$ см). На м/станциях Прохладная и Нальчик величина размаха в 5 раз превышает стандартное отклонение, а на м/станции Теберда в 4 раза.

Для определения трендоустойчивости временных рядов среднедекадной высоты СП был использован метод нормированного размаха (метод Херста). Показатель Херста для 3-х м/станций имеет градацию от $H = 0,56$ до $H = 0,58$, следовательно, процесс трендоустойчивый и имеет устойчивую тенденцию увеличения среднедекадной высоты снежного покрова на всех м/станциях. Коэффициент асимметрии положительный, за исследуемый период имеется большее количество лет, превышающих среднее значение среднедекадной высоты снежного покрова (рис. 1).

Средние многолетние значения высоты снежного покрова за исследуемый период на 2-х м/станциях превышают климатическую норму. На м/станции Прохладная при норме 3,8 см значение высоты снежного покрова составило 4,7 см, на м/станции Теберда 7,4 см при норме 4,4 см, но эти значения остаются в границах статистического равенства. Для м/станции Нальчик среднее значение на 0,1 см ниже климатической нормы.

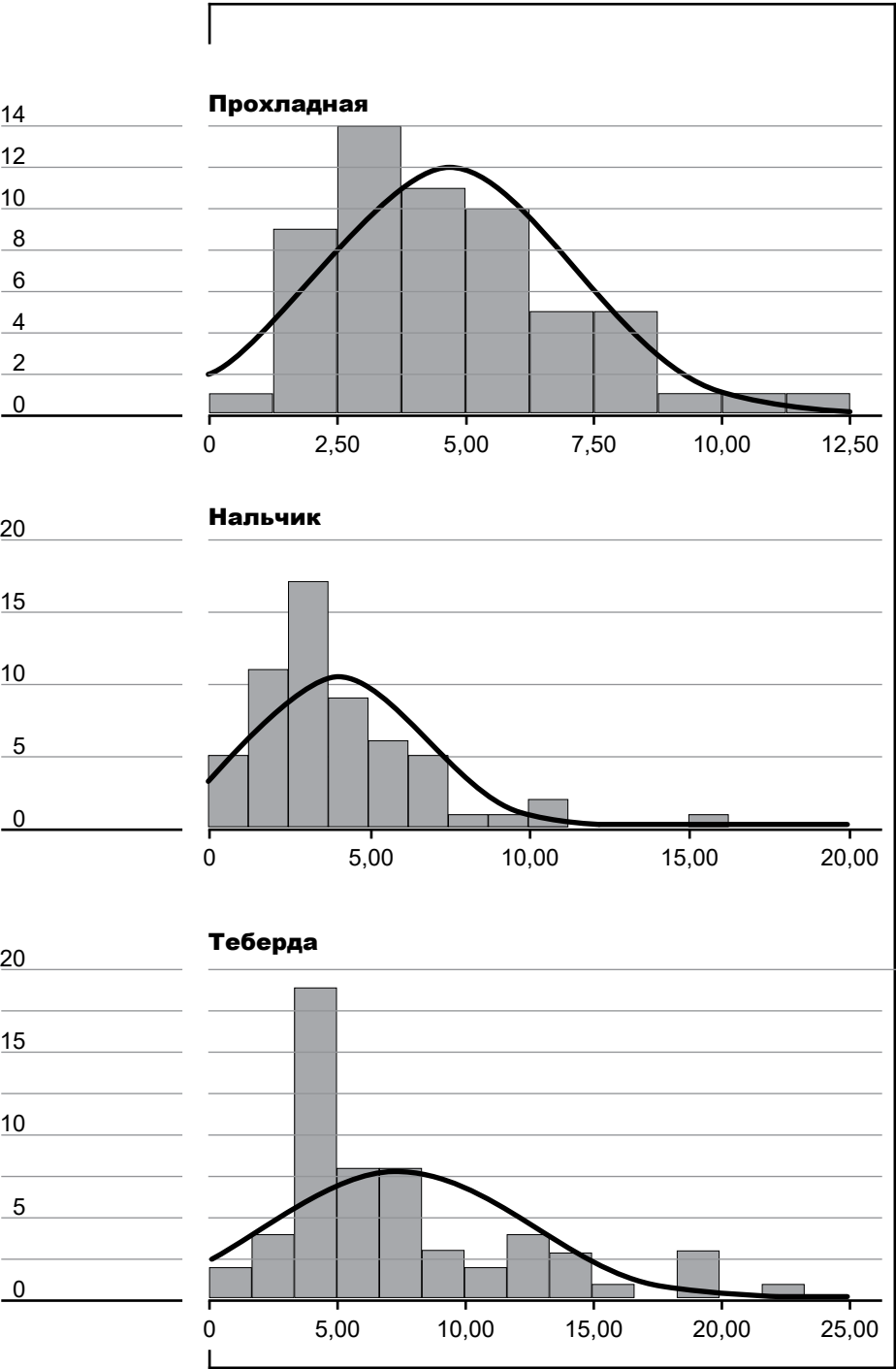


Рис. 1. Гистограмма частоты распределения высоты снежно-го покрова.
Fig. 1. Histogram of the frequency of distribution of the height of the snow cover.

Таблица 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНАМИКИ ВЫСОТЫ СНЕЖНОГО ПОКРОВА
Table 2. Characteristics of the dynamics of the height of the snow cover

Метеостанции	Температура, °С				
	Средняя температура	Стандартное отклонение	Аномалии	Угловой коэф-т тренда (1961–2018 гг.), b, см/10 лет(D, %)	Угловой коэф-т тренда (1976–2018 гг.), b, см/10 лет (D, %)
Прохладная	4,7	2,4	0,5	0,2 (1,9 %)	0,45 (4,8 %)
Нальчик	4,1	2,7	0,3	0,15 (0,9 %)	0,24 (1,3 %)
Теберда	7,4	3,9	0,9	0,54 (3,5 %)	0,65 (2,6 %)

Проведенный анализ скорости изменения высоты снежного покрова за весь период наблюдений (1961–2018 гг.) и в период глобального потепления (1976–2018 гг.) показал, что на всех рассматриваемых м/станциях имело место увеличение скорости роста среднедекадной высоты снежного покрова с последующим ее усилением в период с 1976 г. (на м/станции Прохладная с 0,2 см/10 лет до 0,45 см/10 лет, на м/станции Нальчик с 0,15 см/10 лет до 0,24 см/10 лет, на м/станции Теберда с 0,54 см/10 лет до 0,65 см/10 лет). Наиболее значимый тренд высоты СП получен на метеостанции Прохладная в период с 1976. по 2018 г. ($D = 4,8\%$) (табл. 2.).

Интерес представляет анализ аномалий высоты снежного покрова. За 58-летний период наблюдений на всех м/станциях имели место, как положительные, так и отрицательные аномалии, количество положительных аномалий меньше, чем отрицательных, хотя по абсолютной величине положительные аномалии значительно превышают отрицательные. На м/станциях Нальчик и Теберда наблюдалось одинаковое количество положительных (25) и отрицательных (33) аномалий. На м/станции Прохладная были отмечены 31 отрицательная и 27 положительных аномалий (рис. 2).

Для каждого отдельного ряда были выявлены экстремальные значения, превышающие пороговое значение, а также их повторя-

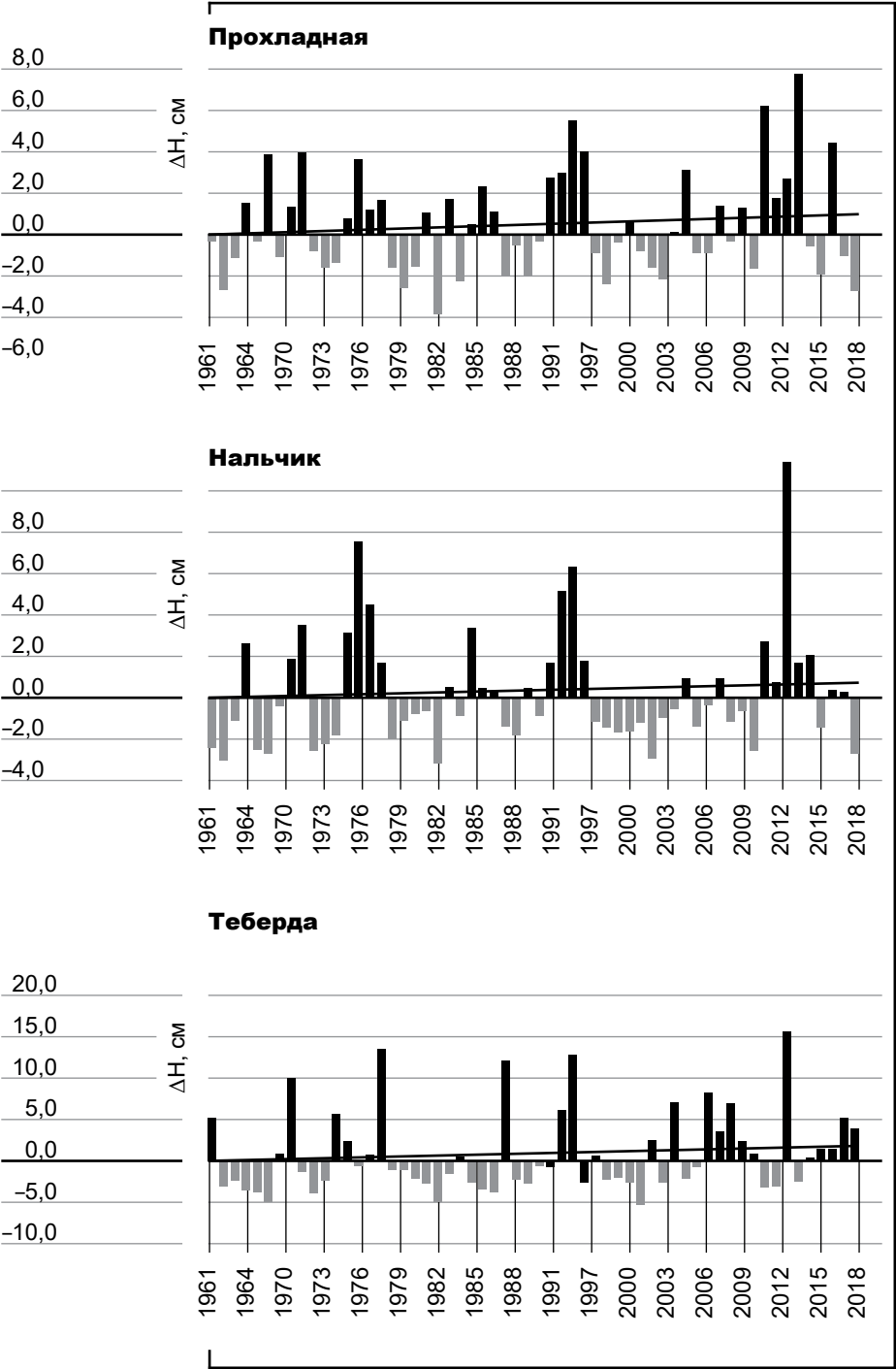


Рис. 2. Аномалии среднедекадной высоты СП с линейным трендом за 1961–2018 гг.
Fig. 2. Anomalies of the mean ten-day height of the SC with a linear trend for 1961–2018.

емость в базовый (1961–1990 гг.) и современный (1961–1990 гг.) периоды. На рисунке 3 приведены коробчатые диаграммы с медианной и экстремальными значениями высоты снежного покрова для трех м/станций за исследуемый период.

Как видно из рисунка 3 для м/станции Прохладная имелось одно экстремальное значение, равное пороговому $h = 12$ см, которое пришлось на сезон 2012/13 г. (современный период). Для предгорной м/станции Нальчик получены три экстремальных значения, превышающие или равные пороговому $h = 10$ см. На современный период пришлось два экстремальных значения (сезон 1992/93 г. со значением $h = 10,0$ см и сезон 2011/12 г. со значением $h = 15,1$ см) и одно значение наблюдалось в базовый период ($h = 11,1$ см, сезон 1973/74 г.). На горной м/станции Теберда имелось пять экстремальных значений, превышающих пороговое ($h = 14$ см), четыре из которых отмечались в современный период (1975/76 г. – $h = 20,0$ см, 1986/87 г. – $h = 18$ см, 1992/93 г. – $h = 19,2$ см, 2011/12 г. – $h = 22,1$ см) и один экстремум имел место в базовый период (1967/68 г. – $h = 16,4$ см).

Для анализа динамики изменения количества экстремальных значений среднедекадной высоты снежного покрова всех исследуемых м/станций были разделены на две группы, имевшие место в базовый (1961–1990 гг.) и в современный (1991–2018 гг.) периоды, как и в ранее проведенных исследованиях [11].

Было получено увеличение количества экстремальных значений в современный период по сравнению с базовым в 3,5 раза (7:2), что наглядно представлено на рисунке 4.

Проведенный анализ распределения среднедекадной высоты СП по месяцам холодного периода показал, что за исследованный период наибольшее осредненное значение высоты СП получено на горной м/станции Теберда в январе – 11,2 см, на предгорной м/станции Нальчик в феврале – 6,2 см, и на равнинной м/станции Прохладная в январе и феврале со значением 5,2 см (табл. 3).

Наибольшие вариации высоты СП за период наблюдений отмечены на горной м/станции Теберда от 0,8 см (1966 г.) до 16,8 см (2012 г.) при среднем многолетнем значении 5,3 см, затем следует предгорная м/станция Нальчик, где минимальная высота состави-

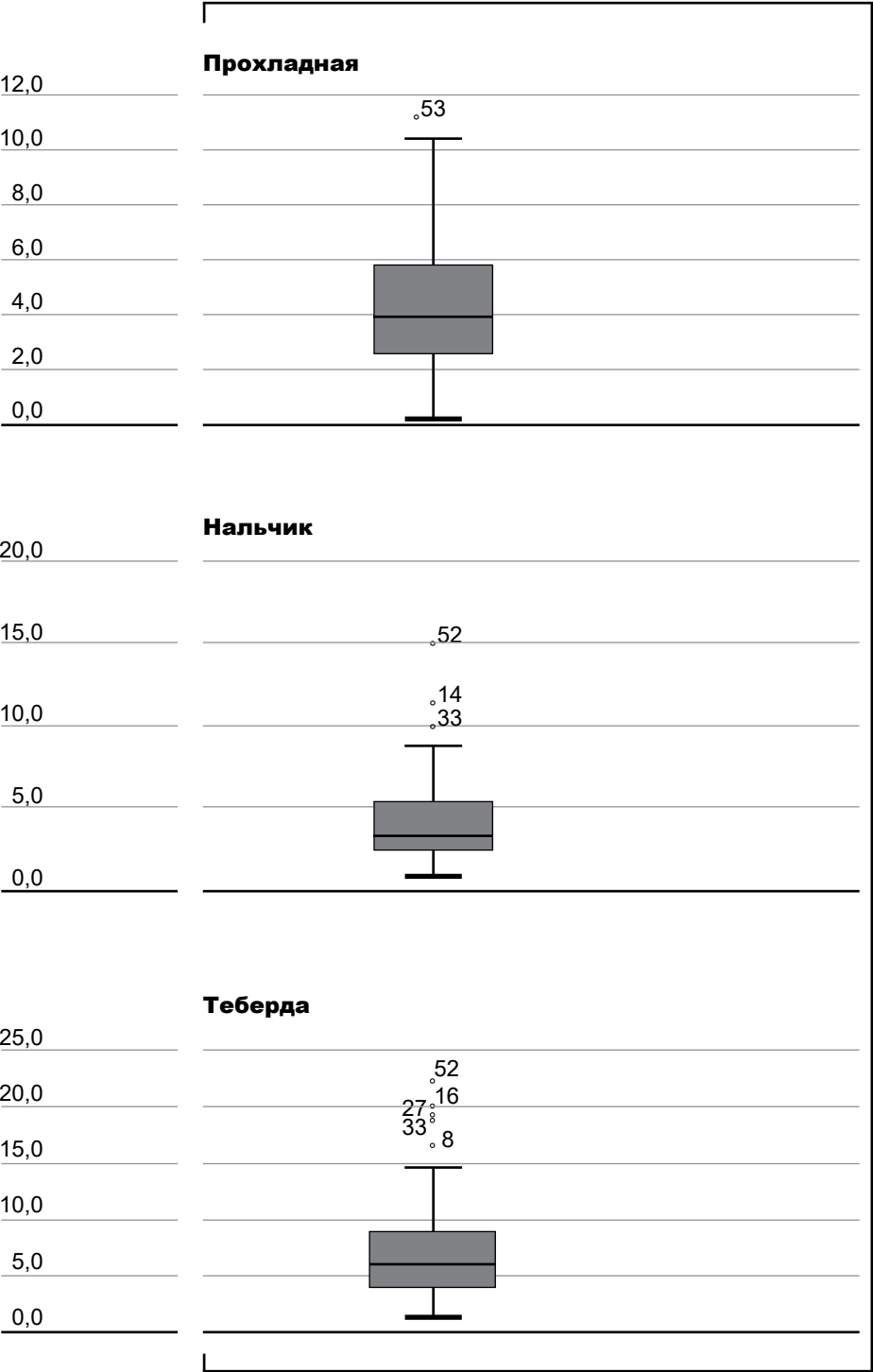


Рис. 3. Коробчатая диаграмма с медианой и экстремумами.
Fig. 3. Box plot with median and extrema.

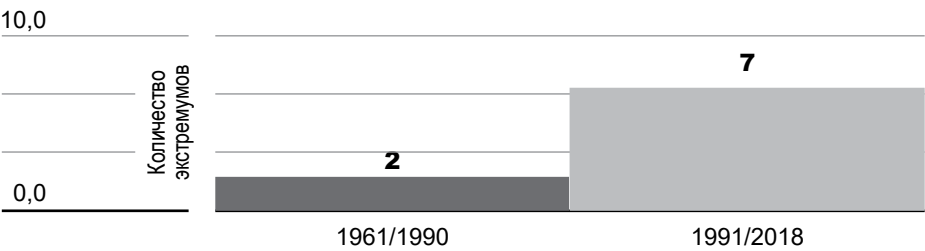


Рис. 4.

Динамика изменения количества экстремумов среднедекадной высоты СП в базовый (1961–1990 гг.) и современный (1991–2018 гг.) периоды.

Fig. 4. Dynamics of changes in the number of extrema in the average 10-day SC height in the base (1961–1990) and modern (1991–2018) periods.

Таблица 3.

СРЕДНЕДЕКАДНАЯ ВЫСОТА (СМ) СП ПО МЕСЯЦАМ

Table 3. Average 10-day SC height (sm) by months

Метеостанции	Месяцы						
	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель
Прохладная	3,4	2,4	3,2	5,2	5,2	3,3	0,0
Нальчик	0,8	1,7	3,3	4,4	6,2	3,2	1,2
Теберда	0,4	3,5	7,2	11,2	9,8	4,2	0,6

ла 0,8 см (1981 г.), а максимальная 15,1 см в 2012 г. На равнинной м/станции Прохладная минимальная высота снежного покрова была зафиксирована в 1981 г. – 0,3 см, максимальная – 12 см в 2013 г.

Выводы

За период с 1961 по 2018 г. на всех рассматриваемых м/станциях имело место увеличение скорости роста среднедекадной высоты снежного покрова с ее усилением в период 1976-2018 гг. Показатель Херста демонстрирует высокую трендоустойчивость рядов.

За 58-летний период исследований на всех исследуемых м/станциях количество положительных аномалий меньше, чем отрицательных, хотя по абсолютной величине положительные аномалии значительно превышают отрицательные.

Наибольшие вариации высоты СП за период наблюдений отмечены на горной м/станции Теберда от 0,8 до 16,8 см.

За весь период наблюдений на рассматриваемых м/станциях было выявлено 9 экстремальных значений высоты снежного покрова: на м/станции Прохладная – 1 экстремум, на м/станции Нальчик – 3 экстремума и на м/станции Теберда – 5 экстремальных значений. В современный период (1991–2018 гг.) отмечалось увеличение количества экстремальных значений среднедекадной высоты снежного покрова в 3,5 раза (7:2) по сравнению с базовым периодом.

Библиографический список

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. Росгидромет. Москва, 2021. 104 с.
2. Кренке, А.Н., Китаев, Л.М., Турков, Д.В. Климатическая роль изменений снежного покрова в период потепления // Известие РАН. Сер. геогр. 2001. №4. С. 44–52.
3. Булыгина, О.Н., Коршунова, Н.Н., Разуваев, В.Н. Критерии экстремальности климатических явлений в температурном режиме и режиме осадков на территории России // ТРУДЫ ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2008. №173. С. 120–125.
4. Булыгина О.Н. Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н. Изменение характеристик снежного покрова на территории России в последние десятилетия // Труды ВНИИГМИ-МЦД, 2007. №. 173. С. 54–62.
5. Ашабоков Б.А., Ташилова А.А., Кешева Л.А. «Климатические характеристики снежного покрова Северного Кавказа и их изменения в период глобального потепления», Материалы Международной научно-практической конференции «Глобальные вызовы современности и проблемы устойчивости развития Юга России», Россия, КБР, г. Нальчик, КБНЦ РАН, 2015. С. 258–264.
6. Ашабоков Б.А., Ташилова А.А., Кешева Л.А. «Сравнительный анализ динамики количества экстремальных характеристик снежного покрова на юге России», Материалы Всероссийской конференции с Международным участием «Устойчивое развитие; проблемы, концепции, модели», Россия, КБР, г. Нальчик, КБНЦ РАН, 2017. С. 118–121.
7. Hurst H.E., Black R.P., Simaika Y.M. Long-term storage: An experimental study. L.: Constable, 1965. 145 с.

8. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. Москва: Постмаркет, 2000. 352 с.
9. Федер Е. Фракталы / Е. Федер: пер. с англ. М.: Мир, 1991. 254 с.
10. Глоссарий терминов. МГЭИК, 2001. Специальный доклад Рабочей группы III МГЭИК [под редакцией Б. Метца, О.Р. Дэвидсона и др.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 466 с.
11. Ашабоков Б.А., Ташилова А.А., Кешева Л.А. Сравнительный анализ динамики количества экстремальных характеристик снежного покрова на юге России // Устойчивое развитие; проблемы, концепции, модели: Материалы Всероссийской конференции с Международным участием. Нальчик, 2017. С. 118–121.

References

1. Report on the peculiarities of the climate in the territory of the Russian Federation for 2020. Roshydromet. Moscow, 2021. 104 p.
2. Krenke, A.N., Kitaev, L.M., Turkov, D.V. The climatic role of changes in snow cover during the warming period // Izvestiya RAN. Ser. geogr. 2001. No 4. P. 44–52.
3. Bulygina, O.N., Korshunova, N.N., Razuvaev, V.N. Criteria for the extremeness of climatic phenomena in the temperature regime and precipitation regime on the territory of Russia // Proceedings of the State Institution "VNIIGMI-MCD", 2008. 173. P. 120–125.
4. Bulygina O.N., Korshunova N.N., Razuvaev V.N. Changes in the characteristics of snow cover on the territory of Russia in recent decades / Proceedings of VNIIGMI-WDC, 2007. No 173. P. 54–62.
5. Ashabokov B.A., Tashilova A.A., Kesheva L.A. "Climatic characteristics of the snow cover of the North Caucasus and their changes during the period of global warming", Materials of the International Scientific and Practical Conference "Global Challenges of the Present and Problems of Sustainable Development of the South of Russia", Russia, KBR, Nalchik, KBSC RAS, 2015. P. 258–264.
6. Ashabokov B.A., Tashilova A.A., Kesheva L.A. "Comparative analysis of the dynamics of the number of extreme characteristics of snow cover in the south of Russia", Materials of the All-Russian conference with international participation "Sus-

- tainable development; problems, concepts, models”, Russia, KBR, Nalchik, KBSC RAS, 2017. P. 118–121.
7. Hurst H.E., Black R.P., Simaika Y.M. Long-term storage: An experimental study. L.: Constable, 1965. 145 p.
 8. Kronover R.M. “Fractals and chaos in dynamical systems. Foundations of Theory”. Moscow: Postmarket, 2000. 352 p.
 9. Feder E. Fractals / E. Feder: Per. from English. M.: Mir, 1991. 254 p.
 10. Glossary of terms. IPCC, 2001. IPCC Working Group III Special Report [edited by B. Metz, OR. Davidson and others]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 466 p.
 11. Ashabokov B. A., Tashilova A. A., Kesheva L. A. Comparative analysis of the dynamics of the number of extreme characteristics of snow cover in the south of Russia // Sustainable Development; problems, concepts, models: Materials of the All-Russian conference with international participation. Nalchik, 2017. P. 118–121.

Поступило в редакцию 11.08.2021,
принята к публикации 06.09.2021.

Сведения об авторах

Кешева Лара Асировна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт». Адрес: Россия, Кабардино-Балкарская республика, г. Нальчик, пр. Ленина, д. 2.
Scopus ID: 57191577471, Researcher ID: K-4261-2015.
Телефон (903) 490-47-75, E-mail: kesheva.lara@yandex.ru

About the authors

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”. Address: Russia, Kabardino-Balkar Republic, Nalchik, Lenin Ave., 2. Scopus ID: 57191577471
Researcher ID: K-4261-2015. Phone: (903) 490-47-75.
E-mail: kesheva.lara@yandex.ru

25.00.30
УДК 551.557.59

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ, АГРОМЕТЕОРОЛОГИЯ
(ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Смерек Ю.Л.,
Афанасьев И.С.,
Закинян Р.Г.,
Крупкин А.А.

Северо-Кавказский федеральный университет,
г. Ставрополь,
Россия

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ СУХОГО ВОЗДУХА В АТМОСФЕРЕ

DOI: 10.37493/2308-4758.2021.4.9

Введение.

Современное состояние вопросов, связанных с исследованием процессов динамики атмосферных явлений, носящих достаточно сложный многопараметрический характер, требует всестороннего подхода. Такое направление исследований определяется применением, наряду с аналитическим методом, численных методов получения решений рассматриваемых задач. Применение указанных методов позволяет получить решение поставленной задачи в общем виде, выраженного через определенные коэффициенты, нахождение которых, безусловно, требует наложения дополнительных условий. Однако применение численных методов позволяет в большей степени провести математический анализ полученных решений, а также поведение этих зависимостей при различных заданных параметрах, что в свою очередь позволяет сформировать целостное представление о динамике процессов при изменении тех или иных параметров.

Материалы и методы
исследования.

Широкое применение на современном этапе исследований вопросов, связанных с атмосферными явлениями получили методы математического моделирования. Основу этих методов составляют уравнения, описывающие динамику воздуха, а также процессы переноса лучистой энергии, тепла и влаги в атмосфере. При построении краевой задачи динамики рассматриваемой среды необходимо задание граничных условий, определяющих область определения решаемой задачи, а также состояние системы на границах этой области. В работе решение исследуемой задачи проводится численными методами с использованием набора инструментов компьютерной программы Maple 2021. Также были получены уравнения траекторий и линий тока воздушной частицы и построены соответствующие графики.

Результаты исследования
и их обсуждение.

В работе проводится исследование, а также математический и численный анализ математической модели динамики сухого воздуха при наличии малых возмущений давления в атмосфере, что приводит к нарушению стационарного состояния среды и возникновению конвективных движений. Основная задача проведенного исследования заключалась в нахождении общего вида решения

системы уравнений, описывающих динамику сухого воздуха без учета вязкости среды, получение уравнения траектории движения воздушной частицы, а также проведение качественного анализа вида полученных выражений при различных значениях постоянных интегрирования. Анализ полученных результатов позволяет получить численные значения критических постоянных, входящих как параметры в полученные уравнения траектории воздушной частицы, и отвечающих за возникновение конвективных движений рассматриваемой среды.

Выводы.

В данной работе с помощью математического пакета Maple 2021 получено общее решение задачи определения функции тока, описывающей движение воздушной частицы при возникновении возмущения давления в атмосфере, а также составляющих скорости движения в вертикальной плоскости. Проведен численный анализ полученных решений, характеризующих процессы переноса в среде. Получены в общем виде выражения для уравнения траекторий и линий тока воздушных частиц. При заданных значениях постоянных интегрирования, были графически представлены виды полученных зависимостей. Анализ графиков показывает, что при определенных условиях, связанных с некоторыми критическими значениями постоянных интегрирования, наблюдаются замкнутые криволинейные траектории движения. Отклонения от указанных значений данных постоянных в сторону больших или меньших значений приводят либо к не замкнутости траектории, либо к изменению формы и размера замкнутой ячейки.

Ключевые слова:

Конвекция сухого воздуха, возмущение параметров давления, плотности, температуры, уравнение Эйлера, уравнение теплопроводности.

Smerek Yu.L.,
Afanasief I.S.,
Zakinyan R.G.,
Krupkin A.A.

North Caucasus Federal University,
Stavropol,
Russia

**Numerical Analysis of the Conditions
for the Occurrence of Free Convection
of Dry air in the Atmosphere**

Introduction.

The current state of issues related to the study of the processes of dynamics of atmospheric phenomena, which are quite complex multiparameter in nature, requires a comprehensive approach. This direction of research is determined by the application, along with the analytical method, of numerical methods for obtaining solutions to the problems under consideration. The use of these methods allows you to get a solution to the problem in a general form, expressed through certain coefficients, the finding of which, of course, requires the imposition of additional conditions. However, the use of numerical methods allows

to a greater extent to conduct a mathematical analysis of the solutions obtained, as well as the behavior of these dependencies under various specified parameters, which in turn allows you to form a holistic view of the dynamics of processes when changing certain parameters.

**Materials and methods
of the research.**

Methods of mathematical modeling of the processes of air particle movement. The basis of these methods are equations describing the dynamics of air, as well as the processes of transfer of radiant energy, heat and moisture in the atmosphere. When constructing the boundary problem of the dynamics of the environment under consideration, it is necessary to set boundary conditions that determine the scope of determining the problem to be solved, as well as the state of the system at the boundaries of this region. In the work, the solution of the problem under study is carried out by numerical methods using a set of tools of the computer program Maple 2021, which allows solving a system of partial differential equations of the second order. Also, using the numerical methods of the program, equations of trajectories and current lines of the air particle were obtained, as well as corresponding graphs were constructed.

**The results of the study and
their discussion.**

The paper conducts a study, as well as a mathematical and numerical analysis of the mathematical model of dry air dynamics in the presence of small pressure perturbations in the atmosphere, which leads to a violation of the stationary state of the environment and the emergence of convection movements. The main task of the study was to find a general solution to the system of equations describing the dynamics of dry air without taking into account the viscosity of the medium, to obtain an equation of the trajectory of the air particle, as well as to conduct a qualitative analysis of the type of expressions obtained at different values of constant integration. The analysis of the obtained results allows to obtain numerical values of critical constants, included as parameters in the obtained equations of the trajectory of the air particle, and responsible for the occurrence of convective movements of the medium under consideration.

Conclusions. In this paper, using the mathematical package Maple 2021, a general solution of the problem of determining the current function describing the motion of an air particle when a pressure disturbance occurs in the atmosphere, as well as the components of the speed of movement in the vertical plane, is obtained. A numerical analysis of the obtained solutions characterizing the migration processes in the environment is carried out. The expressions for the equation of trajectories and current lines of air particles are obtained in general form. At the given values of constant integration, the types of the obtained dependencies were graphically presented. Analysis of graphs shows that under certain conditions associated with some critical values of constant integration, closed curvilinear trajectories of motion are observed. Deviations from the specified values of these constant data in the direction of greater or smaller values lead either to the non-closure of the trajectory, or to a change in the shape and size of the closed cell.

Key words:

Dry air convection, pressure disturbance, density disturbance, temperature disturbance, Euler's equation, heat equation.

Введение

Динамика земной атмосферы в целом носит весьма сложный характер, значительную роль в атмосферных процессах выполняют конвективные движения, возникающие под воздействием широкого спектра метеорологических условий. Проблема гидродинамической устойчивости и условий возникновения конвекции решается на протяжении двух столетий.

В гидродинамике в основном изучаются два типа конвекции. Первый возникает при нагреве вязкой среды снизу; как только амплитуда нагрева превышает определенное критическое значение, среда самоорганизуется в систему отдельно вращающихся вихрей (конвективных ячеек). Это естественная конвекция или конвекция Рэлея – Бенара.

Второй тип конвекции, конвекция Хэдли, возникает из-за нагрева в горизонтальном направлении. В лабораторном эксперименте, в котором одна стенка вращающегося кольцевого канала нагревается, а другая охлаждается, двумерная ячейка развивается в радиально-вертикальной плоскости.

Очевидно, что в реальных атмосферных процессах в чистом виде не наблюдается того или иного типа конвекции, а исследование поставленной задачи усложняется многопараметричностью условий возникновения атмосферной конвекции.

В связи с этим, приобретает актуальность математическое исследование вопросов, связанных с процессами конвекции. А именно, постановка краевых задач и использование методов математического моделирования при различных краевых условиях, определяющих метеорологические характеристики возникающих конвективных процессов. Основу этих методов составляют уравнения, описывающие движение (динамику) воздуха, а также процессы переноса лучистой энергии, тепла и влаги в атмосфере [2].

Материалы и методы исследования

Широкое применение на современном этапе исследований вопросов, связанных с атмосферными явлениями, получили методы математического моделирования движения воздушной частицы, в том числе и конвективных движений. Основу этих методов составляют уравнения, описывающие динамику воздуха,

а также процессы переноса лучистой энергии, тепла и влаги в атмосфере. При построении краевой задачи динамики рассматриваемой среды необходимо задание граничных условий, определяющих область определения решаемой задачи, а также состояние системы на границах этой области. В работе решение исследуемой задачи проводится численными методами с использованием набора инструментов компьютерной программы Maple 2021, которая позволяет решить систему дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка [4]. Также помощью численных методов программы были получены уравнения траекторий и линий тока воздушной частицы, а также построены соответствующие графики.

Результаты исследований и их обсуждение

При описании тепловой конвекции воздуха в атмосфере вязкостью воздуха пренебрежем. Другими словами, воздух будем рассматривать как идеальную жидкость. Движение идеальной жидкости описывается уравнением Эйлера, записанного в инерциальной системе отсчета (без источника массы и учета вращения Земли) [5]:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho_i} \nabla p + \mathbf{g}. \quad (1)$$

Используем также уравнение неразрывности (без источника массы)

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_i \mathbf{v}) = 0. \quad (2)$$

В работе проводится рассмотрение области определения, связанной с формированием конвекционного движения вблизи поверхности Земли, при условии, что можно пренебречь ее отклонением от плоской формы. То есть, при рассмотрении масштабов конвекционных процессов вблизи поверхности Земли мы пренебрегаем ее геоидальной формой.

Будем учитывать также, что в состоянии статики атмосферы температура меняется с высотой по линейному закону, и в цилиндрической системе координат может быть представлена выражением:

$$T_e(r, \varphi) = T_{eR} - \gamma r \cdot \cos \varphi,$$

$$T_{eR} = T_{e0} - \gamma R_0,$$

где T_{e0} — температура воздуха вблизи поверхности земли в некоторой точке отсчета в состоянии статики атмосферы.

Таким образом, в состоянии статики атмосферы горизонтальный градиент температуры равен нулю. Другими словами, наличие горизонтального градиента температуры всегда будет вызывать конвективное движение.

В декартовой двухмерной системе координат OXZ система уравнений, описывающая динамику конвекции, запишется в виде:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

где u и w — составляющие вектора скорости $\mathbf{v}$ по осям OX и OZ соответственно.

В возмущенном состоянии в общем случае для давления можно записать

$$p(x, z) = p_e(x, z) + p'(x, z), \quad (6)$$

т.е. в виде суммы давлений в состоянии статики и возмущения относительно него (будем считать, что возникшие возмущения сравнительно малы).

Рассмотрим установившееся (стационарное) движение среды, в котором в каждой точке пространства Oxz физические величины не зависят от времени:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial t} = 0.$$

Также ρ не является функцией от времени t , то есть в каждой точке пространства Oxz значение плотности ρ является установившимся. Тогда можно ввести функцию тока ψ , которая связана с составляющими скоростей u , w , исходя из уравнения (5), следующим образом:

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad (7)$$

$$w = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (8)$$

Здесь мы учли, что $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$.

Тогда стационарное движение жидкости (воздуха) задаётся следующей системой [7]:

$$\psi_z \psi_{xz} - \psi_x \psi_{zz} = -\frac{1}{\rho} p'_x, \quad (9)$$

$$-\psi_z \psi_{xx} + \psi_x \psi_{zx} = -\frac{1}{\rho} p'_z, \quad (10)$$

где $\psi = \psi(x, z)$, $\rho = \rho(x, z)$, $p' = p'(x, z)$.

В программе для математических вычислений Maple 2021 были рассмотрены некоторые частные случаи установившегося движения идеальной жидкости. Допустим, мы рассматриваем ограниченную поверхность идеальной жидкости (воздуха), в которой мы можем считать плотность ρ в произвольной точке равной среднему значению $\langle \rho \rangle$ (например, водоём или приземный слой, в ко-

тором флуктуации малы), т.е. примем, что $\rho = const$. В ней возникают малые возмущения и спустя продолжительное время изучаются характеристики движущейся жидкости.

Рассмотрим случай, когда возмущение давления связано с периодической функцией:

$$p'(x, z) = A \sin(x) \sin(z). \quad (11)$$

Для случая возмущения давления, определяемого выражением (11) вид функции представлен на рисунке 1.

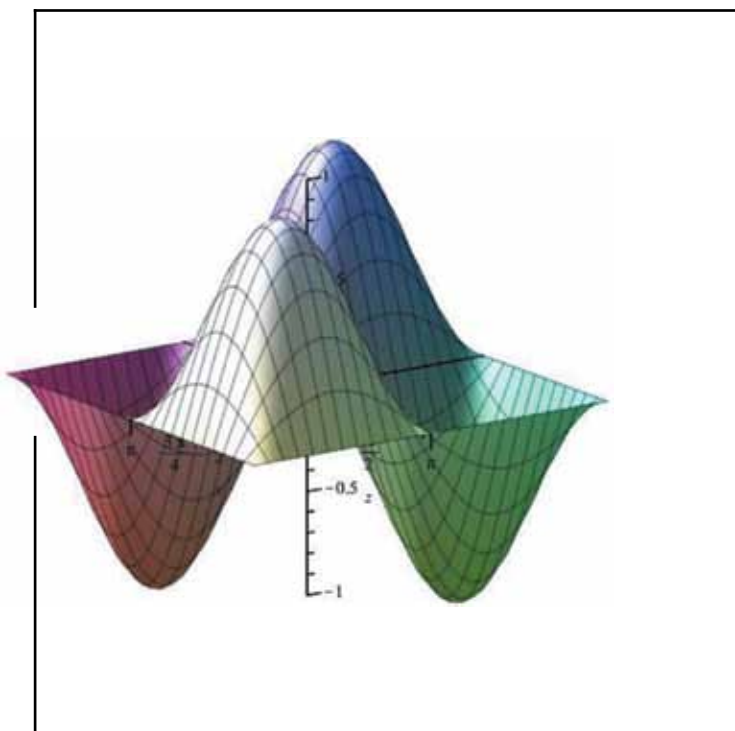


Рис. 1.

Возмущение давление, определяемое функцией (11) в пределах $x = -\pi.. \pi$, $z = -\pi.. \pi$.

Fig. 1. The pressure perturbation determined by the function (11) within $x = -\pi.. \pi$, $z = -\pi.. \pi$.

В программе Maple 2021 находим решение системы дифференциальных уравнений в частных производных (9) – (10) и получаем выражения для функции тока и составляющих вектора скорости движения идеальной жидкости, присваивая возмущению давления, приведённые выше функциональные зависимости вида (11):

$$\psi = C_1 + C_2 \sin(x) - \frac{A \sin(z)}{C_2 \rho}, \quad (12)$$

$$u = -\frac{A \cos(z)}{C_2 \rho}, \quad (13)$$

$$w = -C_2 \cos(x). \quad (14)$$

Рассмотрим поле траекторий частиц для рассматриваемого стационарного случая. Для пространства OXZ уравнение траектории «воздушной частицы» имеет вид [3]:

$$\frac{dx}{u(x, z)} = \frac{dz}{w(x, z)}. \quad (15)$$

Таким образом, определим уравнение векторных линий поля скоростей. Подставляя выражения составляющих вектора скорости (13), (14) в (15), получаем дифференциальное уравнение:

$$z_x = \frac{C_2^2 \rho \cos(x)}{A \cos(z(x))}. \quad (16)$$

Решая дифференциальное уравнение, получим выражение, описывающее линии тока (или траекторию) для заданного стационарного поля:

$$C_3 = -\frac{C_2^2 \rho \sin(x) + A \sin(z)}{C_2^2 \rho}. \quad (17)$$

Можно предположить, что траектория движения частиц в данном поле задаётся наложением двух волн, фазовые характеристики которых определяются положением в плоскости Oxz . Амплитуда одной из них равна $A/(C_2^2 \rho)$, у другой мы примем её значение равной -1 , то есть рассматривается две волны:

$$y_1 = -\sin(x); \quad (18)$$

$$y_2 = \frac{A \sin(z)}{C_2^2 \rho}; \quad (19)$$

$$y_1 + y_2 = C_3. \quad (20)$$

Для построения траектории частиц заданного поля, зададимся определенными значениями постоянных интегрирования.

В данной модели будем все время считать $\rho = -1$ и $A = 1$. Рассмотрим случай, когда C_2 также равна 1, то есть будем менять исключительно C_3 , которая будет определять характерное поведение траектории частиц. Множество значений C_3 задаёт все возможные конвективные ячейки при заданных параметрах C_2 и ρ . Также стоит отметить, что амплитуды таких волн будут равными. Рассмотрим это на конкретных примерах.

Представим вид траекторий частиц, построенных при заданных произвольных положительных значениях коэффициента C_3 , равного соответственно 0,1; 0,5; 0,9; 1,4 (рис. 2, а). В результате мы получаем заполненные ячейки, чередующиеся с пустыми. Можно показать, что пустые ячейки будут «отрицательными», а при $C_3 = 0$ появляются прямые линии, разделяющие бесконечное множество конвективных ячеек. Для этого мы также задаем ряд констант C_3 : -1 ; $-0,2$; 0 ; $0,3$; $1,4$. При этом, цветные ячейки соответствуют области положительных значений, чёрные – отрицательным, а коричневые линии появляются при $C_3 = 0$. В результате мы получаем графически поле траекторий для рассматриваемых конвективных ячеек, в

центре которых они представляют собой эллипсы, вытянутые вдоль OX (рис. 2, б).

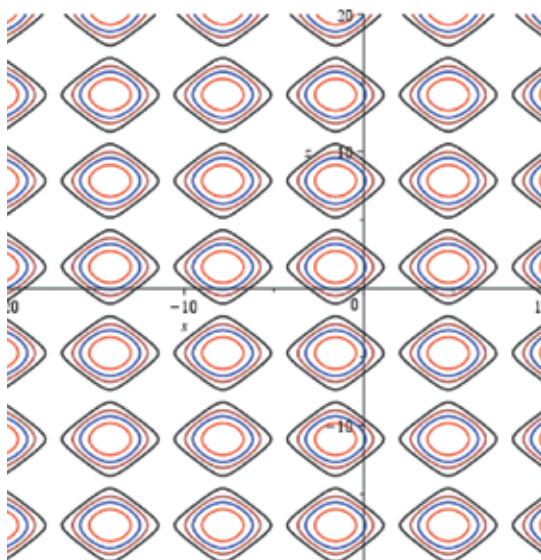
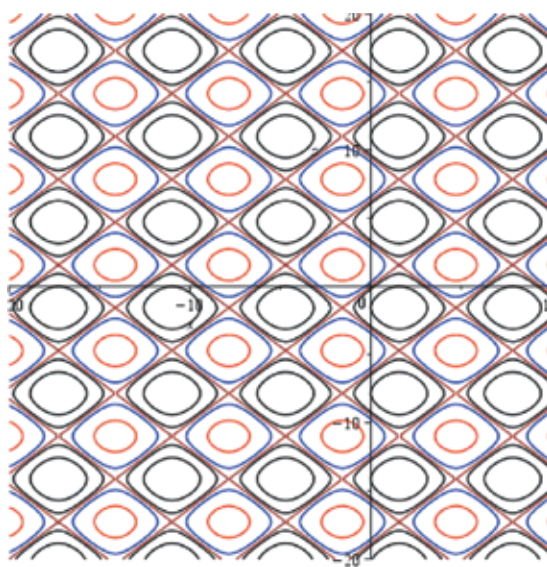
Проведенный анализ позволяет предположить, что $C_3 > 0$, когда амплитуда волны y_1 больше y_2 по модулю, и наоборот. Так как значения этих волн определяются положением частиц в плоскости OXZ , то в одних точках пространства образуются ячейки, для которых $C_3 > 0$, выше названные «положительными», в других же точках пространства $y_1 + y_2 \leq 0$ (это следует из [20]), то есть образуются «отрицательные» ячейки.

При равных амплитудах, которые рассматриваются в данном случае, все ячейки одинаковые и симметричные как при $C_3 > 0$, так и при $C_3 < 0$. Отличительным является лишь условие, когда $C_3 = 0$. При этом, все ячейки ограничены линейной зависимостью. Однако при $C_3 = 0$ конвективных движений не наблюдается, то есть $C_3 \neq 0$ – необходимое условие возникновения конвективных ячеек.

Следует отметить, что диапазон всех возможных значений C_3 ограничен, так как по определению значение тригонометрической функции не может быть больше 1 по модулю. Соответственно, так как у нас рассматриваются волны единичной амплитуды, то диапазон всех значений C_3 – от -2 до 2. При значениях C_3 , близких к 0, траектория частиц переходит от эллиптической к *криволинейной*, максимально вытягиваясь; если же C_3 стремится к предельно возможным значениям, то траектория сужается и в конце концов превращается в точку.

Соответственно, можно предположить, что если $C_3 = 0$, то мы наблюдаем свободное движение, в результате которого частицы выходят из конвективного потока. Траекторией движения будет ничем не ограниченная зигзагообразная произвольная линия. При рассмотрении случая, когда C_3 достигает предельных значений, частицы колеблются вокруг одной точки. Соответственно, конвективные движения наблюдаются при значениях $C_3 = \in (-2; 0) \cup (0; 2)$, при $C_3 = 0$ – свободное движение частиц.

Получим аналогично графики для такого же ряда чисел C_3 при коэффициентах $C_2 < 1$ и $C_2 > 1$. Основным ориентиром будет «нулевой» коэффициент, обозначенный на графиках коричневой линией. Так, при произвольном коэффициенте $C_2 < 1$, например, 0,85, про-

(а)**(б)****Рис. 2 (а, б).**

Поле траекторий частиц при $C_2 = 1$: а) C_3 принимает только положительные значения (0,1, 0,5, 0,9, 1,4); б) C_3 принимает как положительные, так и отрицательные и нулевые значения (-1, -0,2, 0, 0,3, 1,4).

Fig. 2 (a, b). The field of particle trajectories at $C_2 = 1$: a) C_3 takes only positive values (0.1, 0.5, 0.9, 1.4); b) C_3 takes both positive and negative and zero values (-1, -0.2, 0, 0.3, 1.4).

исходит вытягивание ячеек вдоль оси OX (рис. 3). В результате происходит смазывание границ между ячейками, и коричневая линия становится ломаной кривой. Образуется множество горизонтальных уровней, разделённых этими линиями. Траектории движения частиц в центре конвективной ячейке представляют собой ещё более вытянутый эллипс, то есть происходит возрастание эксцентриситета ε .

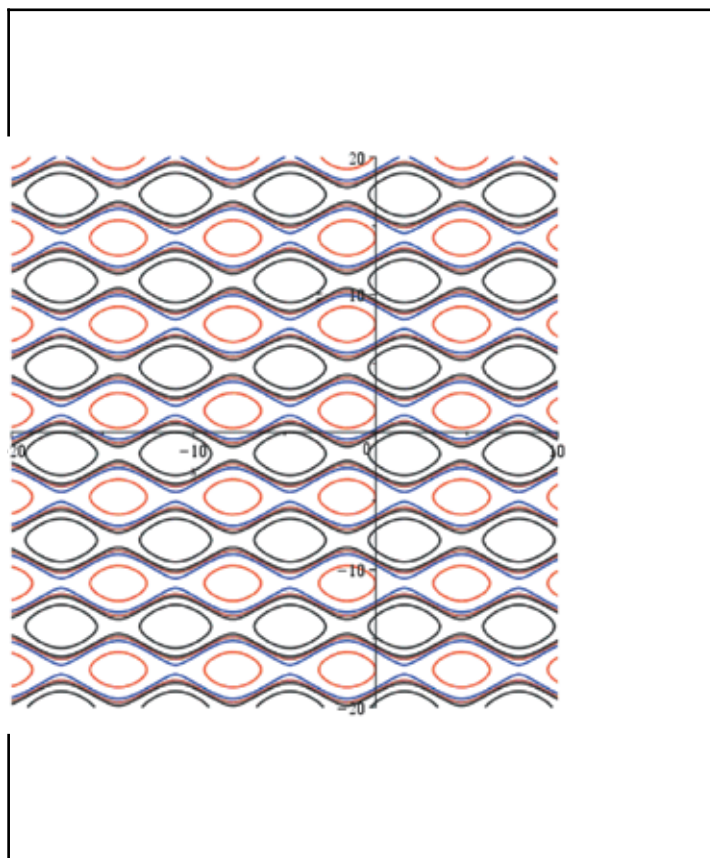
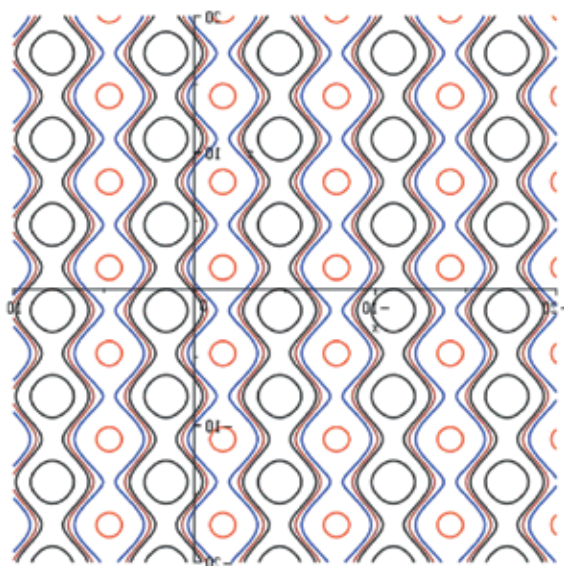


Рис. 3.

Поле траекторий частиц при $C_2 < 1$
(в данном случае $C_2 = 0,85$).

Fig. 3. The field of particle trajectories at $C_2 < 1$
(in this case $C_2 = 0,85$).

(a)



(б)

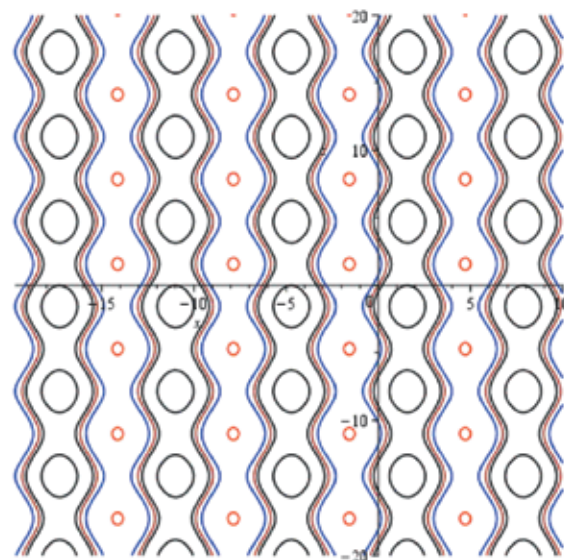


Рис. 4 (а, б).

Поле траекторий частиц при $C_2 > 1$:а) $C_2 = 1,25$; б) $C_2 = 1,5$.Fig. 4 (a, b). The field of particle trajectories at $C_2 > 1$:а) $C_2 = 1,25$; б) $C_2 = 1,5$.

Рассмотрим теперь $C_2 > 1$, например, возьмем 1,25 (рис. 4, а) и 1,5 (рис. 4, б). Теперь же происходит вытягивание ячеек вдоль оси OZ . Также происходит смазывание границ между ячейками, и коричневая линия становится ломаной кривой. Образуется множество вертикальных уровней, разделённых этими линиями. Траектории движения частиц в центре конвективной ячейке также претерпевают изменения: сначала происходит уменьшение эксцентриситета ϵ , то есть при $C_2 = 1,25$ траектории близки к круговым, при дальнейшем возрастании C_2 (например, $C_2 = 1,5$) получаются эллипсы, вытянутые уже вдоль оси OZ .

Также стоит заметить, что при некоторых значениях $C_3 < C^*$ (не только при $C_3 = 0$) траектории частиц перестают быть замкнутыми, что наблюдается при наложении двух волн с разными амплитудами.

Тем не менее, были получены условия, накладывающие ограничение на поле траектории частиц, включающие как конвективные, так и свободные движения.

Для простоты, полученное уравнение траекторий можно записать в виде:

$$C_3 = -\sin(x) + A \sin(z).$$

Когда $A = 1$ (первый случай) и $C_3 = 0$,
то получаем выражение:

$$\sin(z) = \sin(x)$$

$$x = z + n\pi$$

Для других значений C_3 :

$$\sin(x) = \sin(z) - C_3$$

В случае, когда A не равна 1, можно записать:

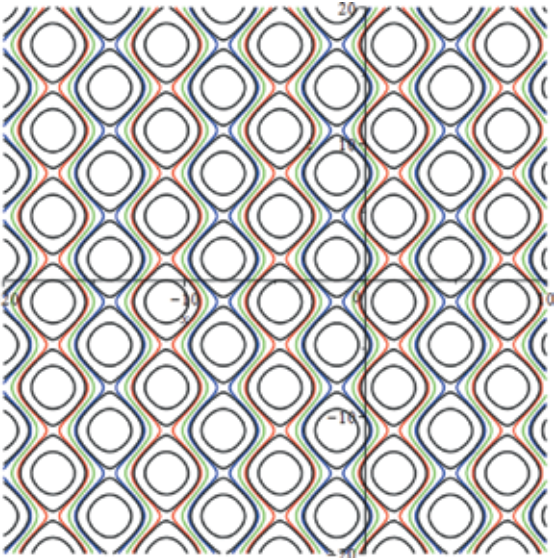


Рис. 5. Поле траекторий частиц при $C_2 > 1$
(в данном случае $C_2 = 0,85$).
Fig. 5. The field of particle trajectories at $C_2 > 1$
(in this case $C_2 = 0,85$).

$$C_3 = -\sin(x) + A \sin(z)$$

То есть, имеются ограничения $-1 - A$ до $1 + A$.

При C_3 , близких к нулю, получаем волнообразное незамкнутое движение частиц. Однако при некотором значении $C_3 = C^*$ траектории начинают смыкаться. При большем отклонении C_3 от нулевого значения образуются конвективные ячейки.

Из рисунка 5 видно, что при $C_3 = \pm 0,3$ (красная линия) получаемый вид траектории соответствует незамкнутой линии, а при $C_3 = \pm 0,4$ наблюдается уже замкнутая криволинейная траектория, описывающая, по-видимому, конвективное движение.

При этом, при возрастании разницы амплитудных значений (при изменении параметра A или C_2) между двумя волнами возрастает числовое значение параметра, определяющего условие перехода к замкнутым траекториям C^* и уменьшается доля замкнутых ячеек (параметры из рисунка 4 – 0,35 и 0,65 для C^*).

Особенности конвективных ячеек при $C_2 \neq 1$ (при этом сохраняя неизменными значения плотности ρ и коэффициента A , равных 1) объясняются тем, что квадрат этого коэффициента входит в знаменатель амплитуды второй волны $y_2(19)$, то есть C_2 влияет на амплитуду волны по оси OZ . Из выражения (20), характеризующего наложение двух волн, следует, что при $C_2 < 1$ происходит вытягивание по оси OX , и наоборот, при $C_2 > 1$ происходит вытягивание по оси OZ .

Таким образом, был проведён численный анализ условий и видов движения воздушной частицы в поле возмущений давления, траектории которых выражаются через разность двух тригонометрических функций. Была проведена физическая аналогия с наложением двух волн, фазы которых зависят от положения в рассматриваемой плоскости OXZ . Рассмотрены формы, размеры и особенности траекторий частиц, находящиеся в конвективных ячейках и задаваемые ограниченным множеством целых чисел коэффициента C_3 . Также показано влияние значений амплитуды накладываемых друг на друга волн; у первой волны значение амплитуды было фиксированное, у второй была обратная зависимость с коэффи-

циентом C_2 . Было замечено, что чем больше разница между амплитудами волн u_1 и u_2 , тем более размытыми получаются границы конвективных ячеек.

Выводы

В данной работе с помощью математического пакета Maple 2021 получено общее решение задачи определения функции тока, описывающей движение воздушной частицы при возникновении возмущения давления в атмосфере, а также составляющих скорости движения в вертикальной плоскости. Проведен численный анализ полученных решений, характеризующих процессы переноса в среде. Функция возмущения давления задавалась в виде произведения гармонических функций, каждая из которых зависит от одной пространственной переменной.

Получены в общем виде выражения для уравнения траекторий воздушных частиц. При заданных значениях постоянных интегрирования были графически представлены виды полученных зависимостей. Анализ графиков показывает, что при определенных условиях, связанных с некоторыми критическими значениями постоянных интегрирования, наблюдаются замкнутые криволинейные траектории движения. Отклонения от указанных значений данных постоянных в сторону больших или меньших значений приводит либо к не замкнутости траектории, либо к изменению формы и размера замкнутой ячейки.

Также показано, что при различных значениях постоянной, отвечающей за возмущение давления по вертикальному направлению, происходит вытягивание замкнутой ячейки либо по вертикальному, либо по горизонтальному направлению.

Полученное, таким образом, в общем виде решение задачи конвекции сухого воздуха позволяет, по-видимому, на качественном уровне провести описание процесса конвекции воздушной частицы в атмосфере при различных значениях постоянных, а также провести исследование и прогнозирование динамики исследуемых процессов.

Библиографический список

1. Аристов С.Н., Просвирыков Е.Ю. О слоистых течениях плоской свободной конвекции: Научная статья. Ижевск: Нелинейная динамика, 2013, Т. 9. №4. С. 651–657.
2. Биркгоф Г. Гидродинамика. М.: Издательство иностранной литературы, 2011. 244 с.
3. Гидравлика: учебник и практикум для академического бакалавриата / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, А.Г. Коваленко, И. В. Кудинов; под редакцией В. А. Кудинова. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Издательство Юрайт, 2014. 386 с. (Бакалавр. Академический курс). Текст: электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. URL: <https://urait.ru/bcode/381465>.
4. Голоскоков Д.П. Практический курс математической физики в системе Maple: учебное пособие для вузов. СПб.: ПаркКом, 2010. 643 с.
5. Закиян Р.Г. Уравнения тепловой конвекции в состоянии статики атмосферы / Р. Г. Закиян, К. С. Аванесян. Текст: непосредственный // Молодой ученый. 2015. № 4 (84). С. 26-30. URL: <https://moluch.ru/archive/84/15583/> (дата обращения: 20.08.2021).
6. Сухов С.А., Закиян Р.Г. Двумерная конвекция Рэлея-Хэдли // Межвузовский сборник научно-практических трудов ученых ведущих вузов Ставропольского края. г. Ставрополь: Изд-во «Мир данных», 2011 г. С. 44–49.
7. Рыжков Р.Д., Аванесян К.С., Смирнова Л.Н., Закиян Р.Г. Двумерная модель конвекции сухого воздуха // Наука. Инновации. Технологии. 2019. Вып. 1. С. 107–120.
8. Алексеев В.В., Гусев А.М. Свободная конвекция в геофизических процессах // Успехи физических наук. 1983. Т. 141. Вып. 2. С. 311–342.
9. Журавлев В.М. Нелинейные волны в многокомпонентных системах с дисперсией и диффузией. Точно решаемые модели. Ульяновск: УлГУ, 2001. 200 с.
10. Zakinyan R.G. Zakinyan A.R., Lukinov A.A. Two-dimensional analytical model of dry air thermal convection. Meteorol. Atmos. Phys. 2015. P. 127, 451-455.

References

1. Aristov S. N., Prosviryakov E. Yu. On layered flows of plane free convection: A scientific article // Izhevsk: Nonlinear Dynamics, 2013. Vol. 9. № 4. P. 651– 657.

2. Birkhof G. Hydrodynamics. Moscow: Publishing House of foreign literature, 2011. 244 p.
3. Hydraulics: textbook and practical course for academic bachelor's degree / V. A. Kudinov, E. M. Kartashov, A. G. Kovalenko, I. V. Kudinov; edited by V. A.
4. Goloskokov D. P. Practical course of mathematical physics in the Maple system: a textbook for universities. – St. Petersburg: ParkCom LLC, 2010 – 643 p.
5. Zakinyan, R. G. Equations of thermal convection in the state of atmospheric statics / R. G. Zakinyan, K. S. Avanesyan. – Text: direct // Young scientist. – 2015. – № 4 (84). – P. 26-30. – URL: <https://moluch.ru/archive/84/15583/> (accessed: 20.08.2021).
6. Sukhov S. A., Zakinyan R. G. Two-dimensional Rayleigh – Hadley convection // Interuniversity collection of scientific and practical works of scientists of leading universities of the Stavropol Territory. Stavropol: Publishing house of LLC "World of Data", 2011. P. 44–49.
7. Ryzhkov R.D., Avanesyan K.S., Smirnova L.N., Zakinyan R.G. To the two-dimensional model of heat convection of dry air in the atmosphere // Science. Innovations. Technologies. 2019, №1, P. 107-120.
8. Alekseev, V.V., Gusev A.M. Free convection in geophysical processes // Sov. Phys. Usp., 1983. Vol. 141. №2. P. 311-342.
9. Zhuravlev V.M. Nonlinear waves in multicomponent systems with dispersion and diffusion. Exactly solvable models. Ulyanovsk: UISU, 2001. 200 p.
10. Zakinyan R.G. Zakinyan A.R., Lukinov A.A. Two-dimensional analytical model of dry air thermal convection. Meteorol. Atmos. Phys. 2015. P. 127, 451–455.

**Поступило в редакцию 20.09.2021,
принята к публикации 22.11.2021**

Об авторах

Смерек Юлия Леонтьевна – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и математической физики физико-технического факультета Северо-Кавказского федерального университета.
Телефон (8652)330660
E-mail: smerek@mail.ru

Закинян Роберт Гургенович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и математической физики физико-технического факультета Северо-Кавказского федерального университета.
Телефон (8652)330660
E-mail: zakinyan@mail.ru

Афанасьев Игорь Сергеевич – студент направления 03.04.02 Физика, физико-технического факультета Северо-Кавказского федерального университета.
Телефон 8-906-469-86- 97
E-mail: afanasevigor278@gmail.com.

Крупкин Александр Александрович – кандидат физико-математических наук, учитель информатики и физики, МБОУ СОШ № 43 имени героя РФ В.Д. Нужного, г. Ставрополь, Россия
Телефон 8-963-382-40-87
E-mail: screamstv@mail.ru

About authors

Smerek Julia Leontievna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theoretical and Mathematical Physics of the Faculty of Physics and Technology of the North Caucasus Federal University.
Phone (8652)330660.
E-mail: smerek@mail.ru

Zakinyan Robert Gurgenovitch – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Theoretical and Mathematical Physics of the Faculty of Physics and Technology of the North Caucasus Federal University.
Phone (8652)330660.
E-mail: zakinyan@mail.ru.

- Afanasyev** Igor Sergeevich – student of the direction 03.04.02 Physics, Faculty of Physics and Technology of the North Caucasus Federal University.
Phone 8-906-469-86-97.
E-mail: afanasevigor278@gmail.com.
- Krupkin** Alexander Alexandrovich – PhD in Physics and Mathematics
Computer science and physics teacher Municipal budgetary educational institution school № 43 named Hero of RF V.D. Nuzhniy, Stavropol, Russia
Phone 8-963-382-40-87.
E-mail: screamstv@mail.ru.

25.00.30
УДК 551.583

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Ташилова А.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Высокогорный геофизический институт», Россия

СТАТИСТИКА ХЕРСТА (R/S-АНАЛИЗ) В ИССЛЕДОВАНИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ

Doi: 10.37493/2308-4758.2021.4.10

Введение.

В статье проведен R/S -анализ устойчивости трендов климатических переменных методом нормированного размаха, который является одним из непараметрических подходов для исследования рядов, не удовлетворяющих всем условиям стандартной гауссовой статистики. Для исследования устойчивости системы, ведущей себя не как случайная величина, а проходящей более длительный путь (смещенное броуновское движение с наличием тренда), был использован индикатор Херста H .

Материалы и методы исследований.

Оценка трендоустойчивости (персистентности) изменений температуры воздуха проводилась с помощью метода нормированного размаха (R/S -анализ). В основе метода лежит определение индикатора Херста H с целью анализа размаха параметра (наибольшего и наименьшего значения на изучаемом отрезке) и среднеквадратичного отклонения и его зависимость от периода изучаемого времени T . Индикатор Херста H призван дать ответ на вопрос, каким будет следующее значение исследуемого ряда, больше или меньше текущего. Исследования проведены с использованием многолетних данных средних, максимальных и минимальных температур приземного воздуха 20 метеостанций различных климатических зон юга России (по данным государственной наблюдательной сети Росгидромета Северо-Кавказского УГМС).

Результаты исследований и их обсуждение.

При анализе климата исходными данными являются временные ряды, содержащие значения тех или иных климатических показателей (температуры, осадков, влажности и т.п.) за некоторый период. Традиционно для анализа данных ряда климатических параметров используются тренды. При этом решается задача предсказания будущих значений ряда. В то же время тренд ничего не говорит о том, насколько устойчив ряд. Таким образом, классические методы анализа являются малоинформативными и имеют много методологических ограничений к применению. В работе представлены результаты анализа временных рядов с использованием метода нормированного размаха R/S . Получено, что индикаторы устойчивости H характеризуют устойчивость и долгосрочность изменения временных рядов годовых и летних средних температур ($H = 0,80$), а также осенних средних температур ($H = 0,73$). Ряды годовых, летних ($H = 0,75$) и осенних максимальных температур ($H = 0,70$), а также весенних минимальных температур ($H = 0,72$) также имели устойчивые тенденции.

- Выводы: Результаты *R/S*-анализа показали, что ряды температур не являются идеальным пуассоновским процессом (без памяти), напротив, существует некоторая долгосрочная корреляция между последними событиями и начальными. Изменение климатических переменных как явление, несет двойственные характеристики случайности и регулярности, и чем больше индикатор Херста *H* отклоняется от 0,5, тем больше регулярности проявляется во временных рядах, и наоборот.
- Ключевые слова: метод нормированного размаха, *R/S*-анализ, индикатор Херста, фрактальная размерность, персистентность, тренд, температура, осадки.

Tashilova A.A. Federal State Budgetary Institution
"Vysokogorny Geophysical Institute",
Russia

Hurst Statistics (*r/s*-analysis) in the Study of Climatic Variables

Introduction. An *R/S* analysis of the persistence of trends in climatic variables was carried out in the article using the normalized range method, which is one of the nonparametric approaches for studying series that do not satisfy all the conditions of standard Gaussian statistics. To study the stability of a system behaving not as a random variable, but passing a longer path (shifted Brownian motion with the presence of a trend), the Hurst indicator *H* was used.

Materials and methods of research. The trend stability (persistence) of air temperature changes was assessed using the normalized range method (*R/S* analysis). The method for determining the Hurst indicator *H* is based on in order to analyze the range of the parameter (the largest and the smallest values on the period of the segment) and the standard deviation and its dependence on the period of the studied time *T*, more or less than the current one. The use of long-term data of average, maximum and minimum surface air temperature of 20 meteorological stations of different climatic southern Russia (according to the state observational network of Roshydromet of the North Caucasian Directorate of the Hydrometeorological Service) is used.

Results of the study and their discussion. When analyzing the climate, the initial data are time series containing the values of certain climatic indicators (temperature, precipitation, humidity, etc.) for a certain period. Traditionally, trends are used to analyze data for a number of climatic parameters. This solves the problem of predicting future values of the series. At the same time, the trend does not say anything about how stable the series is. Thus, classical methods of analysis are not very informative and have many methodological limitations for their application. The paper presents the results of time series analysis using the method of the normalized range *R/S*. It was found that the indicators of stability *H* characterize the stability and long-term changes in the time series of annual and summer average temperatures (*H* = 0.80), as well as autumn average temperatures (*H* = 0.73). Series of annual, summer

- ($H = 0.75$) and autumn maximum temperatures ($H = 0.70$), as well as spring minimum temperatures ($H = 0.72$) also had stable trends.
- Conclusions. The results of the R/S-analysis showed that the temperature series is not an ideal Poisson process (without memory), on the contrary, there is some long-term correlation between the last events and the initial ones. Change in climatic variables as a phenomenon, it bears the dual characteristics of randomness and regularity, and the more the Hurst indicator H deviates from 0.5, the more regularity appears in the time series, and vice versa.
- Key words: method of normalized range, R/S-analysis, Hurst indicator, fractal dimension, persistence, trend, temperature, precipitation.

Введение

Понимание естественной изменчивости климатической системы имеет решающее значение для прогнозирования нелинейных климатических воздействий и резких изменений, возможно, из-за антропогенной деятельности. Целью данного исследования является изучение свойства устойчивости (персистентности) природных рядов метеопараметров для возможности прогнозирования изучаемого процесса на основе данных об его истории.

Любое исследование с применением методов классической статистики начинается с выдвижения и проверки гипотезы о случайности процессов, происходящих в системе. Для удовлетворения всех условий стандартной гауссовой статистики, события должны быть независимыми друг от друга и иметь одинаковую вероятность наступления. Долгое время предполагалось, что большинство крупных, комплексных систем должны моделироваться именно таким образом [1, 2]. Традиционно для анализа данных ряда климатических параметров используются тренды. Тренд представляет собой общую систематическую линейную или нелинейную компоненту, которая может изменяться во времени. Используя уравнение тренда, решается задача предсказания будущих значений ряда. В то же время тренд ничего не говорит о том, насколько устойчив ряд. Стандартная гауссова статистика не имеет инструмента для исследования устойчивости тренда и лучше всего работает на основе ограниченных предположений: измеряемые события должны быть «независимы и идентично распределены». Если временной ряд не подчиняется нормальному закону, то существуют различные методы внесения в него корректировок, чтобы с некоторыми оговорками

назвать его случайным и идентично распределенным. В таком случае, классические методы анализа являются малоинформативными и имеют много методологических ограничений к применению.

Однако, если изучаемая система не удовлетворяет указанным выше условиям, то появляется необходимость использования нового, непараметрического подхода, такого как метод нормированного размаха (R/S -анализ), предложенного Г. Херстом [3] и получившее дальнейшее развитие в работе Б. Мандельброта [4]. Исходя из предположения о том, что временной ряд на некотором интервале масштабов самоподобен, а процессы, происходящие в данный момент, определяются предыдущими состояниями, особый интерес представляет оценка долговременной памяти исследуемых рядов метеопараметров с помощью метода нормированного размаха [5–8].

Материалы и методы исследований

Классическим примером случайной системы является броуновское движение и для него справедливо соотношение, полученное Эйнштейном (1908 г.) для движения броуновской частицы (беспорядочный путь, который проходит частица, взвешенная в жидкости):

$$R = aT^{1/2},$$

где R – пройденное расстояние;
 T – показатель времени;
 a – константа.

Броуновское движение стало первичной моделью для процесса случайных блужданий. Практические исследования английского гидролога Гарольда Херста [3] природных явлений показали, что размах расширяется несколько быстрее, чем это следует из формулы Эйнштейна. Херст расширил уравнение Эйнштейна и привел его к более общей форме. Для калибровки временных изменений Г. Херст ввел безразмерное отношение посредством деления размаха на стандартное отклонение наблюдений:

$$\frac{R}{S} = (aT)^k, \quad (1)$$

где R – размах;
 S – стандартное отклонение;
 T – временной интервал;
 k – показатель степени;
 a – константа.

Согласно формуле Херста показатель степени k составил примерно 0,7. Система ведет себя не как случайная величина, а проходит более длительный путь, что можно определить как смещенное броуновское движение (с наличием тренда). Это возможно, если предыдущие события влияли друг на друга. Значение R/S изменяет масштаб по мере увеличения приращения времени T согласно показателю степенной зависимости, равному k , который в дальнейшем стали называть индикатором Херста H . В дальнейшем метод получил развитие в работах Бенуа Мандельброта как фрактальная геометрия [4]. Б. Мандельброт отметил важную особенность, что размах вариации изменяет свой масштаб в зависимости от числа наблюдений по степенному закону. Изменение масштаба по степенному закону – это признак самоподобия и, как следствие, фрактальности временного ряда. Требуемая для фрактального анализа ряда R/S траектория представляется в логарифмических координатах последовательностью точек, абсциссы которых $x_t = \lg(0,5T)$, а ординаты $y_t = \lg(R/S)$.

Соединяя отрезком соседние точки (x_t, y_t) и $(x_t + 1, y_t + 1)$, $T = 3, 4, \dots, n-1$ получаем графическое представление R/S -траектории (H -траектории) в логарифмических координатах (в обычных декартовых координатах). В двойных логарифмических координатах зависимость логарифма нормированного размаха от логарифма времени имеет линейную зависимость, что будет показано далее. Поскольку все фракталы изменяют масштаб согласно степенной зависимости, то в этом проявляются фрактальные свойства многих природных явлений.

Броуновское движение, как и любой процесс с независимыми приращениями, есть марковский процесс. Это означает, что условная вероятность события « $X(t_2)$ достигает определенного значения при данном значении $X(t_1)$ » где $t_1 < t_2$ зависит только от t_1 и t_2 . Эта ве-

роятность не зависит от поведения $X(t)$ при $t < t_1$, то есть в процессе случайного блуждания каждый шаг делается без какой-либо информации, каким образом процесс достиг текущего значения. Случайный процесс, обладающий некоторой памятью, получил название фрактального броуновского движения (ФБД) и был исследован Б. Мандельбротом. В книге Р.М. Кронуера [9] дано следующее определение фрактального броуновского движения (ФБД): «Гауссовский процесс $X(t)$ называется фрактальным броуновским движением (ФБД) с параметром H ($0 < H < 1$), если он обладает следующими свойствами:

1. $X(0) = 0$ и функция $X(t)$ почти всегда непрерывна.
2. Свойство гауссовости приращений: случайная величина $\Delta X = X(t_2) - X(t_1)$ подчиняется гауссовскому распределению с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $\sigma^2 (t_2 - t_1)^{2H}$:

$$P(\Delta X < x) = \frac{1}{2\pi\sigma(t_1 - t_2)^H \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{u}{\sigma(t_1 - t_2)^H}\right)^2\right) du}, \quad (2)$$

где $t_2 > t_1$, σ — положительная константа.

Большинство естественных явлений следуют «смещенному случайному блужданию», то есть тренду с шумом. В работе Е. Федера [10] показано, что приращение в прошлом коррелировано с будущими приращениями с бесконечно большим временем корреляции. Функция корреляции будущих приращений с приращениями в прошлом имеет вид:

$$C(T) = 2^{2H-1} - 1. \quad (3)$$

Отсюда следует, что при $H = 0,5$ корреляция прошлых и будущих приращений $C(T)$ отсутствует при всех T и ФБД совпадает с классическим броуновским движением. Устойчивость тренда и уровень шума могут быть оценены тем, как для рассматриваемого временного ряда изменяется с течением времени его

нормированный размах, то есть насколько рассчитанная величина $H(0; 1)$, называемая показателем Херста, превосходит значение 0,5. Отсюда следует немарковское свойство фрактального броуновского движения:

1. Если $H > 0,5$, то $X(t) - X(0)$ (приращение в настоящем) и $X(t+h) - X(t)$ (приращение в будущем), скорее всего, имеют одинаковые знаки и функция $X(t)$ обычно возрастает в будущем, если она возрастала в прошлом. Такие временные последовательности относятся к классу персистентных – сохраняющих имеющуюся тенденцию (броуновское движение со смещением). Теоретически то, что происходило вчера и происходит сегодня, воздействует на будущее и существует большая вероятность того, что если предшествующее движение было положительным, то оно останется положительным еще какое-то время. Если, например, $H = 0,6$, то существует, в принципе, большая вероятность того, что, если предшествующее движение было положительным, то оно останется положительным еще какое-то время. Это не истинная вероятность, это просто мера «смещения».
2. Если же $H < 0,5$, то $X(t) - X(0)$ (приращение в настоящем) и $X(t+h) - X(t)$ (приращение в будущем), скорее всего, имеют различные знаки, а значит функция $X(t)$ обычно убывает в будущем, если она возрастала в прошлом (наличие долговременной памяти). Процессы являются анти-персистентными и для них характерна знакопеременная тенденция в сочетании с относительно высоким уровнем зашумленности, то есть последующий период времени с большой вероятностью будет характеризоваться изменением направления тренда.

При $H = 0,5$ ФБД совпадает с классическим броуновским движением, имеют место процессы, в которых тренд от-

сутствует (классическое броуновское движение), а степень зашумленности определяется факторами, которые нельзя учесть в методе Херста–Мандельброта, то есть эти процессы чисто стохастические и хорошо описываются стандартной (гауссовой) функцией распределения.

Реализация одномерного ФБД с параметром H имеет топологическую размерность D . Существует как минимум две вариации фрактальной размерности – D и A . Фрактальную размерность D (размерность временного следа – это оценка степени изломанности ряда) определяют по формуле:

$$D = 2 - H. \quad (4)$$

Фрактальная размерность D временного ряда или накопленных изменений при случайном блуждании ($H = 0,5$) равна 1,5. Фрактальная размерность кривой линии равна 1,0, а фрактальная размерность геометрической плоскости равна 2,0. Таким образом, фрактальная размерность случайного блуждания лежит посреди между кривой линией и плоскостью и характеризует собой независимую случайную систему. Если $0,5 < H \leq 1,0$, то это будет соответствовать фрактальной размерности, более близкой к кривой линии, что по терминологии Херста является персистентным временным рядом, дающим более гладкую, т.е. менее зазубренную линию, нежели случайное блуждание. Анти-персистентная величина $0 < H < 0,5$ дает более высокую фрактальную размерность и более прерывистую линию, чем случайное блуждание, т.е. характеризует систему, более подверженную переменам.

Б. Мандельброт в работе [4] показал, что фрактальная размерность является обратной величиной от H . Например, при $H = 0,5$ фрактальная размерность равна 2 ($1/0,5$), а при $H = 0,8$ фрактальная размерность равна 1,25 ($1/0,8$). Таким образом, фрактальную размерность по Мандельброту A (размерность пространства вероятностей – оценка толщины хвостов в функции плотности вероятности) рассчитывают по формуле:

$$A = 1/H. \quad (5)$$

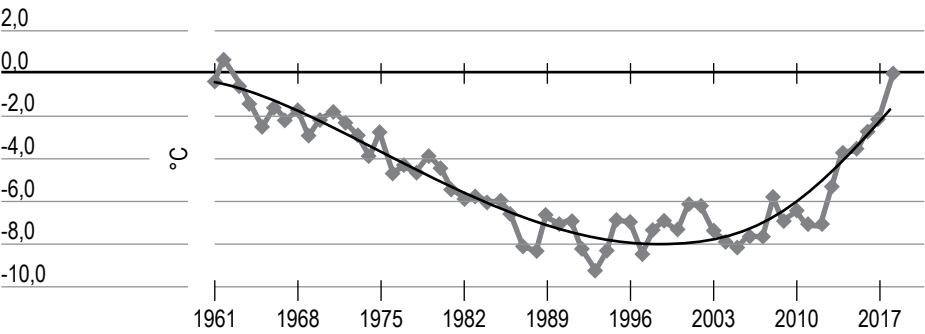
Здесь фрактальная размерность A отличается от фрактальной размерности D тем, что D – есть фрактальная размерность временного следа, а A – есть фрактальная размерность пространства вероятностей. Другими словами, D измеряет степень «зазубренности» временного ряда, а A – толщину хвостов в функции плотности вероятности («лептоэксцесс»).

В качестве примера на рисунке 1 приведены графики накопленных отклонений рядов средних сезонных температур и сумм осадков по данным м/станций Теберда и Нальчик за 1961–2018 гг. Параметр H соответствует степени изрезанности:

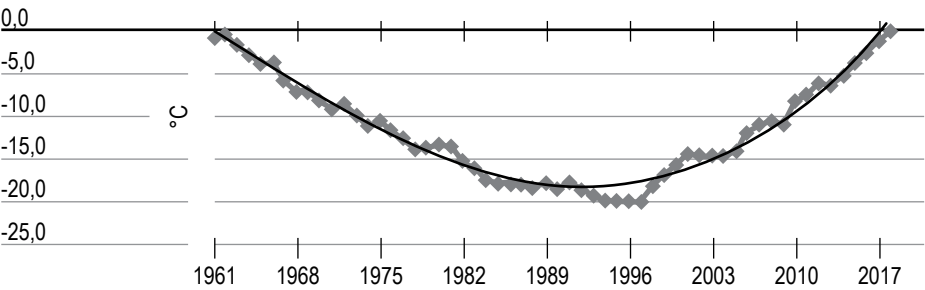
- 1) при больших значениях $H \approx 1$, $D \rightarrow 1$ (топологическая размерность – график плавный, стремится к одномерной линии (рис. 1а, б), а при малых значениях $H \approx 0$, $D \rightarrow 2$ (топологическая размерность график имеет большую изрезанность и стремится заполнить двумерную плоскость (рис. 1в, г).

Из рисунка 1 видно, что в отличие от временных рядов метеопараметров, характеризующих режим осадков, где показатель Херста принимает значения от $H = 0,41$ (анти-персистентный ряд), $H = 0,5$ (стохастический ряд) до $H = 0,72$ (персистентный ряд), во временных рядах температур отсутствуют стохастические и анти-персистентные ряды (данные приведены в таблице 4 ниже).

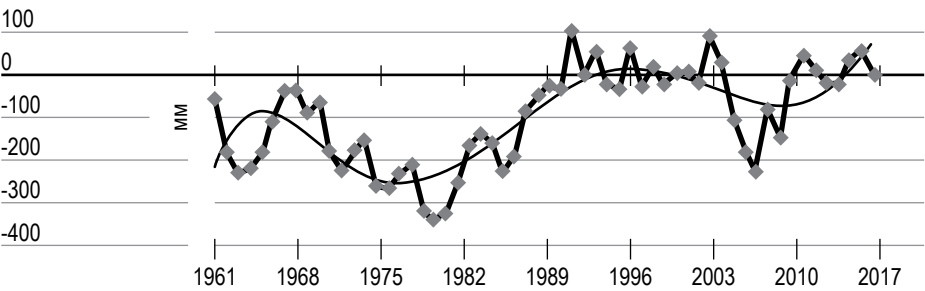
В основе метода нормированного размаха (R/S -анализ) лежит анализ размаха отклонения от среднего (наибольшего и наименьшего значения) R на изучаемом отрезке временного ряда $X_1, \dots, X_n$, нормированного среднеквадратичным отклонением S , и его зависимость от периода изучаемого времени T . На первом этапе проводится расчет среднего значения X_m ряда $X_1, \dots, X_n$ (n – количество элементов ряда) и эмпирического стандартного отклонения ряда S . Затем проводится нормализация ряда, путем вычитания из каждого значения среднего значения, и создание кумулятивного временного ряда, каждый член которого является суммой текущего значения и предыдущего. То есть анализируются не суммы самих данных, составляющих динамический ряд, а размах суммы отклонений этих данных от среднего арифметического, нормированный путем деле-



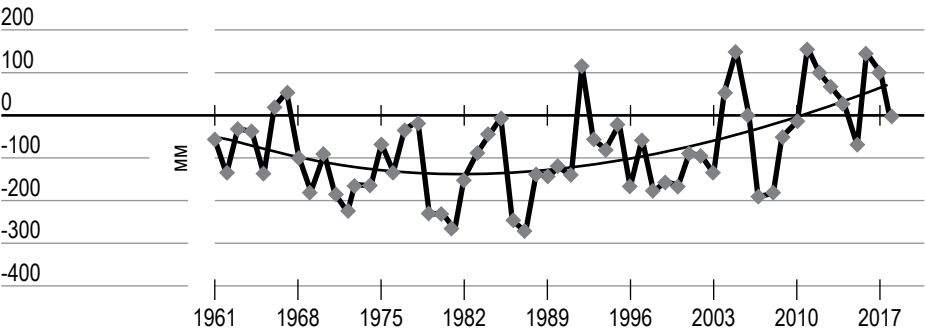
а) $H = 0,72$; $D = 1,28$ ($D \rightarrow 1$, стремится к линии): весенние средние температуры, Теберда.



б) $H = 0,92$; $D = 1,08$ ($D \approx 1$, линия): летние средние температуры, Теберда.



в) $H = 0,55$; $D = 1,45$ ($D \rightarrow 1,5$, стремится заполнить плоскость): летняя сумма осадков, Нальчик.



г) $H = 0,41$; $D = 1,59$ ($D \rightarrow 2$, плоскость): годовая сумма осадков, Нальчик.

Рис. 1. Графики накопленных отклонений рядов температур и осадков.
Fig. 1. Graphs of accumulated deviations of temperature and precipitation series.

ния на стандартное отклонение. Размах R_n – разность между максимальным и минимальным уровнями накопленного отклонения X_n :

$$R_n = \max (X_k - \frac{k}{n} X_n) \quad (6)$$

где X_n – накопленное отклонение за n шагов (периодов);

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_k^2 - \bar{x}_k^2)}{n}} - \text{эмпирическое стандартное отклонение}, \quad (7)$$

$$\bar{x}_n = \frac{X_n}{n} - \text{эмпирическое среднее}, \quad (8)$$

$$\frac{R_n}{S_n} - \text{нормированный размах накопленных сумм } X_k, k \leq n, \quad (9)$$

$$\frac{R_n}{S_n} = (aT)^H. \quad (10)$$

Логарифмируя обе части этого равенства, получим оценку показателя Херста H :

$$H = \frac{\lg(\frac{R_n}{S_n})}{\lg(aT)}, \quad (11)$$

где T – период наблюдений;

a – заданная константа (Херст эмпирически рассчитал эту константу как $a = 0,5$).

Уравнение (11) показывает, что на разных отрезках времени нормированный размах (отношение диапазона к стандартному отклонению) имеет степенную зависимость от продолжительности времени, в этом случае индикатор Херста вычисляется по формуле (1) с использованием полного временного ряда.

Результаты и их обсуждение

1. Расчет индикатора Херста по формуле: с помощью формул (6) – (11) был составлен алгоритм вычисления показателя Херста в среде Microsoft Excel, позволяющий рассчитывать его для различных вре-

менных рядов. Метод нормированного размаха был протестирован по данным метеостанции Терскол для средней летней температуры воздуха за 1961–2018 гг., то есть для временного ряда данного метеопараметра длиной $T = 58$ лет (табл. 1).

Для этой цели вычислялось среднее арифметическое всего ряда в целом ($\bar{x} = 11,45\text{ }^{\circ}\text{C}$). Далее последовательно в столбцах вводились формулы для расчета отклонения текущего зна-

Таблица 1.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ИНДИКАТОРА H ПО ФОРМУЛЕ В СРЕДЕ MICROSOFT EXCEL
Table 1. Algorithm for calculating the indicator H using a formula in Microsoft Excel

Годы	x_i	$\bar{x}_k$	Δx_i	$\Sigma \Delta$	<i>max</i>	<i>min</i>
1961	11,30	11,45	-0,15	-0,15	0,59	-15,81
1962	12,20	11,45	0,75	0,59		
1963	10,53	11,45	-0,92	-0,33		
1964	10,33	11,45	-1,12	-1,45		
1965	11,40	11,45	-0,05	-1,50		
1966	11,80	11,45	0,35	-1,16		
1967	9,40	11,45	-2,05	-3,21		
1968	10,17	11,45	-1,29	-4,50		
1969	11,30	11,45	-0,15	-4,65		
.....						
2010	13,47	11,45	2,01	-7,57		
2011	12,37	11,45	0,91	-6,66		
2012	12,30	11,45	0,85	-5,81		
2013	11,00	11,45	-0,45	-6,26		
2014	12,47	11,45	1,01	-5,25		
2015	12,73	11,45	1,28	-3,97		
2016	12,33	11,45	0,88	-3,09		
2017	13,07	11,45	1,61	-1,48		
2018	12,93	11,45	1,48	0,00		

2. Графический способ: другой способ расчета индикатора Херста практически аналогичен рассмотренному способу выше, за исключением того, что существует еще один цикл, повторяющий вышеописанную процедуру. С помощью этого цикла осуществляется передвижение периода T_k , который не совпадает с началом временного ряда. Для n отрезков ряда длиной T_k лет (длина всего ряда $T = n \cdot T_k$) используется алгоритм расчета по формуле (11). В результате получаем несколько показателей $(R/S)_k$, логарифмы которых откладываются по оси ординат графика (рис. 2). По оси абсцисс откладываются логарифмированные временные отрезки $lg(0,5T)_k$.

Значение индикатора Херста H определяется из графика зависимости $\overline{lg(R/S)_k}$ от $lg(0,5T_k)$ как наклон прямой линейной регрессии, построенной методом наименьших квадратов:

$$\overline{lg(R/S)_k} = lg(c) + H lg(0,5T_k)$$

(12)

Для вычисления H временного ряда средней *летней* температуры в Терсколе за 1961–2018 гг. графическим способом был использован вышеописанный алгоритм. В рассматриваемом временном ряде последовательно формируются начальные отрезки $N_k = n_1, n_1, \dots, n_k, (k = 3, 6, 9, 18, 29 \text{ лет})$. На каждом отрезке вычисляется текущее среднее:

Таблица 2.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ИНДИКАТОРА H ПРИ РАЗБИЕНИИ НА ПОДПЕРИОДЫ T_k .
Table 2. Algorithm for calculating the indicator H when dividing into
a) $n = 19$ интервалов по $T_k = 3$ года

Годы	x_i	$\bar{x}_k$	Δx_i	$\Sigma \Delta$	<i>max</i>	<i>min</i>
1961	11,30	11,34	-0,04	-0,04	0,82	-0,04
1962	12,20	11,34	0,86	0,82		
1963	10,53	11,34	-0,81	0,00		
1964	10,33	11,18	-0,84	-0,84	0,00	-0,84
1965	11,40	11,18	0,22	-0,62		

$$\bar{x}_k = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i. \tag{13}$$

В пределах каждого фиксированного отрезка вычисляется отклонение текущего от среднего значения и накопленное отклонение для его отрезков:

$$\sum_{i=1}^k \Delta x_i = \Delta x_{i-1} + (x_i - \bar{x}_k) \tag{14}$$

Нормированный размах по каждой группе составил:

$$R_k = \text{Max}(\sum_{i=1}^k \Delta x_i) - \text{Min}(x_i - \bar{x}_k) \dots \dots \tag{15}$$

Также по каждой группе рассчитывается стандартное отклонение S_k по стандартной формуле. Показатели нормированного размаха (R/S) при разбиении на $n = 19$ интервалов по $T_k = 3$ года (табл. 2а) и на $n = 9$ интервалов по $T_k = 6$ лет (табл. 2б) рассчитываются как (R/S) внутри каждого интервала, затем находится среднее значение нормированного размаха $\overline{lg(R/S)}_k$ для каждого периода времени T_k .

Изложенная выше процедура повторяется, используя в качестве n все возможные собственные делители ряда: $n = 6$ по $k = 9$ лет (табл. 2б); $n = 3$ по $k = 18$ лет и, наконец, на последнем шаге осуществляется разбиение ряда на два подпериода $n = 2$ по $k = 29$ лет. Затем строится график в двойном логарифмическом масштабе с линейным трендом.

subperiods T_k .

R_k	S_k	$(R/S)_k$	$lg(R/S)_k$	$\overline{lg(R/S)}_k$	$lg(0,5T_k)$
0,86	0,83	1,03	0,01	0,08	0,176
0,84	0,76	1,11	0,05		

Годы	x_i	$\bar{x}_k$	Δx_i	$\Sigma \Delta$	<i>max</i>	<i>min</i>
1966	11,80	11,18	0,62	0,00		
1967	9,40	10,29	-0,89	-0,89	0,00	-1,01
1968	10,17	10,29	-0,12	-1,01		
1969	11,30	10,29	1,01	0,00		
.....						
2009	10,87	12,23	-1,37	-1,37	0,00	-1,37
2010	13,47	12,23	1,23	-0,14		
2011	12,37	12,23	0,13	0,00		
2012	12,30	11,92	0,38	0,38	0,38	-0,54
2013	11,00	11,92	-0,92	-0,54		
2014	12,47	11,92	0,54	0,00		
2015	12,73	12,71	0,02	0,02	0,02	-0,36
2016	12,33	12,71	-0,38	-0,36		
2017	13,07	12,71	0,36	0,00		

б) $n = 9$ интервалов по $k = 6$ лет

Годы	x_i	$\bar{x}_k$	Δx_i	$\Sigma \Delta$	<i>max</i>	<i>min</i>
1961	11,30	11,26	0,04	0,04	0,98	-0,68
1962	12,20	11,26	0,94	0,98		
1963	10,53	11,26	-0,73	0,25		
1964	10,33	11,26	-0,93	-0,68		
1965	11,40	11,26	0,14	-0,54		
1966	11,80	11,26	0,54	0,00		
1967	9,40	10,58	-1,18	-1,18	0,00	-1,59
1968	10,17	10,58	-0,41	-1,59		
1969	11,30	10,58	0,72	-0,87		
1970	10,20	10,58	-0,38	-1,25		
1971	10,53	10,58	-0,04	-1,29		
1972	11,87	10,58	1,29	0,00		

R_k	S_k	$(R/S)_k$	$lg(R/S)_k$	$\overline{lg(R/S)_k}$	$lg(0,5T_k)$
1,01	0,96	1,06	0,02		
1,37	1,31	1,05	0,02		
0,92	0,80	1,15	0,06		
0,38	0,37	1,03	0,01		
R_k	S_k	$(R/S)_k$	$lg(R/S)_k$	$\overline{lg(R/S)_k}$	$lg(0,5T_k)$
1,66	0,72	2,30	0,36	0,28	0,477
1,59	0,88	1,80	0,26		

Далее аналогично для интервалов $n = 6$ (по 9 лет);
3 (по 18 лет); 2 (по 29 лет).

В уравнении линейной регрессии зависимой переменной выступает показатель $lg(R/S)$, а факторным признаком – логарифм количества элементов k (лет) в группе $n - lg(0,5T_k)$ (табл. 3, рис. 2).

Таблица 3.

КООРДИНАТЫ ГРАФИКА В ДВОЙНОМ ЛОГАРИФИЧЕСКОМ МАСШТАБЕ
Table 3. Plot coordinates in double logarithmic scale

T_k , годы	$lg(R/S)_k$	$lg(0,5T_k)$
3	0,08	0,176
6	0,28	0,477
9	0,43	0,653
18	0,58	0,954
29	0,79	1,161

Таблица 4.

ИНДИКАТОР ХЕРСТА H ТРЕНДОВ СЕЗОННЫХ И ГОДОВЫХ ТЕМПЕРАТУР:
Table 4. Hurst indicator H of seasonal and annual temperature trends:

Климатические зоны, м/станции	Показатель Херста, H					
	зима			весна		
	а)	б)	в)	а)	б)	в)
I.Равнина	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	0,6
1.1. Причерноморье, Сочи						
1.2. Степная зона Майкоп	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,8
Моздок	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7
Прохладная	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Ростов-на-Дону	0,6	0,5	0,6	0,6	0,7	0,6
Изобильный	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,8
Краснодар	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8

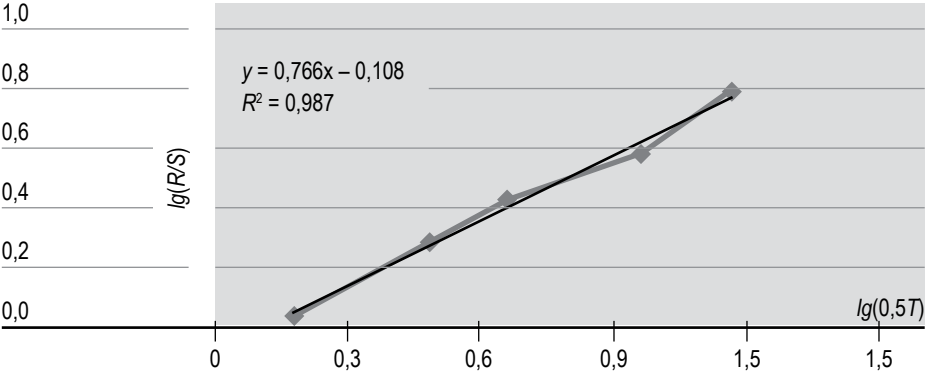


Рис. 2.

Линейная регрессия в двойном логарифмическом масштабе ($H = 0,766$) для летних температур, Терскол (1961–2018 гг.).

Fig. 2. Linear regression on a double logarithmic scale ($H = 0,766$) for summer temperatures, Terskol (1961–2018).

В таблице 4 приведены результаты расчетов индикатора Херста методом нормированного размаха для сезонной и годовой средней, максимальной и минимальной температур в различных климатических зонах юга России.

а) средних, б) максимальных, в) минимальных
a) average, b) maximum, c) minimum

лето			осень			год		
а)	б)	в)	а)	б)	в)	а)	б)	в)
0,8*	0,7	0,8	0,8	0,8	0,6	0,8	0,7	0,6
0,8	0,8	0,6	0,6	0,7	0,6	0,7	0,8	0,7
0,8	0,8	0,6	0,8	0,7	0,6	0,8	0,8	0,7
0,8	0,8	0,6	0,8	0,7	0,5	0,8	0,8	0,7
0,8	0,8	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,6
0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,8	0,8	0,7
0,8	0,8	0,9	0,8	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7

Климатические зоны, м/станции	Показатель Херста, Н					
	зима			весна		
	а)	б)	в)	а)	б)	в)
среднее	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
1.3. Прикаспий Изберг	0,7	0,6	0,6	0,8	0,8	0,7
Кизляр	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6	0,8
Махачкала	0,6	0,6	0,7	0,6	0,7	0,5
Дербент	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8
среднее	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7
I.Предгорная Буйнакск	0,8	0,6	0,8	0,7	0,5	0,8
Ставрополь	0,8	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7
Черкесск	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6	0,7
Нальчик	0,71	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Кисловодск	0,7	0,8	0,5	0,6	0,6	0,6
Владикавказ	0,8	0,7	0,9	0,7	0,6	0,8
среднее	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7
III. Горная, Ахты	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6
Теберда	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7
среднее	0,8	0,7	0,65	0,6	0,6	0,65
IV.Высокогорная Терскол	0,7	н/д	н/д	0,5	н/д	н/д
юг ЕТР, среднее	0,7	0,6	0,7	0,6	0,6	0,7

* Значения показателя Херста $H > 0,8$ отмечены жирным

Из таблицы 4 видно, что индикаторы устойчивости для трендов температуры характеризуют наибольшую устойчивость и долгосрочность изменения для временных рядов годовых и летних средних температур ($H = 0,80$), а также осенних средних температур ($H = 0,73$). Ряды годовых, летних ($H = 0,75$) и осенних

лето			осень			год		
а)	б)	в)	а)	б)	в)	а)	б)	в)
0,8	0,8	0,7	0,8	0,7	0,6	0,8	0,8	0,7
0,8	0,8	0,6	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,6
0,8	0,7	0,9	0,8	0,6	0,6	0,8	0,7	0,7
0,7	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,7	0,8	0,7
0,9	0,7	0,7	0,7	0,8	0,6	0,9	0,7	0,7
0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,7
0,8	0,7	0,7	0,8	0,5	0,6	0,9	0,8	0,7
0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6	0,9	0,8	0,6
0,8	0,8	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7
0,8	0,8	0,6	0,8	0,8	0,5	0,9	0,8	0,7
0,8	0,6	0,6	0,8	0,7	0,6	0,8	0,6	0,6
0,8	0,7	0,6	0,8	0,9	0,5	0,9	0,7	0,9
0,8	0,7	0,7	0,8	0,7	0,6	0,9	0,8	0,7
0,8	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,8	0,7	0,7
0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,6	0,8	0,7	0,6
0,8	0,7	0,7	0,7	0,65	0,55	0,8	0,7	0,65
0,8	н/д	н/д	0,6	н/д	н/д	0,5	н/д	н/д
0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,8	0,8	0,7

максимальных температуры ($H = 0,70$), а также весенних минимальных температур ($H = 0,72$) также имели устойчивые тенденции.

Поскольку фрактальность связана с детерминизмом, можно предположить, что летнее потепление, наблюдаемое в последние десятилетия, является следствием скоординированного влияния ряда климатообразующих факторов.

Выводы

Показатель Херста H представляет собой основной инструмент для определения устойчивости поведения системы и отвечает на вопрос, с какой наибольшей вероятностью будет поведение следующего значения исследуемого ряда в будущем – больше или меньше текущего.

Для различных метеопараметров отношение диапазона к стандартному отклонению (R/S) является степенной функцией от продолжительности времени T . Фрактальный анализ рядов метеопараметров показал, что показатель H степенного закона всегда больше 0,5, колеблясь, в основном, для температуры около $H = 0,8$. Как следует из классификации показателя Херста, $H = 0,5$ является характеристикой всех идеальных случайных процессов. Наши результаты показали, что ряды температур, не являются идеальным пуассоновским процессом (без памяти), напротив, существует некоторая долгосрочная корреляция между последними событиями и начальными.

Значения показателя Херста для метеопараметров, характеризующих режим воздуха годовых температур (средняя температура, абсолютный максимум и минимум температур) в период 1961–2018 гг. превышают значение этого показателя для температуры, рассчитанного Г. Херстом в первой половине XX века ($H = 0,72$) [2], что демонстрирует усилившуюся устойчивую тенденцию роста температур, особенно в *летний* период ($H = 0,8$), и в году в целом ($H = 0,8$). Таким образом, изменение этих метеопараметров как явление, несет двойственные характеристики случайности и регулярности, и чем больше H отклоняется от 0,5, тем больше регулярности проявляется во временных рядах, и наоборот.

Библиографический список

1. Исаев, А.А. Статистика в метеорологии и климатологии: учебник / А.А. Исаев. Москва: Издательство МГУ, 1988. 244 с.
2. Вероятностные разделы математики / под ред. Ю.Д. Максимова. СПб.: Иван Фёдоров, 2001. 592 с.
3. Hurst, H. Long Term Storage Capacity of Reservoirs / Hurst, H.; Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951. Vol. 116. P. 770–799.

4. Мандельброт, Б. Фрактальная геометрия природы: учеб. пособие / Б. Мандельброт; Институт компьютерных исследований. М., 2002. 666 с.
5. Rubalcaba, J.J.O., Fractal Analysis of Climatic Data: Annual Precipitation Records in Spain / J.J.O. Rubalcaba // Theoretical and Applied Climatology, 1997. Vol. 56. P. 83–87.
6. Carvalho, L.M.V. Antipersistence in the global temperature anomaly field / L.M.V. Carvalho, A. A. Tsonis, C. Jones, H.R. Rocha, P.S. Polito // Nonlinear Processes in Geophysics, 2007. Vol. 14. P. 723–733.
7. Солнцев, Л.А. Фрактальный анализ векового хода средней температуры воздуха в г. Нижнем Новгороде / Л.А. Солнцев, Д.И. Иудин, М.С. Снегирева // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Нижний Новгород, 2007. № 4. С. 88–91.
8. Калуш Ю.А., Логинов В.М. Показатель Херста и его скрытые свойства // Сибирский журнал индустриальной математики – 2002. Т. 5. Вып. 4. С. 29–37.
9. Кроновер, Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории: учеб. пособие / Р.М. Кроновер. Москва: Постмаркет, 2000. 352 с.
10. Федер Е. Фракталы / пер. с англ. М.: Мир, 1991. 254 с.

References

1. Isaev, A.A. Statistics in meteorology and climatology: textbook / A.A. Isaev. Moscow: Moscow State University Publishing House, 1988. 244 p.
2. Probabilistic sections of mathematics / Ed. Y.D. Maksimova. SPb.: Ivan Fedorov, 2001. 592 p.
3. Hurst, H. Long Term Storage Capacity of Reservoirs / Hurst, H.; Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951. Vol. 116. P. 770–799.
4. Mandelbrot, B. Fractal geometry of nature: textbook. manual / B. Mandelbrot; Institute for Computer Research, M., 2002. 666 p.
5. Rubalcaba, J.J.O., Fractal Analysis of Climatic Data: Annual Precipitation Records in Spain / J.J.O. Rubalcaba // Theoretical and Applied Climatology, 1997. Vol. 56. P. 83–87.
6. Carvalho, L.M.V. Antipersistence in the global temperature anomaly field / L.M.V. Carvalho, A.A. Tsonis, C. Jones, H. R. Rocha, P.S. Polito // Nonlinear Processes in Geophysics, 2007. Vol. 14. P. 723–733.

7. Solntsev, L.A. Fractal analysis of the secular variation of the average air temperature in the city of Nizhny Novgorod / L.A. Solntsev, D.I. Iudin, M.S. Snegireva // Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky. Nizhny Novgorod, 2007. No. 4. P. 88–91.
8. Kalush Yu. A., Loginov VM Hurst exponent and its hidden properties // Siberian Journal of Industrial Mathematics – 2002. Vol. 5. No. 4. S. 29-37.
9. Kronover, R.M. Fractals and chaos in dynamical systems. Fundamentals of theory: textbook. allowance / R.M. Kronover; Moscow: Postmarket, 2000. 352p.
10. Feder E. Fractals: Trans. from English. M.: Mir, 1991. 254 p.

Поступило в редакцию 15.10.2021,
принята к публикации 12.11.2021

Сведения об авторе

Ташилова Алла Амарбиевна, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела физики облаков Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт». Адрес: Россия, Кабардино-Балкарская республика, г. Нальчик, пр. Ленина, д. 2.
Scopus ID: 57191577384,
Researcher ID: K-4321-2015,
Телефон (928) 692-46-29,
E-mail: tashilovaa@mail.ru

About the author

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", Address: Russia, Kabardino-Balkar Republic, Nalchik, Lenin Ave., 2.
Scopus ID: 57191577384
Researcher ID: K-4321-2015,
Phone: (928) 692-46-29,
E-mail: tashilovaa@mail.ru

25.00.30
УДК 551.578.7

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ, АГРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

Теунова Н.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Высокогорный геофизический институт», Россия; nata0770@yandex.ru

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ НАЗЕМНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАДА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГРАДОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

DOI: 10.37493/2308-4758.2021.4.11

Введение.

Градовые процессы наносят значительный ущерб сельскому хозяйству, приводят к повреждению строений, к гибели животных и к человеческим жертвам. Для снижения отрицательного последствия градовых явлений проводятся работы по активным воздействиям на градовые процессы. В данной работе проведена оценка изменений наземных (спектральных и энергетических) характеристик града при проведении активного воздействия по данным наземной градомерной сети и радиозондирования атмосферы.

Материалы и методы исследований.

При исследовании наземных характеристик градобитий были использованы данные, полученные на градомерной сети во время проведения Комплексного градового эксперимента Высокогорного геофизического института (1983–1997 гг.), данные Северо-Кавказской военизированной службы по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы (СК ВС) о градобитиях за период 2011–2012 гг., а также данные радиозондирования атмосферы. Используя метод кластерного анализа (статистическая программа SPSS) все процессы с активным воздействием (АВ) и без активного воздействия (всего 91 процесс) были разбиты от 2 до 5 кластеров для выявления максимального влияния параметров атмосферы на характеристики градовых процессов и дальнейшего выбора оптимального числа кластеров. Далее был проведен корреляционный анализ для выявления связи наземных характеристик града с параметрами атмосферы. Были построены уравнения множественной линейной регрессии взаимосвязи наземных характеристик града (средний диаметр, средняя поверхностная плотность кинетической энергии, средняя концентрация) с параметрами атмосферы. Полученные уравнения можно использовать для анализа изменений спектральных и энергетических характеристик градобитий при проведении активного воздействия.

Результаты исследования и их обсуждение.

Анализ данных о наземных характеристиках градовых процессов с АВ и без АВ показал, что выборки неравнозначны. В процессы с АВ, вероятнее всего, попали более мощные градовые процессы, поэтому для их корректного сравнения с процессами без АВ необходимо провести деление на кластеры. Для проведения кластерного анализа использовались характеристики атмосферы, полученные по данным радиозондирования, произведенного в момент времени, ближайший ко времени выпадения града. Результаты кластерного анализа, подтвержденные Т-тестом, показали, что оптимальным является разделение на 2 кластера. Из характеристик параметров атмосферы в двух кластерах следует, что в 1-ый кластер вошли параметры атмосферы,

приводящие к более мощным градовым процессам. Для исследования взаимосвязи между параметрами, характеризующими состояние атмосферы и наземными характеристиками града, были определены зависимые и независимые переменные. В процессах, отнесенных к 1-му кластеру и 2-му кластеру, были выбраны значимые корреляции наземных характеристик града с параметрами атмосферы при уровнях значимости $\text{Sig} \leq 0,05$ и близких к нему. Проведен множественный регрессионный анализ с использованием выбранных характеристик и построены регрессионные уравнения взаимосвязи наземных характеристик града с параметрами атмосферы для процессов 1-го и 2-го кластера. Полученные уравнения были использованы для анализа изменений спектральных и энергетических характеристик градобитий в результате активного воздействия.

Выводы. Проведен анализ изменений спектральных и энергетических характеристик градобитий в результате активного воздействия с использованием полученных регрессионных уравнений связи наземных характеристик града с параметрами атмосферы. Анализ показал, что изменения наземных характеристик градовых осадков в результате АВ в процессах 1-го кластера, к которому относятся более мощные градовые процессы, не приводят к значимому изменению наземных характеристик града. Для процессов 2-го кластера (слабые процессы) активное воздействие приводит к уменьшению значений наземных характеристик градовых осадков.

Ключевые слова: градовые процессы, градомерная сеть, параметры атмосферы, активные воздействия, кластерный анализ, уравнения регрессии, наземные характеристики града.

Teunova N.V.

Federal State Budgetary Institution “Vysokogorny Geophysical Institute”, Russia

Assessment of Changes in the Ground Characteristics of Hail During an Active Impact on Hail Processes

Introduction. Hailing processes cause significant damage to agriculture, lead to damage to buildings, the death of animals and human casualties. To reduce the negative consequences of hail phenomena, work is being carried out to actively influence hail processes. In this work, an assessment of changes in the spectral and energy characteristics of hail is carried out during an active action according to the data of the hail-gauge network and radiosonding of the atmosphere.

Materials and research methods.

In the study of the ground characteristics of hail damage, we used the data obtained on the hail-gauge network during the Comprehensive hail experiment High Mountain Geophysical Institute (1983–1997), the data of the North Caucasian paramilitary service on active impacts on hydrometeorological processes (NC PS) about hailstorm for the period 2011–2012 and data from radiosonding of the atmosphere. Using the method of cluster analysis (statistical program SPSS), all processes with active impact (AI) and without active impact (91 processes in total) were divided from 2 to 5 clusters to identify the maximum influence of atmospheric parameters on the characteristics of hail processes and further select the optimal number of clusters. Further, a correlation analysis was carried out to identify the relationship between the

Research results and discussion.

terrestrial characteristics of hail and atmospheric parameters. Multiple linear regression equations were constructed for the relationship between the ground characteristics of hail (average diameter, average surface density of kinetic energy, average concentration) and atmospheric parameters. The obtained equations can be used to analyze changes in the spectral and energy characteristics of hailstorms during active exposure.

Conclusions.

Analysis of data on the ground characteristics of hail processes with and without AI showed that the samples are not equal. More powerful hail processes most likely got into the processes with AI, therefore, for their correct comparison with the processes without AI, it is necessary to divide them into clusters. To carry out the cluster analysis, we used the characteristics of the atmosphere obtained from the data of radio sounding performed at the time instant closest to the time of the hail. The results of cluster analysis, confirmed by the T-test, showed that division into 2 clusters is optimal. From the characteristics of the parameters of the atmosphere in two clusters of clusters, it follows that 1 cluster includes the parameters of the atmosphere, leading to more powerful hail processes. To investigate the relationship between the parameters characterizing the state of the atmosphere and the terrestrial characteristics of hail, the dependent and independent variables were determined. In the processes assigned to cluster 1 and cluster 2, significant correlations of the ground characteristics of hail with atmospheric parameters were selected at significance levels ≤ 0.05 and close to it. Multiple regression analysis was carried out using the selected characteristics and regression equations for the relationship between the ground characteristics of hail and atmospheric parameters for processes 1 and 2 of the cluster were constructed. The resulting equations were used to analyze changes in the spectral and energy characteristics of hail hits as a result of active exposure.

Key words:

The analysis of changes in the spectral and energy characteristics of hailstorms as a result of active exposure using the obtained regression equations for the relationship between the ground characteristics of hail and atmospheric parameters has been carried out. The analysis showed that changes in the ground characteristics of hail precipitation as a result of AI in the processes of cluster 1, which includes more powerful hail processes, does not lead to a significant change in the ground characteristics of hail. For processes of cluster 2 (weak processes), active impact leads to a decrease in the values of the ground characteristics of hail precipitation.

hail processes, hail-gauge network, atmospheric parameters, active influences, cluster analysis, regression equations, ground characteristics of hail.

Введение

Среди глобальных проблем современности обращает на себя внимание рост количества природных и техногенных катастроф, происходящих на Земле [1]. Мощным фактором нарастания природных угроз является также глобальное изменение климата, с которым, вероятно, связано увеличение частоты и интенсивности многих стихийных процессов и явлений в природной среде. К этим явлениям относятся и градовые процессы, которые наносят значительный ущерб сельскому хозяйству, приводят к повреждению строений, к гибели животных и к человеческим жертвам.

Градоопасность на территории Российской Федерации ввиду наличия разнообразных климатических зон крайне неоднородна. Территориями с высокой градоопасностью являются юго-западные районы Краснодарского края, горные и высокогорные районы Карачаево-Черкесии, Кабардино-Балкарии, РСО – Алании. Предгорные районы Краснодарского и Ставропольского краев, Карачаево-Черкесии, Кабардино-Балкарии, РСО – Алании являются районами повышенной градоопасности [2].

Ущерб от града зависит от многих факторов, включающих физические характеристики града (размер града, общая концентрация, кинетическая энергия и др.), сопутствующие градобитиям явления (ветер, ливневые осадки), период вегетации и структура производства сельскохозяйственных культур.

Для снижения отрицательного последствия градовых явлений проводятся работы по активным воздействиям на градовые процессы. Успешность активных воздействий можно определить по изменениям спектральных и энергетических характеристик града с использованием радиолокационных и наземных методов.

В данной работе проведена оценка изменений наземных (спектральных и энергетических) характеристик града при проведении активного воздействия на градовые процессы по данным градомерной сети и радиозондирования атмосферы.

Материалы и методы исследований

При исследовании наземных характеристик градобитий были использованы данные, полученные на градомерной сети, во время проведения Комплексного градового эксперимента Высокогорного геофизического института (1983–1997 гг.), и данные Северо-Кавказской военизированной службы по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы (СК ВС) о градобитиях за период 2011–2012 гг.

Площадь градомерной сети составляла $3,5 \cdot 10^3$ км² и являлась крупнейшей сетью в практике подобных исследований. На градомерной сети было размещено 600 пассивных индикаторов града (ПИГ). Плотность ПИГ на площади $2,5 \cdot 10^3$ км² составляла 1 прибор на 10 км², на площади $9 \cdot 10^2$ км² – 1 прибор на 2,5 км². ПИГ представляет собой подложку из пенополистирола толщиной 20 мм

с площадью поверхности $0,1 \text{ м}^2$, которая покрывается алюминиевой фольгой толщиной $40\text{--}200 \text{ мкм}$. Подложка устанавливается на горизонтальную подставку на высоте 1 м над уровнем земли. При падении на ПИГ градовые частицы оставляют отпечатки в виде кратеров. По размерам кратеров с использованием калибровочной кривой определялись размеры градин и скорости их падения.

Кинетическая энергия градины определялась по известной формуле:

$$E_k = \frac{mV_{\Gamma}^2}{2}, \quad (1)$$

де m – масса и
 V_{Γ} – установившаяся скорость падения градины.

Установившуюся скорость падения градин V_{Γ} можно определить из равенства сил тяжести и аэродинамического сопротивления:

$$m_{\Gamma}g = SC_{\Phi} \cdot \rho_{\text{в}} \frac{V_{\Gamma}^2}{2}, \quad (2)$$

где m_{Γ} – масса градины,
 g – ускорение силы тяжести,
 S – миделево сечение градины,
 $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха,
 C_{Φ} – коэффициент лобового сопротивления градины.

После определения спектра размеров градин по их отпечаткам на градовых подушках вычислялся их среднеарифметический диаметр.

Поверхностная плотность кинетической энергии градин на градовой дорожке была рассчитана с помощью выражения:

$$E_i = \frac{3,3 \cdot 10^{-5} \cdot \sum_i^n D_i^4}{S_{\text{под}}}, \quad (3)$$

Подробно методика использования ПИГ и определение характеристик выпадающего града описаны в работах Л.М. Федченко, М.И. Тлисова, Б.М. Хучунаева и др. [3, 4]. Анализ данных, полученных на градомерной сети, позволил получить уни-

кальные, разрешенные в пространстве и во времени данные о спектральных и энергетических характеристиках градовых частиц при естественном развитии процессов и активном воздействии на них.

Для выявления связи между наземными характеристиками града и характеристиками атмосферы, были рассчитаны следующие параметры, полученные по данным радиозондирования атмосферы:

$W_{\max}$ —	максимальная вертикальная скорость восходящего потока, м/сек;
$H_{\text{в}}$ —	уровень конвекции, км;
Δt_1 —	вертикальный градиент температуры в слое $H_{\text{к}} + 2$ км, °C/100 м;
$\Delta t'_1$ —	вертикальный градиент температуры в слое $H_{\text{к}} + 2,5$ км, °C/100 м;
Δt_2 —	вертикальный градиент температуры в слое $H_{\text{к}} + 2$ км + 2 км, °C /100 м;
$\Delta t'_2$ —	вертикальный градиент температуры в слое $H_{\text{к}} + 2,5$ км + 2 км, °C/100 м;
$T_{\text{в}}$ —	температура на уровне конвекции, К;
$T_{\max}$ —	температура на уровне максимальной разности температур, определяют по данным аэрологической диаграммы, К;
$\Sigma_{\text{земля}}^{500} q$ —	суммарная массовая доля воды в слое земля — 500 гПа, г/кг;
$T_{\text{к}}$ —	температура на уровне конденсации, К;
$P_{\text{к}}$ —	давление на уровне конденсации, мб;
Δt —	максимальная разность температур в облаке и в окружающем воздухе, °C;
$P_{\max}$ —	давление на уровне максимальной разности температур, мбар;
P_0 —	давление на уровне нулевой изотермы, мбар;
H_0 —	высота уровня нулевой изотермы, км;
$\Theta'_p(Z_m)$ —	псевдопотенциальная температура смоченного термометра на уровне максимальной разности температур облака и окружающего воздуха, К;
$\Delta h'_-$ —	высота слоя конвекции, расположенного в области отрицательных температур, км;

q' –	приведенная водность слоя конвекции, г/кг;
H_* –	высота слоя зарождения нисходящих потоков, км;
H_p –	высота слоя потенциальной неустойчивости, км;
Θ'_{p1} –	псевдопотенциальная температура смоченного термометра приземного воздуха, К;
$\Theta'_{робл}$ –	минимальная псевдопотенциальная температура смоченного термометра на уровне H_p , К;
TT –	индекс интегральных сумм, предложенный Миллером, К;
D_j –	обобщенный индекс неустойчивости.

Эти параметры использовались в методах прогноза конвективных явлений, предложенных В.А. Беленцовой, Л.М. Федченко, Г.Г. Гораль, А.Х. Кагермазовым и др. [5–9]. Методика прогноза града, основанная на использовании вышеприведенных характеристик, получила широкое признание и используется до настоящего времени.

Используя метод кластерного анализа (статистическая программа SPSS) [10] все процессы с активным воздействием (АВ) и без активного воздействия (всего 91 процесс) были разбиты от 2 до 5 кластеров для анализа максимального влияния параметров атмосферы на характеристики градовых процессов и их группировки в тот или иной кластер.

Некоторые результаты такого анализа приводятся в работах Б.М. Хучунаева и А.А. Ташиловой [11, 12], но количество кластеров в этих работах задавалось исследователями, т.е., можно сказать, что имели место некоторые субъективные моменты. Более объективно разделение на кластеры можно произвести на основе оптимизации числа кластеров.

Далее был проведен корреляционный анализ для выявления связи наземных характеристик (средний диаметр, средняя поверхностная плотность кинетической энергии, средняя концентрация) града с параметрами атмосферы. При проведении множественной линейной регрессии, прежде всего, следует обратить внимание на статистики коллинеарности, чтобы избежать эффекта мультиколлинеарности. Значение показателя «Толерантность» должно превышать 0,1, а значение показателя «VIF» (Фактор инфляции диспер-

сии – Variance Inflation Factor) должно быть меньше 10. Коэффициенты модели показывают величину значимости независимых переменных, включенных в регрессионную модель.

С использованием полученных коэффициентов были построены уравнения множественной линейной регрессии взаимосвязи наземных характеристик града с параметрами атмосферы. Полученные уравнения были использованы для анализа изменений спектральных и энергетических характеристик градобитий.

В работах М.И. Тлисова, Б.М. Хучунаева и др. [13–15], посвященных анализу изменений спектральных и энергетических характеристик градобитий, исследование изменений характеристик града на земле проводилось при разбиении параметров атмосферы на 3 кластера, которые задавались исследователем. Рассчитывались наземные теоретические характеристики града в каждом кластере, полученные по параметрам атмосферы и определялись суммарные значения.

В данной работе изменение наземных характеристик града не суммировалось, а было представлено для 2 кластеров (мощные и слабые градовые процессы).

Результаты и их обсуждение

При исследовании влияния активного воздействия на градовые процессы их характеристики, зарегистрированные градомерной сетью, были разделены на 2 группы, соответствующие процессам с активным воздействием (с АВ) и процессам без активного воздействия (без АВ). Анализ данных о наземных характеристиках градовых процессах с АВ и без АВ показал, что выборки неравнозначны. В процессы с АВ, вероятнее всего, попали более мощные градовые процессы, поэтому для их корректного сравнения с процессами без АВ необходимо произвести их деление на кластеры. Для проведения кластерного анализа использовались характеристики атмосферы, полученные по данным радиозондирования, произведенного в момент времени, ближайший ко времени выпадения града.

По результатам кластерного анализа оптимальным является разделение на 2 кластера. Используя Т-тест, было выяснено, что почти все параметры атмосферы, разделенные на 2 кластера, имеют статистически значимые различия, следовательно, кластерный ана-

лиз позволяет классифицировать облака по различным состояниям атмосферы, и, вероятно, приводящим к градовым процессам различной интенсивности. В 1-й кластер вошло 30 процессов без АВ и 46 процессов с АВ, во 2-й – 11 процессов без АВ и только 3 процесса с АВ. По результатам Т-теста можно предположить, что в 1-й кластер вошли параметры атмосферы, приводящие к более мощным градовым процессам.

Для исследования взаимосвязи между параметрами, характеризующими состояние атмосферы, и наземными характеристиками града были определены зависимые и независимые переменные. В случае рассматриваемой задачи в качестве независимых переменных были использованы параметры атмосферы, а зависимыми переменными – наземные характеристики града. Для выявления линейной зависимости между наземными характеристиками града на земле и несколькими параметрами атмосферы, использовался множественный коэффициент линейной корреляции.

В процессах, отнесенных к 1-му кластеру, были выбраны значимые корреляции наземных характеристик града с параметрами атмосферы при уровнях значимости $\text{Sig} \leq 0,05$ и близких к нему. Значимая корреляционная зависимость для среднего диаметра выпавшего града наблюдалась с температурой на уровне конденсации (T_k), со значением высоты слоя зарождения нисходящих потоков и с суммарной удельной влажностью в слое земля – 500 гПа ($\sum_{\text{земля}}^{500} q$). Результаты расчетов для средней энергии выпавшего града ($E_{\text{ср.}}$) показали значимую корреляционную связь со следующими параметрами атмосферы: вертикальный градиент температуры в слое $H_k + 2 \text{ км} + 2 \text{ км}$ (Δt_2), вертикальный градиент температуры в слое $H_k + 2,5 \text{ км}$ ($\Delta t'_2$) и индекс Миллера (TT). Для средней концентрации градин корреляция наблюдается с максимальной вертикальной скоростью восходящего потока (W_{max}), с температурой на уровне максимальной разности температур (T_{max}) и с давлением на уровне максимальной разности температур (P_{max}).

При проведении множественной линейной регрессии получено, что значения показателя «Толерантность» и «VIF» удовлетворяют требованиям, при которых невозможно возникновение нежелательного эффекта мультиколлинеарности. В таблице 1 представлены показатели, характеризующие качество построенной

Таблица 1. КОЭФФИЦИЕНТЫ УРАВНЕНИЯ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ГРАДОВЫХ ПРОЦЕССОВ 1-ГО КЛАСТЕРА
Table 1. Coefficients of the regression equation for grad processes of the 1st cluster

Независим. переменные	Коэф. корреляции, R	Коэф. детерминации, R ²	Коэф. Дарбина-Уотсона	Значимость Sig	Коэффициенты модели		Статистики коллинеарности	
					B	Станд. ошибка	Толерантность	КРД (VIF)
Зависимая переменная – средний диаметр, D_{cp}								
Константа	0,493	0,243	2,614	0,061	77,438	44,210		
T_k					-0,252	0,156	0,793	1,260
H					0,445	0,338	0,936	1,069
$\sum_{земля}^{500} q$					-0,104	0,127	0,839	1,191
Зависимая переменная – средняя поверхностная плотность кинетической энергии, E_{cp}								
Константа	0,318	0,101	2,002	0,421	461,486	358,892		
Δt_2					480,295	559,005	0,536	1,865
$\Delta t'_1$					237,058	361,392	0,889	1,125
TT					1,526	8,071	0,578	1,731
Зависимая переменная – средняя концентрация, N_{cp}								
Константа	0,508	0,258	2,536	0,048	21724,5	59726,3		
W_{max}					311,85	468,959	0,182	5,489
T_{max}					-30,559	206,854	0,471	2,124
P_{max}					-25,382	42,726	0,19	5,258

модели: коэффициент корреляции, коэффициент детерминации, коэффициент Дарбина-Уотсона, значимость коэффициента модели, статистики коллинеарности. Результаты множественного регрессионного анализа с использованием выбранных характеристик свидетельствует о том, что регрессионные модели, построенные на основе этих данных, справедливы для всей генеральной совокупности в целом.

С использованием таблицы 1 были построены регрессионные уравнения взаимосвязи наземных характеристик града с параметрами атмосферы для процессов 1-го кластера:

$$D_{\text{ср.}} = D_0 - D_1 \Sigma_{\text{земля}}^{500} q + D_2 - D_3 T_{\text{к}}, \quad (4)$$

где $\Sigma_{\text{земля}}^{500} q$ – суммарная удельная влажность в слое земля – 500 гПа, г/кг;

H_* – высота слоя зарождения нисходящих потоков, км;

$T_{\text{к}}$ – температура на уровне конденсации, К;

$D_0 = 77,438$ мм; $D_1 = 0,104$ мм·кг/г;

$D_2 = 0,445$ мм·км⁻¹; $D_3 = 0,252$ мм·К⁻¹;

$$E_{\text{ср.}} = -E_0 + E_1 + E_2 + E_3 TT, \quad (5)$$

где Δt_2 – вертикальный градиент температуры в слое $H_{\text{к}} + 2$ км + 2 км, град/100 м;

$\Delta t'_1$ – вертикальный градиент температуры в слое $H_{\text{к}} + 2,5$ км, град/100 м;

TT – индекс интегральных сумм, предложенный Миллером, К;

$E_0 = 461,486$ Дж,

$E_1 = 480,295$ Дж·100 м/°С,

$E_2 = 237,058$ Дж·100 м/°С,

$E_3 = 1,526$ Дж·К⁻¹.

$$N_{\text{ср.}} = N_0 + N_1 W_{\text{max}} - N_2 T_{\text{max}} - N_3 P_{\text{max}}, \quad (6)$$

где W_{max} – максимальная вертикальная скорость восходящего потока, м/сек;

T_{max} – температура на уровне максимальной разности температур, К;

$P_{\max}$ –	давление на уровне максимальной разности температур, мбар;
$N_0 =$	21724,5;
$N_1 =$	311,85 сек/м;
$N_2 =$	30,559 К ⁻¹ ;
$N_3 =$	25,382 мбар ⁻¹ .

Полученные уравнения были использованы для анализа изменений спектральных и энергетических характеристик градобитий в результате активного воздействия. С использованием вошедших в уравнения атмосферных параметров для процессов с АВ, относящихся к 1-му кластеру, были посчитаны теоретические значения наземных характеристик града, определено их среднее значение и проведено сравнение со значениями реальных характеристик града на земле после проведения АВ (табл. 2).

Изменения наземных характеристик града были вычислены по формулам:

изменение среднего диаметра:

$$\Delta D = \frac{\bar{D}_{\text{реал}}}{\bar{D}_{\text{теор}}}, \quad (7)$$

изменение средней кинетической энергии:

$$\Delta E = \frac{\bar{E}_{\text{реал}}}{\bar{E}_{\text{теор}}}, \quad (8)$$

изменение средней концентрации:

$$\Delta N = \frac{\bar{N}_{\text{реал}}}{\bar{N}_{\text{теор}}}, \quad (9)$$

В результате получено, что активное воздействие на процессы, отнесенные к 1-му кластеру (мощные процессы), приводит к увеличению среднего диаметра града в 1,2 раза, уменьшению их средней кинетической энергии и концентрации на 24 % и 29 %.

Во второй кластер вошло малое количество процессов (11 процессов), поэтому для построения уравнения регрессии может использоваться только 1 независимый параметр. Проведенный анализ корреляционной связи наземных характеристик града с параметрами атмосферы показал, что для среднего диаметра выпавшего града корреляция наблюдается с уровнем конвекции (H_v), для сред-

Таблица 2. СРАВНЕНИЕ РЕАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ НАЗЕМНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАДА ПРОЦЕССОВ 1-ГО КЛАСТЕРА
Table 2. Comparison of real and theoretical values of ground characteristics of the hail of processes of the 1st cluster

Наземные характеристики града					
Средний диаметр, D_{cp}		Средняя поверхностная плотность кинетической энергии, E_{cp}		Средняя концентрация, N_{cp}	
теоретическое	реальное	теоретическое	реальное	теоретическое	реальное
5,81	15,5	230,67	213,00	8269,23	1575,00
5,89	4,52	60,94	19,90	6002,62	4128,00
5,16	9,2	77,66	24,00	6429,34	830,00
5,59	6,73	97,12	87,97	13993,38	5180,00
5,12	5,8	49,85	4,00	6366,34	300,00
3,77	10,97	230,51	482,30	9235,99	2870,00
5,19	7,88	131,71	90,82	6909,47	2743,00
7,53	10,3	206,40	195,40	6216,53	1070,00
6,19	6,71	153,94	124,98	4840,62	3759,00
4,73	5,9	75,81	48,41	14195,50	5103,00
.....					
5,89	3,82	96,85	12,41	4259,63	5358,00
6,28	5,38	96,86	14,31	3989,09	9697,00
4,05	5,05	119,77	89,00	2831,55	17080,00
4,27	4,85	20,94	3,28	10343,80	2855,00
7,83	7,5	83,20	8,85	11095,33	3210,00
6,93	6	230,67	161,60	2728,37	2600,00
5,09	4,4	166,79	106,60	13358,99	8190,00
4,05	5,5	230,67	163,80	9484,84	6830,00
7,68	7,1	85,5	15,5	5787,93	670,00
Среднее значение					
5,4	6,48	139,87	106,89	7255,06	041,457

ней энергии выпавшего града корреляция наблюдается с псевдопотенциальной температурой смоченного термометра на уровне максимальной разности температур ($\Theta'_p(Z_m)$). Средняя концентрация выпавшего града для процессов второго кластера имеет наиболее значительную корреляцию с высотой слоя зарождения нисходящих потоков (H_*). Коэффициенты уравнений регрессии для процессов 2-го кластера приведены в таблице 3.

По результатам регрессионного анализа были построены уравнения взаимосвязи наземных характеристик града с параметрами атмосферы для процессов, вошедших во 2-й кластер:

$$D_{cp} = D_0 + D_1 H_v, \quad (10)$$

где H_v – уровень конвекции, км;

$$D_0 = 0,232 \text{ мм};$$

$$D_1 = 0,6 \text{ мм} \cdot \text{км}^{-1}$$

$$E_{cp} = -E_0 + E_1 \Theta'_p(Z_m), \quad (11)$$

где $\Theta'_p(Z_m)$ – псевдопотенциальная температура смоченного термометра на уровне максимальной разности температур облака и окружающего воздуха,

$$E_0 = 13823,9 \text{ Дж};$$

$$E_1 = 49,195 \text{ Дж} \cdot \text{K}^{-1};$$

$$N_{cp} = -N_0 + N_1, \quad (12)$$

где – высота слоя зарождения нисходящих потоков, км;

$$N_0 = 2701,954;$$

$$N_1 = 2269,969 \text{ км}^{-1}.$$

Анализ изменений спектральных и энергетических характеристик градобитий в процессах, входящих во 2-й кластер (слабые процессы) показал, что активное воздействие приводит к увеличению среднего диаметра градин в 1,1 раза, уменьшению средней кинетической энергии на 70 %, уменьшению их концентрации на 60 %.

Из вышеописанного следует, что классификация методом кластерного анализа была проведена правильно и физически обоснована, поскольку во второй кластер вошли только 3 процесса, на

которые было проведено АВ. Результаты расчетов подтверждают, что во 2-й класс вошли более слабые градовые процессы.

Выводы

Для исследования влияния АВ на наземные характеристики градовых осадков был проведен кластерный анализ градовых процессов с использованием наземных характеристик градовых осадков и параметров атмосферы в дни с градовыми процессами. Анализ показал, что представление градовых процессов в виде 2-х кластеров является наиболее приемлемым. Для процессов, относящихся к обоим кластерам, построены регрессионные уравнения, связывающие наземные характеристики града с параметрами атмосферы.

С использованием вошедших в уравнения атмосферных параметров для процессов с АВ были посчитаны теоретические значения наземных характеристик града в двух кластерах и проведено их сравнение со значениями реальных характеристик града на земле после проведения АВ.

Анализ полученных результатов показал, что изменения наземных характеристик градовых осадков, в результате АВ из процессов 1-го кластера, к которому относятся более мощные градовые процессы, не приводит к значимому изменению наземных характеристик града. Для процессов 2-го кластера (слабые процессы) активное воздействие приводит к уменьшению значений наземных характеристик градовых осадков.

Построенные регрессионные уравнения, связывающие наземные характеристики града с параметрами атмосферы позволяют с определенной точностью оценить значения характеристик града на земле.

Библиографический список

1. Акимов В.А., Соколов Ю.И. Глобальные и национальные приоритеты снижения риска бедствий и катастроф / МЧС России. М.: ФГБУ ВНИИ ГО ЧС (ФЦ), 2016. 396 с.
2. РД 52.37.722-2009. Районирование территории по градоопасности / М.Т. Абшаев, А.М. Малкарова, Н.А. Борисова. Нальчик: Изд. «Эльбрус», 2009. 16 с.
3. Тлисов М.И. Физические характеристики града и механизм его образования. С.-Пб.: Гидрометеиздат, 2002. 386 с.

4. Тлисов М. И., Таумурзаев А.Х., Федченко Л.М., Хучунаев Б.М. Физические характеристики града и повреждаемость сельскохозяйственных культур // Труды ВГИ, 1987. Вып. 74. С. 137–145.
5. Беленцова В.А., Федченко Л.М. О влиянии циркуляции термодинамического состояния нижнего слоя тропосферы на локализацию и интенсивность конвективных процессов на Северном Кавказе // Труды ВГИ, 1979. Вып. 44. С. 48–59.
6. Гораль Г.Г., Мальбахова Н.М. Оценка потенциальной неустойчивости атмосферы при развитии градовых процессов. Метеорология и гидрология, 1985. № 3. С. 36–45.
7. Кагермазов А.Х. Прогноз града по выходным данным глобальной модели атмосферы (T254 NCEP). Метеорология и гидрология, 2012. № 3. С. 28–34.
8. Федченко Л.М., Кагермазов А.Х. Использование статистических методов для прогноза градовых процессов и их характеристик. Метеорология и гидрология, 1988. № 4. С. 41–50.
9. Кагермазов А.Х. Цифровая атмосфера. Современные методы и методология исследования опасных метеорологических процессов и явлений. Монография. Нальчик: Печатный двор, 2015. 210 с.
10. Бьюль А., Цефель П. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей. СПб.: ДиаСофтЮП, 2002. 608 с.
11. Хучунаев Б.М. Микрофизика зарождения и предотвращения града: автореф. дис. докт. физ.-мат. наук. 25.00.30 / Хучунаев Б. М., Нальчик, 2002. 44 с.
12. Ташилова А.А. Исследование взаимосвязи микрофизических характеристик града на земле с параметрами атмосферы: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Нальчик, 2002. 158 с.
13. Хучунаев Б.М., Ташилова А.А., Теунова Н.В. Оценка физической эффективности активных воздействий на градовые процессы. «Известия КБНЦ РАН», № 6. Нальчик, 2008. С. 169–175.
14. Хучунаев Б.М., Ташилова А.А., Теунова Н.В. Некоторые результаты оценки активных воздействий на градовые процессы // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2009. № 2. С. 72–75.

15. Тлисов М.И., Хучунаев Б.М., Ташилова А.А., Теунова Н.В. Оценка физической эффективности активных воздействий на градовые процессы по радиолокационным данным с использованием регрессионных уравнений связи параметров атмосферы с характеристиками града. «Известия КБНЦ РАН», №3, Нальчик, 2012. С. 81–85.

References

1. Akimov V.A., Sokolov Yu.I. Global and National Priorities for Disaster and Disaster Risk Reduction / EMERCOM of Russia. Moscow: FSBI ARRI CD SER (FC), 2016. 396 p.
2. RD 52.37.722-2009. Zoning of the territory according to urban hazard. / M.T. Abshaev, A.M. Malkarova, N.A. Borisov. Nalchik: Ed. Elbrus, 2009. 16 p.
3. Tliso M.I. Physical characteristics of hail and the mechanism of its formation. S.-Pb.: Gidrometeoizdat, 2002. 386 p.
4. Tliso M.I., Taurmurzaev A. Kh., Fedchenko L.M., Khuchunaev B.M. Physical characteristics of hail and damage to agricultural crops // Proceedings of HGI, 1987. Vol. 74. P. 137–145.
5. Belentsova V.A., Fedchenko L.M. On the influence of the circulation of the thermodynamic state of the lower tropospheric layer on the localization and intensity of convective processes in the North Caucasus. Proceedings of HGI, 1979. ISSUE 44. P. 48–59.
6. Goral G.G., Malbakhova N.M. Assessment of the potential instability of the atmosphere during the development of hail processes. Meteorology and Hydrology, 1985. No. 3. P. 36–45.
7. Kagermazov A.Kh. Hail forecast based on the output of the global atmospheric model (T254 NCEP). Meteorology and Hydrology, 2012. No. 3. P. 28–34.
8. Fedchenko L.M., Kagermazov A.Kh. Using statistical methods to predict hail processes and their characteristics. Meteorology and Hydrology, 1988. No. 4. P. 41–50.
9. Kagermazov A.Kh. Digital atmosphere. Modern methods and methodology for the study of hazardous meteorological processes and phenomena. Monograph, Nalchik "Printing yard", 2015. 210 p.
10. Byul A., Tsefel P. SPSS: the art of information processing. Analysis of statistical data and recovery of hidden patterns. SPb.: DiaSoftUP, 2002. 608 p.
11. Khuchunaev B.M. Microphysics of the origin and prevention of hail: Author's abstract. dis. doct. physical-mat. sciences. 25.00.30 / Khuchunaev B.M. Nalchik, 2002. 44 p.

12. Tashilova A.A. Investigation of the relationship of the micro-physical characteristics of hail on the ground with the parameters of the atmosphere: dis. Cand. physical-mat. sciences. 25.00.30 / Tashilova Alla Amarbievna, Nalchik, 2002. 158 p.
13. Khuchunaev B.M., Tashilova A.A., Teunova N.V. Assessment of the physical effectiveness of active influences on hail processes. "Izvestia KBSC RAS", No. 6. Nalchik, 2008. P. 169–175.
14. Khuchunaev B.M., Tashilova A.A., Teunova N.V. Some results of assessing active influences on hail processes // News of higher educational institutions. North Caucasian region. Series: Natural Sciences. 2009. No. 2. P. 72–75.
15. Tlisov M.I., Huchunaev B.M., Tashilova A.A., Teunova N.V. Assessment of the physical efficiency of active influences on hail processes based on radar data using regression equations for the relationship between atmospheric parameters and hail characteristics. «Izvestia KBSC RAS», No. 3. Nalchik, 2012. P. 81–85.

Поступило в редакцию 10.08.2021,
принято к публикации 06.09.2021.

Сведения об авторах

Теунова Наталия Вячеславовна, и. о. старшего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт». Адрес: Россия, Кабардино-Балкарская республика, г. Нальчик, пр. Ленина, д. 2, Scopus ID: 57191571952, Researcher ID: K-4312-2015, Телефон (903) 492-99-64, E-mail: nata0770@yandex.ru

About the authors

Teunova Nanaliya Vyacheslavovna, acting senior researcher associate of department of physics of clouds of Federal state budgetary institution "High-Mountain Geophysical Institute". Address: Russia, Kabardino-Balkar Republic, Nalchik, Lenin Ave., 2. Scopus ID: 57191571952, Researcher ID: K-4312-2015, Phone: (903) 492-99-64, E-mail: nata0770@yandex.ru

25.00.30
УДК 551.557.59

**Хучунаев Б.М.,
Геккиева С.О.,
Будаев А.Х.**

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ, АГРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»,
Россия,
г. Нальчик

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА УДЕЛЬНЫЙ ЗАРЯД НА ЧАСТИЦАХ РЕАГЕНТА, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ВОЗГОНКЕ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВОВ

DOI: 10.37493/2308-4758.2021.4.12

Введение.

До настоящего времени, несмотря на то, что реагенты давно используются для управления облачными процессами, вопросы, связанные с влиянием электрического поля на их льдообразующие свойства изучены не в полной мере. Исследования, проведенные в этом направлении, показывают, что рост зародышевых частиц зависит от напряженности электрического поля, заряда кристаллизующего ядра и от реализации того или иного механизма роста [1]. Наличие в атмосфере электрического поля и заряда на частицах реагента может влиять на удельный выход льдообразующих ядер при проведении работ по активному воздействию на облачные системы. В связи с этим исследования, связанные с изучением влияния напряженности электрического поля на удельный заряд на частицах реагента, образующихся при возгонке пиротехнических составов, представляются актуальными и практически значимыми для определения дозировки реагентов при воздействии на облачные процессы.

**Материалы и методы
исследования.**

В данной статье представлены результаты лабораторных экспериментов по апробированию аппаратуры и методики определения влияния напряженности электрического поля на удельный заряд на частицах реагента, образующихся при возгонке пиротехнических составов. Методика измерения заряженных частиц основана на использовании отклонения частиц реагента в электрическом поле плоского конденсатора. Предварительные результаты, полученные в ходе исследований, позволили установить, что при возгонке пиротехнических составов происходит заряджение частиц. В качестве рабочего материала для лабораторных исследований были рассмотрены пиротехнические составы, которые используются в противогорадовых изделиях (ПГИ) типа «Алазань-6» и «Алазань-9» [2, 3, 4].

**Результаты исследования
и их обсуждение.**

В статье представлены аппаратура, методика и предварительные результаты исследования влияния напряженности электрического поля на удельный заряд на частицах реагента, образующихся при возгонке пиротехнических составов. Лабораторные эксперименты были проведены на лабораторных установках ВГИ.

Выводы.

Проведенные эксперименты показали, что увеличение отрицательного удельного заряда на частицах реагента незначительно увеличивает удельный выход льдообразующих ядер (на 20%) из пиротехнического состава АД-1. При напряженности электрического поля $3,0 \times 10^5$ В/м и удельного заряда на частицах реагента $-8,4 \times 10^{-4}$ Кл/кг удельный выход льдообразующих ядер с пиротех-

нического состава АД–1 в 2,7 раза выше, чем без электрического поля.

Ключевые слова: напряженность электрического поля, активные воздействия, пиротехнический состав, реагент, льдообразующие частицы.

**Khuchunaev B.,
Gekkieva S.,
Budaev A.**

Federal State Budgetary Institution
«High-Mountain Geophysical Institute»,
Russia, Nalchik

Laboratory Studies of the Effect of the Electric Field Strength on the Specific Charge on Reagent Particles Formed During the Sublimation of Pyrotechnic Compositions

Introduction.

Until now, despite the fact that reagents have long been used to control cloudy processes, issues related to the influence of an electric field on their ice-forming properties have not been fully studied. Studies carried out in this direction show that the growth of seed particles depends on the electric field strength, the charge of the crystallizing nucleus, and on the implementation of one or another growth mechanism [1]. The presence of an electric field and a charge on the reagent particles in the atmosphere can affect the specific yield of ice-forming nuclei during work on active action on cloud systems. In this regard, studies related to the study of the effect of the electric field strength on the specific charge on the reagent particles formed during the sublimation of pyrotechnic compositions seem relevant and practically significant for determining the dosage of reagents when exposed to cloudy processes.

Materials and methods of the research.

This article presents the results of laboratory experiments on testing the equipment and methods for determining the effect of the electric field strength on the specific charge on the reagent particles formed during the sublimation of pyrotechnic compositions. The method for measuring charged particles is based on the use of the deflection of reagent particles in the electric field of a flat capacitor. The preliminary results obtained in the course of research made it possible to establish that the particles are charged during the sublimation of pyrotechnic compositions. Pyrotechnic compositions used in anti-hail devices such as «Alazan–6» and «Alazan–9» [2, 3, 4] were considered as a working material for laboratory research.

The results of the study and their discussion.

The article presents the equipment, methodology and preliminary results of the study of the influence of the electric field strength on the specific charge on the reagent particles formed during the sublimation of pyrotechnic compositions. Laboratory experiments were carried out on High-Mountain Geophysical Institute laboratory facilities.

Conclusions.

The experiments have shown that an increase in the negative specific charge on the reagent particles slightly increases the specific yield of ice-forming nuclei (by 20%) from the АД–1 pyrotechnic composition. With an electric field strength of $-8,4 \times 10^{-4}$ V/m and a specific charge on the reagent particles of $3,0 \times 10^5$ C/kg, the specific yield of ice-forming nuclei from the АД–1 pyrotechnic composition is 2.7 times higher than without an electric field.

Key words:

electric field strength, active influences, pyrotechnic composition, reagent, ice-forming particles.

Введение

В данной статье представлены результаты лабораторных экспериментов по апробированию аппаратуры и методики изучения влияния напряженности электрического поля на удельный заряд на частицах реагента, образующихся при возгонке реагента AgI и пиросооста АД–1.

Методика изучения влияния напряженности электрического поля на удельный заряд на частицах реагента основана на использовании отклонения частиц реагента в электрическом поле плоского конденсатора. Предварительные результаты, полученные в ходе исследований, позволили установить, что увеличение отрицательного удельного заряда на частицах реагента незначительно увеличивает удельный выход льдообразующих ядер (на 20%) из пиротехнического состава АД–1 [5–9, 10].

Материалы и методы исследования

Проведение работ по активным воздействиям (AB) на облачные процессы требует учета многих факторов, которые влияют на итоговый результат. В частности, важен анализ метеоусловий, выбор реагента и способов его доставки в облачную среду для достижения оптимального успеха [11, 12]. В связи с этим при разработке и усовершенствовании методов AB в первую очередь необходимы теоретические исследования и лабораторное моделирование процессов, происходящих в облаках. В частности, при разработке противогорадовых мероприятий необходимо учитывать наличие электрического поля и заряженных частиц в кучево-дождевом облаке и их влияние на процессы образования ледяной фазы на частицах реагента. Следует отметить, что частицы реагента, вносимого в облако, приобретают электрический заряд за счет контактного механизма и диффузии частиц в электрическом поле [13].

В работе [14] показано влияние электрического поля на процессы кристаллизации капель воды в воздухе. Исследования показали, что при наличии электрического поля замерзание капель воды и дальнейшее остывание замерзших капель происходит быстрее, чем в отсутствии электрического поля. В работах [15, 16] отмечается, что внесение частиц реагента и мелких искусственных кристал-

лов в наиболее водную область облака приводит к частичной или почти полной ликвидации жидких капель. При этом за счет электрокоагуляции время роста частиц осадков в мощном конвективном облаке сокращается на $20 \div 30\%$. Также в ходе численных экспериментов было установлено, что существует положительная обратная связь между ростом массы ледяных частиц и объемом электрического заряда в облаке.

Результаты экспериментальных исследований, приведенные в работах [17, 18], показали, что напряженность электрического поля, заряд кристаллизующего ядра влияют на рост зародышевых частиц из паровой фазы.

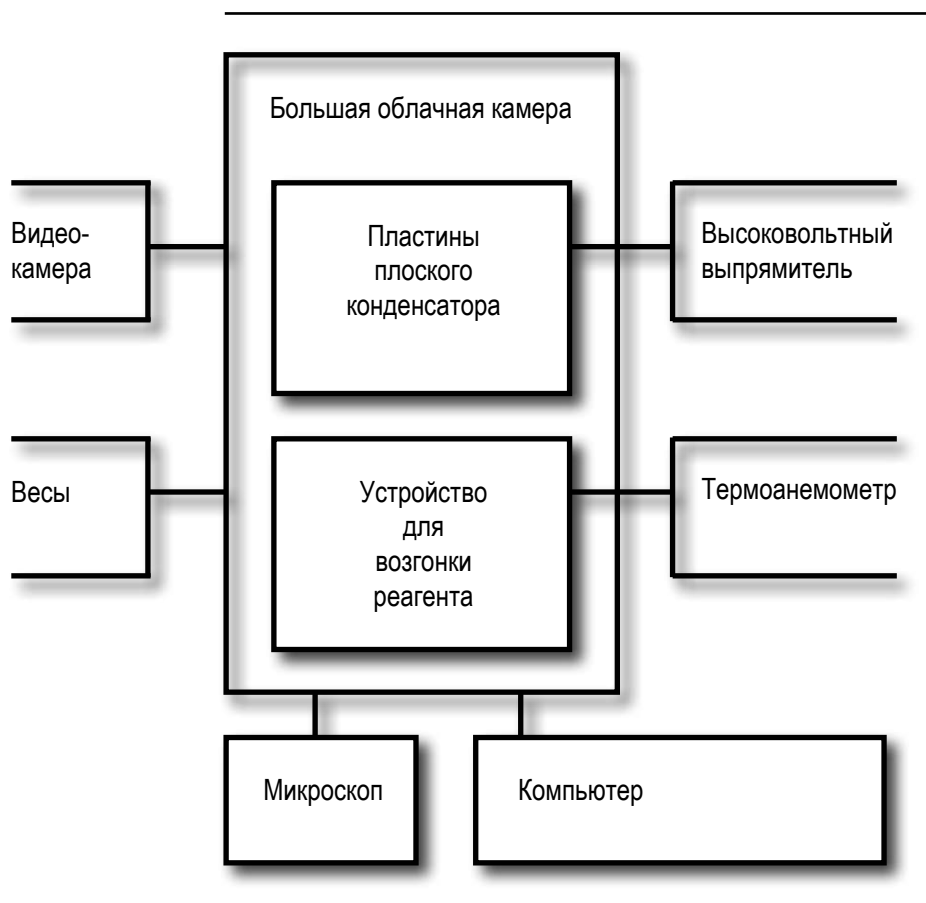


Рис. 1.

Состав типовой установки.

Fig. 1. Typical installation composition.

Для проведения лабораторных экспериментов был создан комплекс специальной аппаратуры, схема которой представлена на рисунке 1.

Аппаратура для определения удельного заряда на частицах реагента, образованных при возгонке пиротехнических составов, должна соответствовать ряду требований: возможность отделить частицы иодида серебра от других продуктов возгонки реагента; сохранение частиц с зарядом для исследования их льдообразующих свойств. Анализ работ, опубликованных по методам измерения заряда на частицах показал, что ни один из методов не позволяет решать приведенные задачи [19, 20, 21].

В комплекс аппаратуры входит большая облачная камера, пластины плоского конденсатора, высоковольтный выпрямитель, устройство для возгонки реагента, термоанемометр, весы, оптический микроскоп, видеокамера [22].

Над устройством для возгонки реагента расположены пластины плоского конденсатора, состоящие из фольгированного гетинакса. На краю каждой пластины закреплена линейка. Пластины конденсатора установлены так, чтобы лодочка устройства возгонки реагента располагалась строго посередине между пластинами. Посередине между пластинами конденсатора установлена измерительная часть термоанемометра для измерения скорости движения потока продуктов возгонки реагента. Видеокамера для записи процесса возгонки закреплена на задней стенке большой облачной камеры, ее объектив направлен на область между пластинами конденсатора. Для определения областей осаждения продуктов возгонки реагента на пластины конденсатора на каждой пластине закреплены бумажные фильтры от нижней до верхней части каждой пластины.

Методика изучения влияния напряженности электрического поля на льдообразующую эффективность пиротехнического состава АД-1

Предварительно на электронных весах взвешивается определенное количество пиросостава. Он загружается на металлическую лодочку устройства для возгонки реагента. На дно большой облачной камеры устанавливаются термостатированные подложки, накрытые крышками. В камере с помощью ультразвукового па-

рогенератора создается искусственная облачная среда. После чего на пластины конденсатора подается высокое напряжение с высоковольтного выпрямителя. На устройство для возгонки подается ток, происходит диспергирование реагента. После возгонки воздух в камере перемешивается вентилятором и с появлением в поле зрения первых кристалликов поочередно открывают подложки и осаждают на них кристаллы. Каждая подложка изучается в поле оптического микроскопа, подсчитывается количество кристаллов в кадре, затем на компьютере производится расчет удельного выхода [23].

Удельный выход определялся по формуле

$$A = 2,96 \times 10^{15} \frac{n_{кр}}{S_k} \quad (1)$$

где $n_{кр}$ — количество кристаллов в кадре;
 S_k — площадь кадра.

Коэффициент $2,96 \times 10^{15}$ — получен как отношение площади основания большой облачной камеры ($2,96 \times 10^{12}$ мкм²) к массе сожженного реагента (0,001 г).

Результаты исследования и их обсуждение

Серии предварительных экспериментов по апробированию аппаратуры и методики влияния напряженности электрического поля на удельный заряд на частицах реагента, образующихся при возгонке пиросостава АД-1, показали, что при использовании однополярных выпрямителей частицы успевают перезарядиться и приобретают заряд конденсатора, если выпрямитель полярности «0», «+», то положительный, если «0», «-», то отрицательный.

На рисунке 2 показаны фрагменты отклонения продуктов возгонки пиротехнического состава АД-1 в электрическом поле при использовании однополярных выпрямителей. Как видно из фрагмента возгонки угол в случае Б меньше, следовательно, частицы возгонки в начальный момент заряжены отрицательно. В конце процесса горения, основная часть частиц возгонки заряжены положительно.

При высоких значениях напряженности электрического поля порядка $1,5 \times 10^5$ В/м и выше в процессе возгонки реагента происходил пробой напряжения.

а)



б)



Рис. 2.

Отклонение потока частиц из пиросостава Ад–1 в электрическом поле однополярного выпрямителя (а с полярностью «0», «–»; б – с полярностью «0» и «+»).

Fig. 2. Deviation of particle flux from pyrocomposition Ad–1 in the electric field of a unipolar rectifier (a with polarity «0», «-»; b – with polarity «0» and «+»).

а)



б)

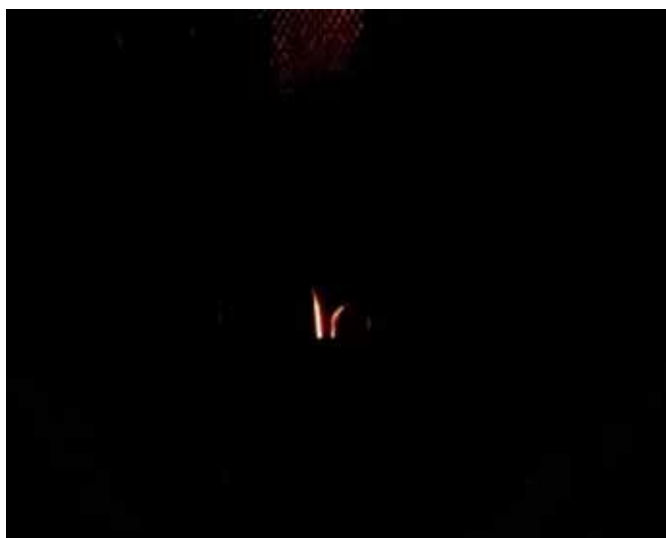


Рис. 3.

Пробой высокого напряжения при возгонке реагента.

Fig. 3. Breakdown of high voltage during the sublimation of the reagent.

В таблице 2 и на рисунке 4 представлена зависимость удельного заряда на частицах реагента от напряженности электрического поля.

Таблица 1. ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА НА ЧАСТИЦАХ РЕАГЕНТА ОТ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
Table 1. Dependence of the specific charge on the reagent particles on the electric field strength

Напряженность электрического поля, кВ/м	Удельн. заряд (q/m), Кл/кг	
	Отриц. заряд. част.	Положит. заряд. част.
6,25	-0,00023287	0,000154194
18,75	-0,00007952	0,000060087
37,5	-0,00008776	0,000021938
56,25	-0,00013415	0,000077
75,0	-0,00140	0,000807
150,0	-0,00083565	0,000222

Таблица 2. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА (ПРИ НАПРЯЖЕННОСТЯХ ОДНОПОЛЯРНОГО КОНДЕНСАТОРА «0», «+»)
Table 2. Quantitative values of the electric field strength and specific charge (at the strengths of the unipolar capacitor «0», «+»)

№	Напряженность, В/м	Удельный заряд, Кл/кг	Тип заряда
1.	$6,25 \times 10^4$	$2,3 \times 10^{-4}$	отрицательный
2.	$1,88 \times 10^5$	$7,9 \times 10^{-5}$	отрицательный
3.	$3,75 \times 10^5$	$8,8 \times 10^{-5}$	отрицательный
4.	$5,63 \times 10^5$	$1,3 \times 10^{-4}$	отрицательный

Таблица 3.

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА (ПРИ НАПРЯЖЕННОСТЯХ ОДНОПОЛЯРНОГО КОНДЕНСАТОРА «0», «-»)

Table 3. Quantitative values of the electric field strength and specific charge (at the strengths of the unipolar capacitor «0», «-»)

№	Напряженность, В/м	Удельный заряд, Кл/кг	Тип заряда
1.	$-6,25 \times 10^4$	$1,5 \times 10^{-4}$	отрицательный
2.	$-1,88 \times 10^5$	$6,0 \times 10^{-5}$	отрицательный
3.	$-3,75 \times 10^5$	$2,2 \times 10^{-5}$	положительный
4.	$-5,63 \times 10^5$	$7,7 \times 10^{-5}$	положительный

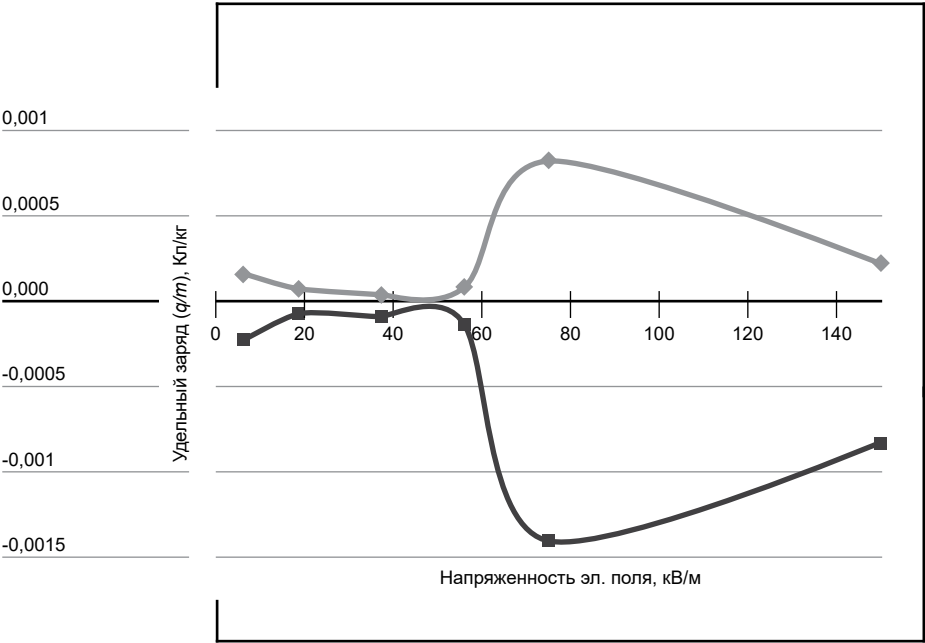


Рис. 4.

Зависимость удельного заряда на частицах, образованных при возгонке пиросоостава АД–1 от напряженности электрического поля.

Fig. 4. Dependence of the specific charge on the particles formed during the sublimation of the pyrocomposition of AD–1 on the electric field strength.

Как видно из таблицы 1–3 и вышеприведенных значений, имеется существенная разница в полученных результатах, что, по-видимому, связано с недоучетом подвижности положительно и отрицательно заряженных ионов. Этот вопрос является предметом дальнейших исследований.

Выводы

Исследована связь заряда на частицах реагента с напряженностью однополярных конденсаторов. Получено, что при напряженностях однополярного конденсатора «0», «+» частицы заряжаются отрицательно. При использовании однополярного конденсатора «0», «–» частицы при напряженностях от 0 до $3,2 \times 10^4$ В/м заряжаются отрицательно. При напряженностях от $3,2 \times 10^4$ В/м частицы реагента заряжаются положительно. При использовании однополярного выпрямителя с полярностью «0», «–» с увеличением напряженности электрического поля удельный заряд, приобретенный частицами реагента, уменьшается. При значениях напряженности $-3,1 \times 10^4$ В/м заряд, приобретенный частицами реагента, уменьшается до 0 Кл/м. При дальнейшем росте напряженности меняется знак заряда частиц реагента с отрицательного на положительный и увеличивается его абсолютное значение. Количественные значения напряженности электрического поля и удельного заряда приведены в таблицах 1–3.

Зарядка частиц реагента производилась по ранее разработанной методике, которая основана на использовании плоского конденсатора с однополярными источниками питания. В экспериментах удельный заряд частиц изменялся от $-1,4 \times 10^{-3}$ Кл/кг до $8,1 \times 10^{-4}$ Кл/кг. Напряженность электрического поля изменялась от 0 В/м до $3,0 \times 10^5$ В/м. Дальнейшее повышение напряженности электрического поля приводило к пробоем между пластинами плоского конденсатора.

Проведенные эксперименты показали, что увеличение отрицательного удельного заряда на частицах реагента незначительно увеличивает удельный выход льдообразующих ядер (на 20%) из пиротехнического состава АД–1. При напряженности электричес-

кого поля $3,0 \times 10^5$ В/м и удельного заряда на частицах реагента $-8,4 \times 10^{-4}$ Кл/кг удельный выход льдообразующих ядер с пиротехнического состава АД–1 в 2,7 раза выше, чем без электрического поля.

Библиографический список

1. Абшаев А.М., Абшаев М.Т. и др. Руководство по организации и проведению противогололедных работ. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Нальчик, 2014. С. 315.
2. Хучунаев Б.М., Байсиев Х.-М. Х., Геккиева С.О., Будаев А.Х. Экспериментальные исследования льдообразующей эффективности пиротехнического состава АД–1 с добавками цинка // Труды ГГО. Вып. 597. 2020. С. 51–60.
3. Khuchunaev B. M., Baysiev Kh.-M. Kh., Gekkieva S. O., Budayev A. Kh. Researches of ice-forming efficiency of products of sublimation of pyrotechnic compositions consisting of silver iodide AgI particles and Zinc Oxide. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1083 012097
4. Хучунаев Б.М., Геккиева С.О., Будаев А.Х. Аппаратура, методика и предварительные результаты измерения удельного заряда на частицах реагента, образующихся при возгонке пиротехнических составов // Труды ГГО. Вып. 599, 2020. С. 128–139.
5. Никандров В.Я. Искусственные воздействия на облака и туманы. Л.: Гидрометеоиздат, 1959. С. 271.
6. Закинян Р.Г. Кинетика роста льда на поверхностях предметов различных форм, помещенных в поток переохлажденного аэрозоля // Материалы V научно-технической конференции СК ГТУ, 2001. С. 20.
7. Wegener A. Thermodynamic der Atmosphäre. Leipzig, 1911. P. 311.
8. Вопросы физики облаков. Сборник избранных статей ГГО. Астерион, СПб., 2008. С. 98–106.
9. Емельянов В.Н., Несмеянов П.А., Эрландц Н.Ю., Шакиров И.Н. Результаты разработки новых пиротехнических составов льдообразующего аэрозоля для средств активного

- воздействия на облака // Труды юбилейной конф., посвящ. 40-летию начала производств. работ по защите от града. Нальчик: Печатный двор, 2011. С. 259–260.
10. Vonnegut B. Experiments with silver-iodide smokes in the natural atmosphere. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1950. Vol. 31.
 11. Айсин Д.Р., Гальперин С.М., Козлов В.Н., Щукин Г.Г. Активные воздействия на облака и осадки в Санкт-Петербурге во время проведения саммита «Группы восьми» // Труды ГГО. Вып. 556. 2007. С. 215–229.
 12. Bedritsky A. and Chernikov A. Cloud seeding to protect Moscow from rain on 9 May 1995 // *WMO bulletin*, 1996. Vol. 45. №1. P. 60–64.
 13. Синькевич А.А., Довгалюк Ю.А., Степаненко В.Д. Результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния коронного разряда на электризацию частиц и фазовые переходы воды в облаках (обзор работ ГГО). 50 лет отделу физики облаков ГГО // Сборник избранных статей ГГО. Вопросы физики облаков. Астерион, Санкт-Петербург. 2008. С. 316–334.
 14. Balkarova S.B., Sozaeva L.T., Gekkieva S.O. The influence of the electric field on the crystallization of water droplets in the air flow. *International Scientific Conference on Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development 2019, CATPID 2019, Kislovodsk, 01-05 октября 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 698 (2019) 044021. DOI: 10.1088/1757-899X/698/4/044021.*
 15. Шаповалов В. А. Численное моделирование формирования градин в облаках при естественном развитии и активном воздействии кристаллизующим реагентом // *Наука. Инновации. Технологии.* №3. 2018. С. 227–239.
 16. Shapovalov V.A., Shapovalov A.V., Sherieva M.A. Three-dimensional mathematical model of a convective cloud with detailed account for the thermodynamic, microphysical and electric processes. 8th All-Russian Conference on Atmospheric Electricity Nalchik, 23–27 сентября 2019. *J. of Phys. Conf. Ser. 8. «VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity». 2020. 1604 (2020) 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/1604/1/012013.*
 17. Першина Т.А., Шлыков В.В., Авраменко Р.Ф., Николаева В.И., Щукин Г.Г., Стасенко В.Н. Исследование влияния вы-

- соковольтного высокочастотного разряда на искусственный туман // Труды НИЦ ДЗА. Вып. 1 (546). 1997. С. 62–67.
18. Красногорская Н. В. Влияние электрических сил на коагуляцию частиц сравнимых размеров // ИАН СССР. ФАО. Т. 1. 1965. С. 339–345.
 19. Barthe C., Chong M., Pinty J., Bovalo C., and Escobar J. CELLS v1.0: Updated and Parallelized Version of an Electrical Scheme to Simulate Multiple Electrified Clouds and Flashes over Large Domains, *Geoscientific Model Development*, vol. 5, issue. 1. P. 167–184. 2012. DOI: 10.5194/gmd-5-167-2012.
 20. Benmoshe N., Pinsky M., Pokrovsky A., Khain A. P. Turbulent Effects on Cloud Microstructure and Precipitation of Deep Convective Clouds as Seen from Simulations with a 2-D Spectral Microphysics Cloud Model, *J. Geophys. Res.*, 117, D06220, 2012. DOI: 10.1029/2011JD016603.
 21. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество [Текст] / пер с англ.; под ред. [и с послесл.] д-ра физ.-мат. наук И.М. Имянитова. Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. 421 с.
 22. Хучунаев Б. М., Панаэтов В. П., Хучунаев А. Б. Исследование образования нанотрубок оксида цинка // Материалы Международного симпозиума, посвященного 20-летию создания ФГБУ науки Кабардино-Балкарского научного центра РАН, 2013. С. 61–63.
 23. Хучунаев Б. М., Панаэтов В. П., Хучунаев А. Б. Аппаратура и методика лабораторного моделирования начальной стадии роста града // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. 2010. № 4 (158). С. 64–67.

References

1. Abshaev A. M., Abshaev M. T. et al. Guidelines for organizing and carrying out anti-hail works. Federal Service for Hydro-meteorology and Environmental Monitoring (Roshydromet). Nalchik, 2014. 315 p.
2. Khuchunaev B.M., Baisiev H.-M. Kh., Gekkieva S.O., Budaev A.Kh. Experimental studies of the ice-forming efficiency of the AD-1 pyrotechnic composition with Zinc additions. Collection «Proceedings of the MGO». Issue 597. 2020. 51–60 p.
3. Khuchunaev B.M., Baysiev Kh.-M.Kh, Gekkieva S.O., Budaev

- A. Kh. Researches of ice-forming efficiency of products of sublimation of pyrotechnic compositions consisting of Silver Iodide AgI particles and Zinc Oxide. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1083 012097.
4. Khuchunaev B.M., Gekkieva S.O., Budaev A.Kh. Apparatus, methodology and preliminary results of measuring the specific charge on reagent particles formed during the sublimation of pyrotechnic compositions. Collection «Proceedings of the MGO». Issue 599, 2020. P. 128–139.
 5. Nikandrov V.Ya. Artificial influences on clouds and fogs. L.: Hydrometeoizdat, 1959, 271 p.
 6. Zakinyan R.G. Kinetics of ice growth on the surfaces of objects of various shapes placed in a stream of supercooled aerosol // Proceedings of the V scientific and technical conference. «North Caucasian Mining and Metallurgical Institute», 2001. 20 p.
 7. Wegener A. Thermodynamic der Atmosphäre. Leipzig, 1911. P. 311.
 8. Problemss of the Cloud Physics. Collection of selected articles of the MGO. Asterion, SPb., 2008. P. 98–106.
 9. Emelyanov V.N., Nesmeyanov P.A., Erlandts N.Yu., Shakirov I.N. Results of the development of new pyrotechnic compositions of ice-forming aerosol for means of weather modification // Proceedings of the jubilee conference, dedicated 40th Anniversary of the start of production the works on protection from hail. Nalchik: Print Court, 2011. P. 259–2 60.
 10. Vonnegut B. Experiments with Silver Iodide smokes in the natural atmosphere. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1950. Vol. 31.
 11. Aisin D.R., Galperin S.M., Kozlov V.N., Shchukin G.G. Weather modification in St. Petersburg during the G8 summit // Proceedings of the MGO. Issue 556. 2007. P. 215–229.
 12. Bedritsky A. and Chernikov A. Cloud seeding to protect Moscow from rain on 9 May 1995 // WMO bulletin. 1996. Vol. 45. №1. P. 60–64.
 13. Sinkevich A. A., Dovgalyuk Yu. A., Stepanenko V. D. Results of theoretical and experimental studies of the effect of corona discharge on electrification of particles and phase transitions of water in clouds (review of the work of the MGO). 50th An-

niversary of the Department of Cloud Physics of the MGO // Collection of selected articles of the MGO. Problems of the Cloud Physics. Asterion, St.Petersburg. 2008. P. 316–334.

14. Balkarova S. B., Sozaeva L.T., Gekkieva S.O. The influence of the electric field on the crystallization of water droplets in the air flow. International Scientific Conference on Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development 2019, CATPID 2019, Kislovodsk, October 01-05, 2019. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 698 (2019) 044021. DOI: 10.1088/1757–899X/698/4/044021.
15. Shapovalov V.A. Numerical simulation of the formation of hailstones in the clouds at the natural development and at the active influence with the help of crystallizing reagent // Science. Innovation. Technologies. 2016. №3. P. 227–239.
16. Shapovalov V.A., Shapovalov A.V., Sherieva M.A. Three-dimensional mathematical model of a convective cloud with detailed account for the thermodynamic, microphysical and electric processes. 8th All-Russian Conference on Atmospheric Electricity Nalchik, 23–27 сентября 2019. J. of Phys. Conf. Ser. 8. «VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity». 2020. 1604 (2020) 012013. DOI:10.1088/1742–6596/1604/1/012013
17. Pershina T.A., Shlykov V.V., Avramenko R.F., Nikolaeva V.I., Shchukin G.G., Stasenko V.N. Investigation of the influence of high-voltage high-frequency discharge on artificial fog // Proceedings of the Scientific Research Center of DSA, Issue 1 (546). 1997. P. 62–67.
18. Krasnogorskaya NV Influence of electrical forces on the coagulation of particles of comparable sizes // Bulletin of the Russian Academy of Sciences, USSR. FAO. Vol. 1. 1965. P. 339–345.
19. Barthe C., Chong M., Pinty J., Bovalo C., and Escobar J. CELLS v1.0: Updated and Parallelized Version of an Electrical Scheme to Simulate Multiple Electrified Clouds and Flashes over Large Domains, Geoscientific Model Development, Vol. 5, Issue. 1. P. 167–184. 2012. DOI: 10.5194/gmd–5–167–2012
20. Benmoshe N., Pinsky M., Pokrovsky A., Khain A. P. Turbulent Effects on Cloud Microstructure and Precipitation of Deep Convective Clouds as Seen from Simulations with a 2-D

- Spectral Microphysics Cloud Model, J. Geophys. Res., 117, D06220, 2012. DOI: 10.1029/2011JD016603.
21. Chalmers J. A. Atmospheric electricity / Transl. from English and ed. [and with afterword. Dr. Phys.-Math. Sciences I.M. Imyaninov. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1974. 421 p.
 22. Khuchunaev B. M., Panaetov V. P., Khuchunaev A. B. Investigation of the formation of Zinc Oxide nanotubes // Materials of the International Symposium dedicated to the 20th Anniversary of the establishment of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2013. P. 61–63.
 23. Khuchunaev B. M., Panaetov V. P., Khuchunaev A. B. Equipment and methods of laboratory modeling of the initial stage of the growth of the city // Bulletin of higher education institutes. North Caucasus region. № 4 (158), 2010. P. 64–67.

Поступило в редакцию 02.11.2021,

принята к публикации 18.12.2021

Сведения об авторах

Хучунаев Бузигит Муссаевич, докт. физ.-мат. наук, зав. лабор. МФО ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»,
Россия, г. Нальчик, пр. Ленина, 2,
Researcher ID 6504339248
e-mail: buzgigit@mail.ru

Геккиева Сафият Омаровна, канд. ф.-м.н., СНС ЛМФО ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»,
Россия, г. Нальчик, пр. Ленина, 2,
Researcher ID 57214244669
тел. 8(928) 69-36-444, e-mail: sgekkieva@list.ru

Будаев Алим Хадисович, МНС лабор.
МФО ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»,
Россия, г. Нальчик, пр. Ленина, 2,
e-mail: budayalim@yandex.ru

About authors

Khuchunaev Buzigit, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Department of cloud physics, Federal State Budgetary Institution «High-Mountain Geophysical Institute», Russia, KBR, 360000, Nalchik, Lenin Ave., 2, Researcher ID 6504339248, e-mail: buzgigit@mail.ru

Gekkieva Safiyat, candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Microphysics of Clouds of the Federal State Budgetary Institution «High-Mountain Geophysical Institute», Russia, KBR, 360000, Nalchik, Lenin Ave., 2, Researcher ID 57214244669. Phone: 8(928) 69-36-444, sgekkieva@list.ru

Budaev Alim Khadisovich, junior researcher Federal State Budgetary Institution «High-Mountain Geophysical Institute», Russia, KBR, 360000, Nalchik, Lenin Ave., 2, e-mail: budayalim@yandex.ru



Издательство Северо-Кавказского федерального университета. г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1.

Корректор – М.И. Толмачев.
Компьютерная версия – О.Г. Полевич.

Подписано в печать 20.12.2021 г. Выход в свет 27.12.2021 г.
Формат 70 × 108 1/16. Гарнитура Times New Roman. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 19,78. Тираж 1000 экз. Цена 534 руб.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет». 355029, г. Ставрополь, пр-т Кулакова, 2.