

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал
Северо-Кавказского федерального
университета

ISSN 2308–4758



Выпуск № 1, 2019 г.

Выходит 4 раза в год

	«Наука. Инновации. Технологии» Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета
Учредитель	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет»
Главный редактор	д-р геогр. наук, профессор В. С. Белозеров
Редакционный совет	А. А. Левитская, председатель, ректор СКФУ, канд. филол. наук, доцент; А.А. Лиховид, заместитель председателя, проректор по научной работе и стратегическому развитию СКФУ, д-р геогр. наук, профессор; В. С. Белозеров, главный редактор, д-р геогр. наук, профессор; М.Ч. Залиханов, д-р геогр. наук, профессор, академик РАН (Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик); А. Г. Храмцов, д-р техн. наук, профессор, академик РАН; Ю. Ю. Балега, д-р физ.-мат. наук, академик. РАН (САО РАН, п. Нижний Архыз); С.В. Рязанцев, д-р экон. наук, член-корр. РАН (ИСПИ РАН, г. Москва); В.С. Тикунов, д-р геогр. наук, профессор (МГУ им. Ломоносова, г. Москва); С. Пестрак, профес-сор (Институт Жана Лямура университета Лотарингии, г. Нанси, Франция)
Редакционная коллегия	М.Т. Абшаев, д-р физ.-мат. наук, профессор (Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик); А.А. Лиховид, д-р геогр. наук, профессор; В.С. Белозеров, д-р геогр. наук, профессор (главный редактор); Т.П. Бондарь, д-р мед. наук, профессор; В.Б. Боро-дулин, д-р мед. наук, профессор (Саратовский ГМУ Росздрава, г. Саратов); О.А. Бу-това, д-р мед. наук, профессор; Т.И. Герасименко, д-р геогр. наук, профессор (Оренбургский гос. университет, г. Оренбург); В. А. Гридин, д-р геол.-минерал. наук, профессор; Л.И. Губарева, д-р биол. наук, профессор; Т.И. Джандарова, д-р биол. наук, доцент; Ю.И. Диканский, д-р физ.-мат. наук, профессор; Л.А. Диневи-ч, д-р физ.- мат. наук, профессор (Тель-Авивский университет, г. Тель-Авив); К.В. Ерин, д-р физ.-мат. наук, профессор; А.И. Жакин, д-р физ.-мат. наук, профессор (Юго-Западный гос. университет, г. Курск); А.Р. Закинян, канд. физ.-мат. наук, доцент; А.О. Иванов, д-р физ.-мат. наук, профессор (Уральский федеральный университет им. Б. Ельцина); А.А. Коляда, д-р физ.-мат. наук, доцент (Белорусский гос. универ-ситет, г. Минск); С.А. Куникин канд. физ.-мат. наук, доцент; А.Д. Лодыгин, д-р техн. наук, доцент; А.В. Лысенко, д-р геогр. наук, доцент; И.Н. Молодикова, канд. геогр. наук (Центрально-Европейский университет, г. Будапешт); В.И. Наац, д-р физ.-мат. наук, профессор; Т.Г. Нefeldова, д-р геогр. наук, вед. науч. сотрудник РАН (ИГ РАН, г. Москва); П.М. Полян, д-р геогр. наук, вед. науч. сотрудник РАН (ИГ РАН, г. Москва); В.В. Разумов, д-р геогр. наук, профессор; Л.Д. Тимченко, д-р ветеринар. наук, профессор; Л. Д. Цатурян, д-р мед. наук, профессор (Ставропольский гос. мед. университет, г. Ставрополь); Н.И. Червяков, д-р техн. наук, профессор; В. А. Шальнев, д-р геогр. наук, профессор; Н.А. Щитова, д-р геогр. наук, профессор; А.С. Молахосе-ини, канд. наук, доцент (Исламский университет Азад, Керман, Иран); Х.А.А. Кдаис, канд. техн. наук, профессор (Иорданский университет науки и технологии, Амман)
Свидетельство о регистрации	выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных техноло-гий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) ПИ № ФС77–52723 от 8.02.2013
Подп. индекс	Объединенный каталог. ПРЕССА РОССИИ. Газеты и журналы: 94011
Журнал включен	в БД «Российский индекс научного цитирования». Журнал «Вестник Ставропольского государственного университета» перерегистрирован в журнал «Наука. Инновации. Технологии» в связи с переименованием учредителя.
Журнал	в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соиска-ние ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени док-тора наук, с 1 декабря 2015 г.
Адрес Телефон Сайт E-mail	редакции и издателя: 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1 (8652) 33–07–32 www.ncfu.ru nit_ncfu@mail.ru
ISSN	2308–4758
©	ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», 2019

	«Science. Innovations. Technologies» North Caucasus Federal University
Founder	Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «North Caucasus Federal University»
Editor in chief	V. S. Belozеров, Doctor of Geographical Sciences, professor
Editorial Council	A.A. Levitskaya, chairman, Rector SKFU, PhD. Philology Sciences, Associate Professor; A.A. Likhovid, Vice Chairman, Doctor of Geographical Sciences, Professor; V.S. Belo-zerov, Chief Editor, Doctor of Geographical Sciences, professor; M.Ch. Zalikhanov, Dr. of Geographical Sciences, professor, academician of the Russian Academy of Sciences (Mountain Geophysical Institute, Nalchik); A.G. Hramtsov, Dr. Technical Sciences, Professor, academician of the Russian Academy of Sciences; Y.Y. Balega, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, academician of the Russian Academy of Sciences (SAO RAS, p. Lower Arhiz); S.V. Ryazantsev, Dr. of Economic Sciences, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (ISPR RAS, Moscow); V.S. Tikunov, Doctor of Geographical Sciences, professor (Lomonosov Moscow State University, Moscow); S. Pestrak, Professor (Institute Jean Lamour, Measurement and electronic architectures group, Nancy, France)
Editorial Board	M.T. Abshaev, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor (Mountain Geophysical Institute, Nalchik); A.A. Likhovid, Dr. of Geographical Sciences, professor; V.S. Belozеров, Dr. of Geographical Sciences, professor, editor in chief; T.P. Bondar', MD, professor; V.B. Borodulin, MD, Professor (Saratov State Medical University, Saratov); O.A. Butova, MD, professor; Gera-simenko T.I., Dr. of Geographical Sciences, Professor (Orenburg State University, Orenburg); Gridin V.A., Dr. of geological-mineralogical Sciences, Professor; L.I. Gubareva, Sc. D., Professor; T.I. Dzhandarova, Sc. D., Associate Professor; Y.I. Dikanskiy, Dr. of Physical and Mathemati-cal Sciences, professor; L.A. Dinevich, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Tel-Aviv University, Tel-Aviv); K.V. Erin, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor; A.I. Zhakin, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Southwest State University, Kursk); A.R. Zakinyan, candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor; A.O. Ivanov, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor (Yeltsin's Ural Federal Uni-versity); A.A. Kolyada, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor (Be-larusian State University, Minsk); S.A. Kunikin, Ph.D., Associate Professor; A.D. Lodygin, Dr. of Technical Sciences, associate professor; A.V. Lysenko, Dr. of Geographical Science, associate professor; I.N. Molodikova, Ph.D. (Central European University, Budapest); V.I. Naats, Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Professor; T.G. Nefeldova, Dr. of Geographical Sciences, Leading Researcher, Russian Academy of Sciences (IG RAS, Moscow); P.M. Polyan, Dr. of Geographical Sciences, Leading Researcher, Russian Academy of Sciences (IG RAS, Moscow); V.V. Razumov, Dr. of Geographical Sciences, Professor; L.D. Timchenko, Dr. of Veterinary Sci-ences, Professor; Tsaturyan L.D., MD, Professor (Stavropol State Med. University, Stavropol); N.I. Chervyakov, Dr. of Technical Sciences, professor; V.A. Shalnev, Dr. of Geographical Sci-ences, Professor; N.A. Shitova, Dr. of Geographical Sciences, Professor; A.S. Molahosseini, assistant professor, PH.D (Islamic Azad University, Kerman); H. Qdais, Ph.D in environmental engineering, professor (Jordan University of science and technology, Amman)
Certificate	ПИ № ФС77–52723 dated February 8th 2013.
The Index	The Journal is included in the DB «Russian index of the scientist quoting».
The journal	«Bulletin of the Stavropol state University» renamed in the journal «Science. Innovations. Technologies» due to renaming of the founder.
The journal	is recommended by the State Commission for Academic Degrees and Titles for publishing the dissertation research results
Adress Phone Site E-mail	355017 Stavropol, Pushkin street, 1 8 (8652) 33–07–32 www.ncfu.ru nit_ncfu@mail.ru
ISSN	2308–4758
©	FGAOU VO «North Caucasus Federal University», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ», № 1, 2019

№ 1, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

5

25.00.17 РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Стоянов Н.И., Воронин А.И.,
Шапошников Е.В.

Совершенствование технологии обработ-
ки высокоминерализованных вод на основе теории пла-
нирования экспериментов при тепловых методах повыше-
ния нефтеотдачи
Perfecting of technology of processing highly
mineralized waters on the basis theories of scheduling experi-
mentov at thermal methods of increase in oil recovery 7

Шарифов А.Р., Мардашов Д.В.

Изучение процесса вытеснения сверхвяз-
кой нефти из модели трещинной карбонатной породы угле-
водородными растворителями
Research the process of displacing heavy oil
by hydrocarbon solvents from a model of fractured carbonate core 19

25.00.23 ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

Лазарева А.А., Слаута А.А., Афонина Т.Е.

Мониторинг геосистем особо охраняемых
природных территорий в условиях антропогенной нагрузки
Monitoring geosystems of specially protected
natural territories in the conditions of anthropogenous load 35

Сигида С.И., Маркова М.Ю.,
Пурмак К.А.

Анализ ландшафтно-биотопического рас-
пределения популяций мелких млекопитающих Ставро-
польского края
Analysis of landscapes-biotopic distribution of
small mammals populations of the Stavropol territory. 47

25.00.24 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, ПОЛИТИЧЕСКАЯ И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

Шальнев В.А., Каторгин И.Ю.,
Юрин Д.В., Самокиш М.А.

История конструирования четвертичных
оледенений Западного Кавказа
The history of the construction of the quater-
nary glaciations of the Western Caucasus 65

Бадов А.Д.

Региональные особенности преступности
в России в 1990–2014 гг.
Regional peculiarities of crime in Russia 77

25.00.30 МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ, АГРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

Ватиашвили М.Р.

Состояние полей облачных систем и опас-
ных явлений погоды, развивающихся в регионе Централь-
ного Кавказа.
The review of the condition of cloud systems
fields and dangerous natural phenomena developing in the
Central Caucasus region 91

**Рыжков Р.Д., Аванесян К.С.,
Смирнова Л.Н., Закинян Р.Г.**

Двумерная модель тепловой конвекции сухого воздуха в атмосфере

To the two-dimensional model of heat convection of dry air in the atmosphere 117

**Набродова Е.Г., Шмигельский В.А.,
Сурнева О.Б., Яновская О.С.**

Исследование зависимости скорости распространения гравитационных волн в атмосфере от широты

To the dependence of speed spray distribution of gravitational waves in the atmosphere of latitude 131

Калов Х.М., Калов Р.Х

Активные воздействия на теплые туманы и инструментальное определение их эффективности

Active impacts on warm fogs and instrumental determination of their efficiency 145

**Федина А.А., Мкртчян А.С.,
Шевченко А.И., Шаталов Н.А.**

Поля возмущения давления, плотности и скорости при геострофическом состоянии атмосферы

Fields of perturbation of pressure, density and speeds at a geostrophic state of atmosphere 163

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

«Наука. Инновации. Технологии», № 1, 2019 г.

25.00.17
УДК 622.276

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ
И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Стоянов Н.И.,
Воронин А.И.,
Шапошников Е.В.**

Северо-Кавказский федеральный университет
г. Ставрополь, Россия,
flasherel@rambler.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ВЫСОКО- МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ВОД НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНОВ ПРИ ТЕПЛОВЫХ МЕТОДАХ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ

Введение:

Актуальность исследования обусловлена проблемой дефицита запасов пресных вод в ряде регионов России и промышленных центрах. Дефицит пресной воды во многих отраслях промышленности может быть восполнен за счет использования сточных вод, подвергнутых, предварительно, соответствующей обработке. В решении стратегических задач в сфере нефтегазового комплекса России по увеличению объемов добычи углеводородов особое место занимает такой глобальный сырьевой ресурс, как вода. В связи с этим, статья направлена на совершенствование методов подготовки питательной воды для парогенераторов, используемых для паротеплового воздействия на нефтяные пласты с целью повышения их коэффициента нефтеотдачи.

Материалы и методы:

В многообразии методов умягчения воды, как правило отдают предпочтение наиболее экономичным и безопасным с экологической точки зрения. Приводя в пример метод непрерывного многоступенчатого умягчения на основе технологии фильтров непрерывного действия (ФНД) Анализ методов и схем ионообменной обработки минерализованных вод показывает, что глубокое умягчение по методу Na – катионирования получило широкое развитие в силу следующих технологических преимуществ.

Результаты
и обсуждение:

Известны способы, когда требуется проведение нескольких повторных опытов для выбора основных наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на проведение эксперимента, отбрасывая ложные значения не поддающиеся систематизации, получают достоверный результат. Как правило для упрощения расчетных значений и числа изысканий выбирают метод априорной информации. Применение метода позволяет проводить ранжирование всех факторов. Избыточные значения сводятся к минимуму, недостаточные к максимуму по контрольным показателям.

Выводы:

Полученные экспериментальные данные по исследованию процесса регенерации с учетом влияния четырех определяющих факторов, а также выработанные в ходе их анализа рекомендации позволяют перейти к разработке новых эффективных схем установок ионообменной обработки воды. Материалы статьи представляют практическую ценность для нефтегазового комплекса России.

Ключевые слова:

умягчение высокоминерализованных вод, теплоэнергетика, интенсификация нефтеотдачи, планирование эксперимента.

Stoyanov N.I. Voronin A.I. Shaposhnikov E.V.

Perfecting of technology of processing highly mineralized waters on the basis theories of scheduling eksperimenov at thermal methods of increase in oil recovery

The relevance of a research is caused by a problem of deficiency of reserves of sweet waters in a number of regions of Russia and the industrial centers. The shortage of sweet water in many industries can be filled due to use of the sewage subjected, beforehand, to the corresponding processing. In the solution of strategic tasks in the sphere of an oil and gas complex of Russia of increase in volumes of extraction of hydrocarbons a specific place is held by such global raw resource as water. In this regard, article is directed to perfecting of methods of preparation of feedwater for the steam generators used for steam impact on oil layers for the purpose of increase in their coefficient of oil recovery.

Materials

and methods:

In variety of methods of water demineralizing, as a rule give preference to the most economic and safe from the ecological point of view. Citing as an example a method of the continuous multistage softening on fundamentals of technology of the filters of the continuous action (FCA) the Analysis of methods and schemes of ion-exchange processing of salt waters shows that deep softening by the Na method – cation exchange received broad development owing to the following technological advantages.

Results and discussion:

Ways when carrying out several repeated experiences for the choice of the major most significant factors affecting on carrying out an experiment is required are known, rejecting chance value not giving in systematizations, receive reliable result. As a rule, for simplification of calculated values and number of researches choose a method of the prior information. Application of a method allows to carry out ranging of all factors. Excess values are minimized, poor to a maximum on control indicators.

Conclusion:

The obtained experimental data on a research of a protests of regeneration taking into account influence of four defining factors and also the recommendations developed during their analysis to pass to development of new effective schemes of installations of ion-exchange water treatment

Keywords:

Materials of article are of practical value for an oil and gas complex of Russia. softening of highly mineralized waters, power system, oil recovery intensification, scheduling of an experiment.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях индустриализации общества, роста объемов промышленного производства, развития энергетики и повышения уровня комфортности среды обитания человека, проблемы водоснабжения населения и индустриальных центров приобретают все нарастающую остроту.

В настоящее время дефицит пресной воды ощущается в ряде экономических районов России, среди которых в первую очередь следует отметить такие как Дальний Восток, районы Крайнего Севера, Северный Кавказ.

Обеспечение доступных водных ресурсов одна из основных задач по стабилизации экономического развития страны. Повышение уровня социаль-

ного благополучия не может происходить без развития современных энергоёмких и общедоступных технологий.

Получение горячей воды или пара из высокоминерализованных вод происходит в условиях пересыщения нагреваемой воды по накипеобразователям и растворенным газам. Нестабильная вода может давать отложения не только в зоне подогрева, но и в трубопроводах подачи теплоносителя и теплоиспользующем оборудовании.

Разработка эффективных схем теплоэнергетических установок для получения пара и обессоленной воды из высокоминерализованных природных и сточных вод стала жизненной необходимостью как для теплоэнергетики, так и для большинства промышленных предприятий.

Анализ состояния вопросов приготовления горячей воды и пара, а также уровня технических разработок в области новых способов обессоливания природных высокоминерализованных вод [1, 2] показывает, что наиболее целесообразным решением вопроса приготовления теплоносителей для закачки в нефтяные пласты является разработка новых схем получения горячей высокоминерализованной воды.

Рассматривая методы опреснения, осуществляемые дистилляцией, обратным осмосом, электродиализом, химическим вымораживанием и химическим обессоливанием, сущность которых сводится к полному удалению растворенных солей, а также методы умягчения, заключающиеся в удалении отдельных (накипеобразующих компонентов), следует отметить, что все они сопряжены с высокими энергетическими затратами и стоимостью энергетического оборудования.

Обширный опыт, накопленный в области технологии ионного обмена, подтверждает принципиальную возможность глубокого умягчения высокоминерализованных вод методом натрий-катионирования и обеспечения безнакипного режима работы испарителей и парогенераторов среднего и высокого давления при питании их умягченной высокоминерализованной водой [7, 24–28, 89, 90]. Последнее может быть реализовано в условиях многоступенчатого умягчения и регенерации фильтров большим количеством регенерационного раствора с малой исходной жесткостью (2–3 мг-экв/л) расход которого пропорционален увеличению жесткости исходной воды. В тоже время необходимо отметить, что с ростом солесодержания исходной воды использование метода в рамках существующих схем приводит к снижению его эффективности. Последнее объясняется увеличением затрат на реагенты и ростом объемов сбросных вод, утилизация которых проблематична.

Однако, установки ионообменного умягчения выгодно отличаются от теплоиспользующего опреснительного оборудования, так как имеют ряд несомненных преимуществ. Для ионитных установок характерными отличиями являются: меньшая металлоемкость; высокая маневренность, позволяющая быстро менять производительность; меньшие капитальные затраты; возмож-

ность работы при пониженных параметрах. Следовательно, для реализации преимуществ метода необходимо дальнейшее совершенствование существующих схем и разработка новых эффективных технологий.

Обзор экспериментальных и теоретических работ в области водоподготовки подтверждает принципиальную возможность непосредственного питания различных типов теплогенераторов глубоко умягчённой высокоминерализованной водой [3, 4, 5].

При этом, в качестве основных вариантов их использования можно выделить следующие направления: приготовление питательной воды для водогрейных и паровых котлов, используемых при паротепловой обработке нефтяных пластов с целью повышения их коэффициента нефтеотдачи, водоподготовка для паровых и водогрейных котлов производственных и муниципальных котельных, а также технологические процессы химических и металлургических предприятий.

Теплогенераторы и все их конструктивные элементы, контактирующие с жидкой или газообразной средой теплоносителя, которая в рассматриваемом случае является агрессивной, за счет высокого содержания солей исходной воды. В том числе возникновение солевых отложений на поверхностях нагрева.

В настоящее время разработан ряд способов обработки минерализованных вод [6], включающих глубокое умягчение воды путем ее катионообменной обработки и регенерацией истощенного катионита продувочной водой парогенераторов.

Существенным преимуществом является:

- а) уменьшение расхода реагентов.
- б) снижение стоимости и себестоимости электроэнергии.
- в) увеличение срока службы оборудования.
- г) снижение затрат при плановом и капитальном ремонте.

Устройства для получения пара используют пресную низкоминерализованную воду, показатель жесткости которой не превышает 10 мг на 1 литр эквивалента, соответственно для использования утилизируемой воды необходимо произвести ее деминерализацию до значений, допускающих использование этой воды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В многообразии методов умягчения воды, как правило отдают предпочтение наиболее экономичным и безопасным с экологической точки зрения. Приводя в пример метод непрерывного многоступенчатого умягчения на основе технологии фильтров непрерывного действия (ФНД) с неподвижным слоем ионита достигаются удовлетворительные результаты [7]. Они обеспечивают более полное использование регенерационного раствора за счет применения ступенчато-противоточной схемы регенерации, а также

полное «срабатывание» располагаемой рабочей емкости поглощения ионита в цепи нескольких последовательно включенных фильтров, работающих в режиме полного истощения. В стандартных схемах водоподготовки фильтры периодического действия работают до так называемого «проскока жесткости», используя лишь часть располагаемой емкости катионита.

Анализ методов и схем ионообменной обработки минерализованных вод показывает, что глубокое умягчение по методу Na – катионирования получило широкое развитие в силу следующих технологических преимуществ:

- использование для регенерации фильтров наиболее дешевого реагента (раствора NaCl) и широко распространенных ионообменных материалов (преимущественно КУ-2 и сульфогля);
- удаление из исходного раствора лишь части ионов (Ca^{2+} и Mg^{2+}), являющихся накипеобразующими ионами жесткости;
- возможность использования для регенерации фильтров продувочного раствора испарителей, различных выпарных установок, парогенераторов, работающих на умягченной минерализованной воде.

Опыт практического применения методов натрий-катионирования в установках ионообменной обработки минерализованных вод показывает, что технологические показатели, а, следовательно, и технико-экономические характеристики установок этого типа находятся в сложной зависимости от составов исходной воды и режимных факторов регенерации.

Решающее значение среди них принадлежит таким как: удельный расход реагента; концентрация регенерационного раствора; скорость пропускания регенерационного раствора; состав истощенного катионита перед регенерацией, определяемый составом исходной воды. Основываясь на литературных данных, эта зависимость может быть выявлена лишь для отдельных факторов в определенном диапазоне их изменения, что затрудняет выбор схемы и расчет оптимального режима установок для различных составов исходной питательной воды.

Между тем, состав исходной воды, оказывающий, как отмечалось выше, наиболее сильное влияние на технологические показатели процесса, может меняться в очень широких пределах. Следовательно, совершенствование метода натрий – катионирования высокоминерализованных вод должно идти, очевидно, по пути обобщенно имеющихся данных на базе дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

Ввиду недостаточной разработанности теории динамики ионного обмена при высоких концентрациях рядом авторов предложены расчетные зависимости основных показателей процесса, полученные на основе обобщения результатов экспериментальных лабораторных и промышленных исследова-

дований. Эти работы подтверждают возможность глубокого умягчения высокоминерализованных вод, а предлагаемые методы расчета позволяют определять основные технологические показатели работы установок для исследованного состава вод.

Однако, отмечая ценность накопленного опыта, следует отметить, что особенности сорбционной технологии при высоких концентрациях не позволяют распространить полученные данные за рамки проведенных исследований, а имеющиеся литературные данные не охватывают всего разнообразия составов высокоминерализованных природных и сточных вод. Из этого следует вывод о необходимости обобщения имеющихся литературных и новых экспериментальных данных на базе дальнейших теоретических исследований.

Техническому решению поставленной задачи препятствует сложность организации и проведения многофакторных экспериментальных лабораторных исследований по технологии умягчения высокоминерализованных вод в широком спектре их начальных концентраций. К тому же, их проведение требует значительных материальных затрат, связанных с закупкой высокотехнологичного оборудования и химических реагентов, а также времени на их проведение.

Каждый дополнительный фактор, включённый в программу исследований, приводит к значительному увеличению объёма экспериментальной работы. Например, при проведении полнофакторного эксперимента типа 2^n увеличение числа факторов на единицу ведёт за собой удвоение числа опытов:

- при $n = 5$; $N = 2^5 = 32$ опыта;
- при $n = 6$; $N = 2^6 = 64$ опыта.

Очевидно, что для сокращения объёма экспериментальной части желательно иметь как можно меньшее число исследуемых факторов.

Однако, надо помнить и о том, что эксперименты могут потерять всякий смысл при исключении из программы исследований хотя бы одного фактора, оказывающего существенное влияние на целевую функцию.

То есть, сокращать программу экспериментов можно только за счёт исключения несущественных факторов. Для исключения, или отсеивания, факторов, не оказывающих существенного влияния на целевую функцию, необходимо заранее знать, какие факторы процесса и их взаимодействия являются наиболее значительными.

На первых этапах изучения процесса при отсутствии данных о значимости отдельных факторов рекомендуется включать в программу предварительных исследований все факторы, которые могут оказать влияние на функцию оптимизации. Теория планирования эксперимента располагает способами, позволяющими выделять существенные факторы из общего числа факторов системы [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Известны способы, когда требуется проведение нескольких повторных опытов для выбора основных наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на проведение эксперимента, отбрасывая ложные значения не поддающиеся систематизации, получают достоверный результат. Как правило для упрощения расчетных значений и числа изысканий выбирают метод априорной информации.

Применение метода позволяет проводить ранжирование всех факторов. Избыточные значения сводятся к минимуму, недостаточные к максимуму по контрольным показателям.

Проведение методики в два этапа:

1. На основании литературных составляется перечень факторов, оказывающих влияние на исследуемый процесс, и устанавливаются области изменения каждого из них.
2. Специалистам, работающим в данной области, предлагают расположить факторы в ряд по степени влияния их на целевую функцию. При этом каждый специалист может дополнить список, если он, по его мнению, являлся не полным. При подборе специалистов руководствуются идеологией наличия среди них представителей возможно большего числа научных школ. По результатам опроса составляется матрица рангов. Обработку результатов опроса производят по общепринятым методикам [9].

Для каждого фактора определяется сумма рангов:

$$\sum_{i=1}^N a_{ji} \quad (1)$$

- где N – число опрошенных специалистов;
 a_{ji} – ранг j -го фактора, присвоенный i -м исследователем.

Вычисляется отклонение Δ суммы рангов от средней суммы рангов для каждого из факторов:

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^N a_{ji} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^N a_{ji}, \quad (2)$$

- где Δ_j – отклонение суммы рангов j -го фактора от средней суммы рангов;
 n – число факторов;
 $\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^N a_{ji}$ – средняя сумма рангов.

Определив значения Δ_j для каждого из факторов, производится оценка согласованности мнений опрошенных специалистов. Для этого вводится коэффициент координации мнений (W), который определяется по формуле:

$$W = \frac{12 \times S}{N^2(n^3 - n)} \quad (3)$$

где
$$S = \sum_{j=1}^n \Delta_j^2 \quad (4)$$

По результатам выполненных вычислений в качестве определяющих факторов принимают те из них, которые определяют общую технологичность и экономичность установки водоподготовки. Это, как правило, состав обрабатываемой воды, удельный расход реагентов, скорости регенерации ионита и умягчения обрабатываемой воды.

Разработанные в настоящее время математические модели планов 1-го, 2-го и высших порядков позволяют описать с высокой точностью исследуемый процесс в широком интервале изменения определяющих факторов при минимальном количестве постановочных экспериментов.

Полученная математическая модель исследуемого процесса в виде уравнения регрессии 2-го или 3-го порядка может быть несколько упрощена за счет обнуления коэффициентов уравнения, признанных статистически незначимыми по критерию Стюдента. Для практического использования полученного уравнения его следует проверить на адекватность исследуемому процессу по критерию Фишера и привести к инженерному виду, удобному для выполнения практических расчетов по определению технологических показателей установок умягчения высокоминерализованных вод.

По результатам анализа отдельные менее значимые члены уравнения были приняты равными нулю, а степень влияния других, более весомых, была усилена введением дополнительных членов уравнения. В итоге этих преобразований расчетное уравнение принимает вид:

$$\begin{aligned} n_p = & -1.5447 - 1.2304d_p + 0.006082d_p^2 + 0.7397 \cdot \frac{d_p^2}{d_p + 2} + 2.4715\sqrt{d_p} - 0.01094 \cdot W_p - 0.002894 \cdot \\ & \frac{1}{W_p - 0.4} + 0.1170 \frac{1}{d_p W_p} + 0.7130 \cdot \alpha_{ko} - 0.2793 \alpha_{ko}^2 - 0.08614 d_p \cdot \alpha_{ko} + \\ & + 0.004762 d_p^2 \cdot \alpha_{ko} + 0.1815 C_{pp} - 0.04278 \cdot C_{pp}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Средняя погрешность описания целевой функции по четырем факторам составляет 1,10 %.

Применив разработанную математическую модель на практике, авторами была составлена матрица центрального композиционного плана про-

ведения экспериментов. Рассмотрев фильтры с неподвижным слоем ионита, можно проанализировать, получаемые на выходе значения путем исследования зависимости и разности параметров до и после фильтра. Математическое моделирование процессов позволяет создавать полноценную модель и отслеживать все стадии очистки в фильтрующем слое. Решение уравнений, описывающих статику и динамику ионного обмена, может быть выполнено в относительных коэффициентах, результатом которых является:

Результатом, описывающим статику ионного обмена и динамику процесса, является:

- расчет равновесного состава катионита по заданному равновесному составу раствора;
- расчет равновесного состава раствора по заданному равновесному составу катионита;
- расчет рабочей обменной емкости поглощения катионита КУ-2-8 при натрий-катионитовом умягчении минерализованных вод;
- расчет высоты рабочего слоя ионита в рабочей колонне при умягчении минерализованных вод на катионите КУ-2-8.

Последнее имеет принципиальное значение для оптимизации габаритных размеров ионообменных фильтров в установке непрерывного умягчения. А габариты фильтра непрерывного действия (ФНД) напрямую определяют ее экономическую целесообразность и сроки окупаемости.

В стандартных ионообменных фильтрах периодического действия высота слоя катионита определяется технологическими условиями меж регенерационного периода работы, который составляет от 8 до 12 часов. При этом, фронт переменной концентрации в отрегенированном слое катионита непрерывно перемещается от верхней отметки слоя до нижней дренажной системы фильтра.

В фильтре непрерывного действия каждая ионообменная колонна находится в работе до полного истощения катионита, а проскок жесткости снижается в последующей ступени умягчения. А так как в режиме умягчения находятся одновременно 2 или 3 последовательно включенные колонны, то качество умягчения гарантированно высокое, а требуемый объем рабочей массы катионита сокращается 2–2,5 раза по сравнению с установками периодического действия.

Время работы катионита в каждой ионообменной колонне в режиме умягчения или регенерации сокращается до 1–2-х часов, что реально можно обеспечить только в автоматизированном режиме. На кафедре теплогазоснабжения и ЭН разработано гидравлическое устройство (многоходовой многопозиционный кран), обеспечивающее работу ФНД в непрерывном режиме без участия человека [9].

В современных условиях рыночной экономики реализация разработанной технологии и оборудования умягчения высокоминерализованных вод имеет реальные перспективы широкого внедрения не только северных нефтедобывающих районах страны, но и в ряде других регионов (прикаспийские районы и Крым), испытывающие дефицит в пресной воде.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных экспериментальных исследований эффективности процесса регенерации по четырем определяющим факторам и их анализ позволяют выработать практические рекомендации по совершенствованию процесса регенерации катионита КУ–2–8 при глубоком умягчении высокоминерализованных вод и, в частности, воды Черного моря.

Полученные экспериментальные данные по исследованию процесса регенерации с учетом влияния четырех определяющих факторов, а также выработанные в ходе их анализа рекомендации позволяют перейти к разработке новых эффективных схем установок ионообменной обработки воды.

По результатам выполненных исследований получено уравнение, описывающее целевую функцию в широком интервале изменения 4-х определяющих факторов: удельный расход соли на регенерацию; скорость ввода регенерационного раствора; солесодержание и жесткость умягчаемой воды; концентрация регенерационного раствора.

Полученные научные результаты позволяют выполнять технологические расчеты режимов умягчения высокоминерализованных вод и, в частности, воды Черного моря, а также выполнять конструкторские разработки блоков химводоочистки ТЭЦ и производственно-отопительных котельных.

Выполненные предварительные технико-экономические расчеты подтверждают экономическую эффективность планируемых научно-исследовательских и конструкторско-технологических работ в рамках поставленной исследовательской задачи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шищенко В.В., Седлов А.С., Федосеев Б.С. и др. Выбор оптимального метода водоподготовки для тепловых электростанций // Теплоэнергетика. 2005, №4. С. 54–60.
2. Шищенко В.В., Седлов А.С., Ильина И.П. и др. Опыт создания малоотходных систем водопользования на ТЭС // Теплоэнергетика. 2005, №4. С. 35–38.
3. Сень Л.И., Якубовский Ю. В. Парогенераторные установки на морской воде. Л.: Судостроение, 1979. 232 с.
4. Стоянов Н. И., Гейвандов И. А., Воронин А. И. и др. Совершенствование технологии получения питательной воды из

высокоминерализованных вод для нефтепромысловых парогенераторов // Нефтепромысловое дело. Ежемесячный научно-технический журнал. М.: ВНИИОЭНГ, 2005, №11. С. 61–63.

5. Стоянов Н.И., Дзюбина М.А. Разработка технологии утилизации сточных вод для объектов нефтегазового комплекса // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. г. Ставрополь: СКФУ, 2013, №2 (35) 282 с. (66–69).
6. Фейзи́ев Г. К. Высокоэффективные методы умягчения, опреснения и обессоливания воды. М.: Энергоатомиздат, 1988. 192 с.
7. Симонов П.П., Стоянов Н.И., Воронин А.И. Вопросы регулирования режима работы ФНД с неподвижным слоем ионита // Материалы XVIII конференции по итогам научно-исследовательской работы профессорско-преподавательского состава за 1988 г. Ставрополь: Изд. КМУ, СтПИ, 1989. С. 82–83.
8. Закгейм А. Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов. Математическое описание процессов. М.: Химия, 1973. 224 с.
9. Четыркин Е.М., Калихман И.Л. Вероятность и статистика. М.: Финансы и статистика, 1982. 319 с.
10. Воронин А.И. и др. Многоходовой многопозиционный кран преимущественно для установок ионообменной очистки воды (авторское свидетельство). А.С. № 1691314 Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий, заявка № 4670249 от 30.03.90; Оpubл. Бюл. № 42; 15.11.91. 6 с.

REFERENCES

1. Shishchenko V. V., Sedlov A. S., Fedoseyev B. S., etc. The choice of an optimum method of water treatment for thermal power plants, Thermal Engineering. – 2005, No. 4. Page 54–60.
2. Shishchenko V. V., Sedlov A. S., Ilyina I. P., etc. Experience of creation of low-waste systems of water use on thermal power plant, Thermal Engineering . 2005, No. 4. Page 35–38.
3. Shade L. I., Yakubovsky Yu. V. Steam generating installations on ocean water. L.: Shipbuilding, 1979. 232 pages.
4. Stoyanov N.I., Geyvandov I. A., Voronin A. I., etc. Perfecting of technology of receiving feedwater from highly mineralized waters for oil-field steam generators, Oilfield Engineering . Monthly scientific and technical magazine. M.: JSC VNIIOENG, 2005, No.11. Page 61–63.
5. Stoyanov N.I., Dzyubina M.A. Development of technology of utilization of sewage for objects of an oil and gas complex, Messenger of the North Caucasian federal university. Stavropol: SKFU, 2013, No. of 2 (35) 282 pages (66–69).
6. Feyziyev G.K. Highly effective methods of softening, desalting and desalting of water. M.: Energoatomizdat, 1988. 192 pages.
7. Simonov P. P., Stoyanov N.I., Voronin A.I. Questions of regulation of

a duty of FND with the fixed bed of an ionite // Materials of the XVIII conference following the results of research of the faculty for 1988 Stavropol. Prod. KMU, STPI, 1989. Page 82–83.

8. Zakgeym A. Yu. Introduction to model operation of chemical and technological processes. Mathematical description of processes. M.: Chemistry, 1973. 224 pages.
9. Chetyrkin E.M., Kalikhman I.L. Veroyatnost and statistics. M.: Finance and statistics, 1982. 319 pages.
10. Voronin A.I., etc. The multipass multiposition crane mainly for installations of ion-exchange water treatment (copyright certificate). Ampere-second. No. 1691314 the State committee of the USSR for inventions and opening, application No. 4670249 of 30.03.90; Opubl. Bulletin No. 42; 15.11.91. 6 pages.

**Рукопись поступила в редакцию 17.01.19,
принята к публикации 01.02.19**

Сведения об авторах

Стоянов Николай Иванович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и экспертизы недвижимости, инженерный институт, контакты (cnjzyjd1949@mail.ru, +79054113415).

Воронин Александр Ильич, к.т.н., доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и экспертизы недвижимости, инженерный институт контакты (cnjzyjd1949@mail.ru, +79054113415).

Шапошников Евгений Владимирович, ассистент кафедры теплогазоснабжения и экспертизы недвижимости, инженерный институт контакты (flasherel@rambler.ru, +79614459665).

About the authors

Stoyanov Nikolay Ivanovich, Dr.Sci.Tech., professor, head of the department of heatgas supply and examination of the real estate, engineering institute, contacts (cnjzyjd1949@mail.ru, 79054113415).

Voronin Alexander Ilyich, PhD in Technological Sciences, associate professor, associate professor of heatgas supply and examination of the real estate, engineering institute contacts (cnjzyjd1949@mail.ru, 79054113415).

Shaposhnikov Evgeny Vladimirovich, assistant to department of heatgas supply and examination of the real estate, engineering institute contacts (flasherel@rambler.ru, 79614459665).

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ», № 1, 2019

25.00.17
УДК 622.276.6

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ
И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Шарифов А.Р.,
Мардашов Д.В.**

Санкт-Петербургский горный университет,
Санкт-Петербург, Россия

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ВЫТЕСНЕНИЯ СВЕРХВЯЗКОЙ НЕФТИ ИЗ МОДЕЛИ ТРЕЩИННОЙ КАРБОНАТНОЙ ПОРОДЫ УГЛЕВОДОРОДНЫМИ РАСТВОРИТЕЛЯМИ

Введение:

ввиду невысокой скорости реакции растворителей с нефтью при пластовой температуре, их закачку необходимо комбинировать с применением теплоносителей. Очередность закачки растворителя и теплоносителя зависит от геолого-физических свойств изучаемого объекта. В данной работе изучен механизм интенсификации добычи сверхвязкой нефти из карбонатной породы с единичной трещиной закачкой углеводородных растворителей при различных температурах и расходах.

Материалы
и методы:

Проведены реологические исследования с дозированием различных растворителей. В качестве объекта исследований использованы образцы устьевых проб сверхвязкой нефти и карбонатный керн одного из месторождений Самарской области. Для изучения влияния температуры и расхода закачиваемого углеводородного растворителя, керны перед началом фильтрационных исследований были распилены пополам с целью моделирования продольной трещины. В качестве рассматриваемых растворителей использовались как химические композиции, так и индивидуальные вещества.

Результаты
исследований:

получены зависимости динамической вязкости нефти от типа и концентрации растворителя для температур 20–70 °С. Экспериментально определены зависимости коэффициента вытеснения нефти от температуры и расхода закачиваемого растворителя для модели породы-пласта с единичной трещиной. Проведены расчеты, отражающие механизм добычи нефти (диффузионный/конвективный), при закачке растворителя. Аналитически рассчитана глубина проникновения растворителя в матрицу пласта в зависимости от времени выдержки растворителя и температуры пласта.

Обсуждение
и заключение:

на основе аналитических расчетов обоснована низкая эффективность закачки растворителей при пластовой температуре из-за необходимости продолжительного времени выдержки на диффузионный обмен. Для условий изучаемого объекта предложена методика закачки растворителя и его состав.

Ключевые слова:

нефть сверхвязкая; растворители углеводородные; диффузия; реология нефти; интенсификация притока.

Sharifov A.R.
Mardashov D.V.St. Petersburg mining University,
St. Petersburg, Russia

Research the process of displacing heavy oil by hydrocarbon solvents from a model of fractured carbonate core

- Introduction:** due to the low rate of solvents reaction with heavy oil at the reservoir temperature, solvent injection must be combined with thermal fluids. Solvent and thermal fluids injection order depends on reservoir geological and physical properties. The mechanism of heavy oil intensification from carbonate rock with single fracture by injection of solvents at various temperature and rate has been studied in this paper.
- Materials and methods:** The rheological property of the heavy oil with solvents has been studied. Heavy oil samples and carbonate core of one field from Samara Region used as an object of research. For simulate longitudinal fracture the core has been cut before filtration experiments. Chemical compositions and individual substances were used as solvents.
- Results:** The dependences of the heavy oil dynamic viscosity on the type and concentration of solvent for temperatures 20–70 °C has been defined. The dependences of the oil recovery factor on the system temperature and injected solvent flow rate for model of carbonate rock with single fracture has been experimentally determined. The mechanism of oil production (diffusion/convective) during solvent injection has been calculated. Analytically calculated solvent penetration depth into the matrix depending on the time and the temperature of the core.
- Discussion and conclusion:** on the basis of analytical calculations, the low efficiency of solvent injection at reservoir temperature has been justified due to the need long time for diffusion exchange. For the studied reservoir properties method for solvent injection and its composition have been proposed.
- Keywords:** heavy oil, solvents, diffusion, oil rheology, oil production intensification.

Введение

Одним из наиболее широко применяемых методов интенсификации добычи сверхвязкой нефти (с динамической вязкостью в пластовых условиях более 200 мПа·с) является применение растворителей. Объектами воздействия растворителей являются скважина, призабойная зона или весь продуктивный пласт. В зависимости от объекта воздействия может происходить вымывание мелких частиц твердой фазы, разбавление нефти, растворение отложений тяжелых компонентов нефти и разрушение водонефтяных эмульсий. Методы, связанные с обработкой скважины, нацелены на уда-

ление органических отложений и эмульсий типа «вода в нефти» и дают кратковременный эффект. Для повышения эффективности обработок необходимо глубокое продавливание растворителя в призабойную зону пласта. Механизм интенсификации, в данном случае, основывается на взаимодействии закачиваемого агента с нефтью и ее разбавлении вдали от забоя скважины.

Основным недостатком растворителей является невысокая скорость реакции с нефтью. Численным показателем скорости реакции является коэффициент диффузии. Для повышения скорости реакции растворители используют в комплексе с термическими методами добычи нефти: закачивают перед или после теплоносителя, либо дозируют непосредственно в него. При дозировании растворителя в пар или горячую воду он служит дополнительным источником снижения вязкости нефти. В таком случае, необходимо особое внимание уделять процессу подбора растворителя при его дозировании в пар: для предотвращения преждевременной конденсации веществ их температуры парообразования и конденсации должны быть схожи.

После теплового воздействия происходит изменение компонентного состава добываемой нефти в сторону увеличения содержания тяжелых компонентов. С увеличением температуры увеличивается молекулярный вес остаточных углеводородов в пласте. Наиболее тяжелые компоненты сосредотачиваются в призабойной зоне пласта (ПЗП), в результате, их растворение сопровождается чередой осложнений от невозможности подбора химических композиций до их транспортирования на забой.

При закачке растворителя перед теплоносителем, за счет разбавления нефти и растворения тяжелых компонентов, снижается градиент давления закачки последнего. Как уже было сказано ранее, в таком случае процесс диффундирования занимает продолжительное время. Для ускорения данного процесса используют газообразные предельные углеводороды [1], в результате чего происходит осаждение асфальтенов в пласте. Во избежание отложений асфальтенов в состав растворителя должны быть включены высококипящие ароматические углеводороды. В таком случае, единственным способом ускорить процесс диффузии является предварительный прогрев пласта.

По мнению авторов работы, мало изучены процессы добычи сверхвязкой нефти из трещинно-поровых карбонатных коллекторов с применением растворителей. В частности, особый интерес представляет влияние технологических процессов закачки растворителя (расход, температура) на степень извлечения нефти. Основным механизмом добычи нефти из таких коллекторов является массоперенос между матрицей и трещиной.

С целью изучения процесса интенсификации притока из трещинного карбонатного пласта были поставлены следующие задачи:

1. Подобрать наиболее эффективный растворитель для условий залегания изучаемого объекта на основе реологических и физико-химических исследований.

2. Провести фильтрационные исследования на модели керна с продольной трещиной при разных расходах закачиваемого растворителя и температуре системы.
3. Предложить технологию закачки растворителя для условий залегания изучаемого объекта.

Материалы и методы исследований

Для исследований использовалась дегазированная, обезвоженная нефть одного из месторождений Самарской области. Зависимость коэффициента динамической вязкости нефти от температуры отражена на рисунке 1. Содержание асфальтенов, смол и парафинов в нефти – 12,4%, 9,4% и 4,7% соответственно.

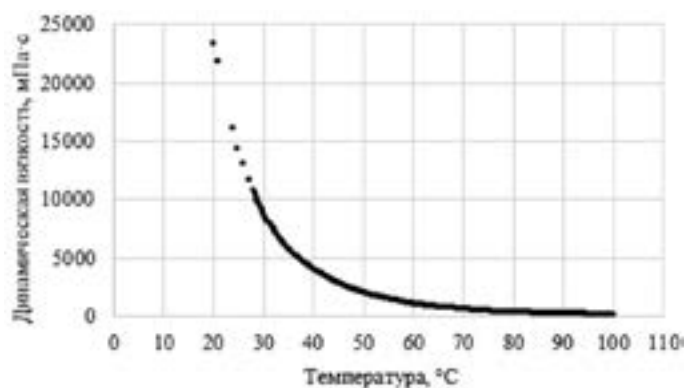


Рис. 1. Зависимость коэффициента динамической вязкости исследуемой нефти от температуры.

Fig. 1. The dependence of the studied oil dynamic viscosity coefficient from temperature.

В качестве изучаемых растворителей были использованы следующие химические композиции и индивидуальные вещества:

- алифатические углеводороды с температурой кипения 68 °C (гексан);
- смесь легких алифатических углеводородов с интервалом температуры кипения 70–100 °C (эфир петролейный);
- ароматические углеводороды с температурой кипения 144 °C (орто-ксилол);
- смесь углеводородов с интервалом температур кипения 150–250 °C (керосин ТС-1).

Эксперименты проводились на образце карбонатной породы, который предварительно был распилен на две равные части для моделирования трещины. Открытая пористость керна по гелию 25%, абсолютная проницаемость пористой части по гелию 0,5 мкм². Диаметр керна 3 см, длина была ограничена возможностью кернодержателя и равнялась 10 см. Проводимость трещины была рассчитана на основе определения ее геометрических размеров: ширина трещины 2,6 см; раскрытость трещины 0,1 см.

Пластовое давление изучаемого объекта составляет 8,5 МПа, начальная нефтенасыщенность кернов 100%; температура 28 °C.

Методика проведения реологических исследований

Значения коэффициента динамической вязкости нефти с добавлением растворителей определялись на ротационном вискозиметре Anton Paar MCR 102 с измерительной системой плита/плита (рис. 2).

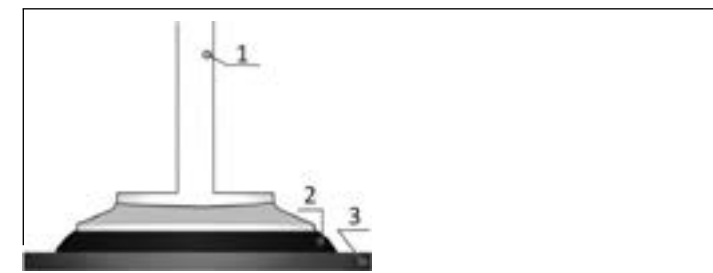


Рис. 2.

Модель измерительной системы:

- 1 – измерительная система;
- 2 – образец;
- 3 – нагреваемая плита.

Fig. 2. The model of the measuring system: 1 – measuring system; 2 – sample; 3 – heated plate.

Исследования проводились при скорости сдвига 3с-1, которая соответствует реально возможной линейной скорости фильтрации в трещине. Концентрация растворителя в составе нефти составляла 5; 10; 15; 20; 25 (30)%, соответственно. Для проведения реологических исследований изучаемый растворитель предварительно смешивался с нефтью в емкости из кварцевого стекла. Образцы разово приготавливались непосредственно перед проведением испытаний.

Методика по определению количества осажденных асфальтенов

Для уточнения минимальной допустимой концентрации ароматических углеводородов в составе растворителя были проведены ис-

следования по определению количества осажденных асфальтенов по стандарту ASTM D2042-97 [2]: 1 г нефти разбавлялся в 100 мл исследуемого растворителя с дальнейшей фильтрацией через фильтровальную бумагу. Далее фильтр помещался в печь для сушки на 24 часа при температуре 105 °С. Фильтр с остатком взвешивался и определялся процент осажденных асфальтенов по формуле:

$$A = \frac{M_{\text{ост.ф}} - M_{\text{ф}}}{M_{\text{н}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

$M_{\text{ост.ф}}$ — масса остатка с фильтром, г;
 $M_{\text{ф}}$ — фильтра, г;
 $M_{\text{н}}$ — начальная масса нефти, г.

Методика проведения фильтрационных исследований

1. Подготовка керна

Процесс подготовки керна был начат с проточного экстрагирования содержащихся флюидов керосином. Далее керн был распилен пополам, а для насыщения нефтью помещен в кернодержатель с созданием давления обжима 3 МПа. В промежутки между кернами предварительно была помещена резиновая прокладка для предотвращения прорыва нефти из трещины. Из-за высокой вязкости нефти температура термошкафа поддерживалась равной 50°C. После закачки 2 поровых объемов нефти при скорости фильтрации 0,5 мл/мин процесс насыщения прекращался, температура в системе снижалась до 28°C, а керны взвешивались и определялась их насыщенность нефтью. После определения нефтенасыщенности керны соединялись, а в промежутки между ними помещались металлические стержни толщиной 0,1 см таким образом, чтобы собранная система моделировала процесс добычи нефти из матричной системы с единичной трещиной.

2. Закачка растворителя

Фильтрационные исследования проводились на установке, оснащённой насосом (1), накопителями для нефти (2) и растворителя (3), кернодержателем (4), системой противодавления (5), градуированной мерной ёмкостью (6) и обратным клапаном (7) (рис. 3). Элементы установки №№2, 3, 4, и 7 были помещены в термошкаф для обеспечения постоянной заданной температуры.

Закачка растворителя велась в режиме постоянного расхода. Объем закаченного растворителя составлял 500 мл, что соответствовало 7 поровым объемам. Такое количество закачиваемого растворителя обусловлено необходимостью моделирования призабойной зоны пласта, через которую фильтруется вся масса реагента. Для определения доли нефти в выходной продукции

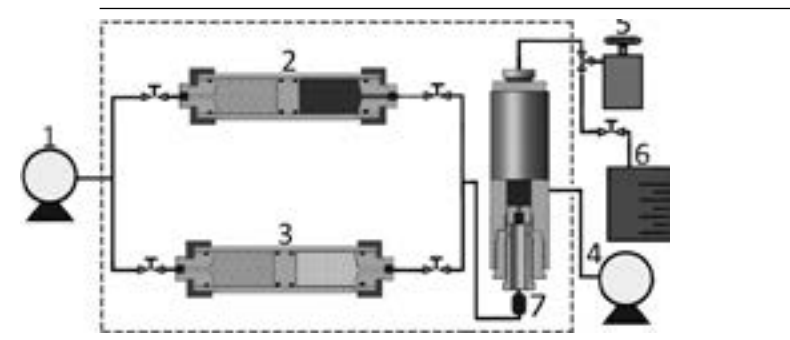


Рис. 3.

Схема фильтрационной установки.

Fig. 3. Filtration equipment scheme.

определялась плотность полученной смеси и сопоставлялась с заранее определенными значениями при известных концентрациях растворителя. Во избежание гравитационного вытеснения нефти, кернодержатель располагался вертикально, направление фильтрации снизу-вверх. Давление обжима соответствовало 10 МПа, а противодавление в системе – 8,5 МПа.

Результаты исследований и их обсуждение

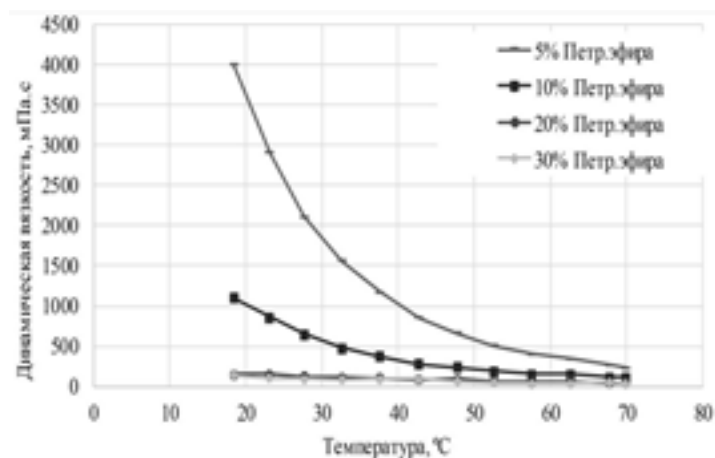
Первым этапом исследований было изучение влияния типа углеводородного растворителя на степень снижения вязкости нефти. В исследованиях использовались растворители алифатического ряда (гексан, петролейный эфир фракции 70–100) и ароматические углеводороды (о-ксилол).

Было установлено, что при температурах 20–28 °С вязкость нефти с добавлением петролейного эфира, представляющего собой смесь алифатических углеводородов, ниже, чем при в смесях с однокомпонентными растворителями. С увеличением температуры нет значительной разности в вязкости нефти при разбавлении ее различными по типу растворителями (см. рис. 4). При добавлении гексана и петролейного эфира в концентрации свыше 15% наблюдалось повышение значений динамической вязкости смеси. Это косвенно свидетельствует об осаждении тяжелых компонентов из нефти, влияющих на ее вязкость.

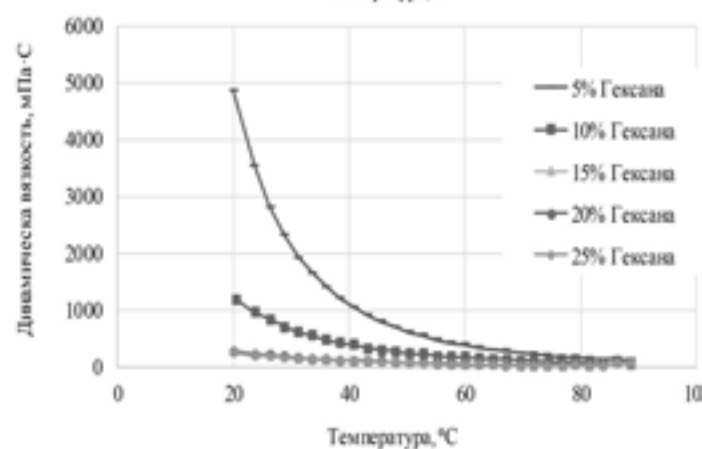
По результатам исследований по определению количества осажденных асфальтенов было установлено, что минимально допустимая доля ароматических углеводородов в составе комплексного растворителя для изучаемой нефти составляет 20%. При уменьшении концентрации о-ксилола наблюдается скачкообразное увеличение осадка (см. рис. 5).

Среди растворителей, нашедших широкую промышленную применимость, можно использовать керосин марки ТС-1, с содержанием ароматичес-

а



б



в

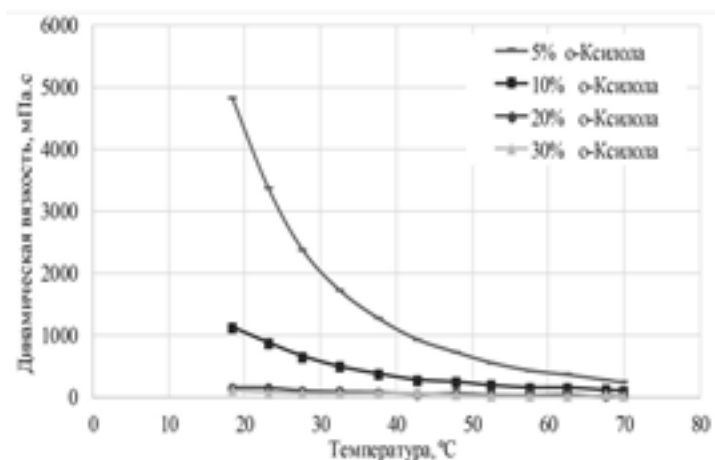


Рис. 4.

Результаты определения вязкости нефти при дозировании растворителей в температурном диапазоне 20–70 °С.

Fig. 4. Results of oil viscosity with solvent determining in the temperature range of 20–70 °С.

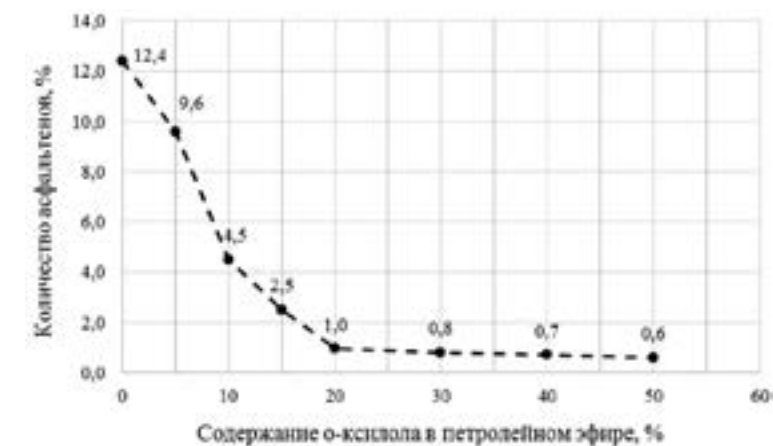


Рис. 5.

Зависимость количества осажженных от содержания о-ксилола в составе петролейного эфира.

Fig. 5. The dependence of the asphaltene precipitate amount and xylene content in the petroleum ether composition.

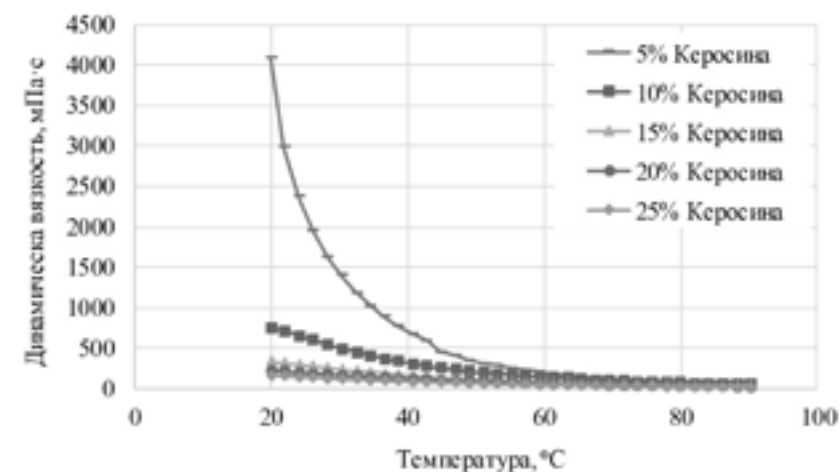


Рис. 6.

Зависимость вязкости нефти от содержания керосина марки ТС-1.

Fig. 6 The dependence of oil viscosity from kerosene content.

ких углеводородов в составе не более 22%. Зависимость вязкости нефти от температуры при различной концентрации керосина показана на рисунке 6.

На рисунке 7 представлены результаты определения коэффициента вытеснения нефти из керна с продольной трещиной при температурах в системе 28, 50, 75 и 100 °С и расходах керосина 0,25; 0,5, 1 и 5 мл/мин в разные моменты времени.

Как видно из рисунков при увеличении расхода керосина наблюдается уменьшение коэффициента вытеснения нефти при одинаковых объемах за-

Таблица 1. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФфуЗИИ
Table 1. Calculation results of diffusion constant

Температура, °С	Молекулярная масса нефти, г/моль	Вязкость керосина, мПа·с	Мольный объем растворителя, мл/моль [6]	Коэффициент диффузии, см²/с
28	151,2	1,3	515.2	$4,94 \cdot 10^{-6}$
50		1,04	521	$6,8 \cdot 10^{-6}$
75		0,74	527.8	$9,89 \cdot 10^{-6}$
100		0,545	534.7	$1,44 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2. ЗНАЧЕНИЯ ЧИСЛА ПЕКЛЕ ПРИ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И СКОРОСТЯХ ФИЛЬТРАЦИИ
Table 2. Peclet number values at different temperatures and filtration rates

Температура, °С	Объемный расход, мл/мин	Число Пекле
28	0,25	11,9
	0,5	23,9
	1	47,7
	5	238,7
50	0,25	8,6
	0,5	17,2
	1	34,4
	5	171,9
75	0,25	6,0
	0,5	11,9
	1	23,8
	5	119,2
100	0,25	4,1
	0,5	8,2
	1	16,4
	5	82,1

качки растворителя. При увеличении объемов закаченного растворителя конечный коэффициент вытеснения нефти растёт. Это связано с тем, что при увеличении скорости также увеличивается глубина проникновения керосина. В начальный момент времени коэффициент вытеснения заметно выше с уменьшением расхода закачиваемого растворителя, что связано со спецификой проведения эксперимента: из-за наличия системы противоаварийной

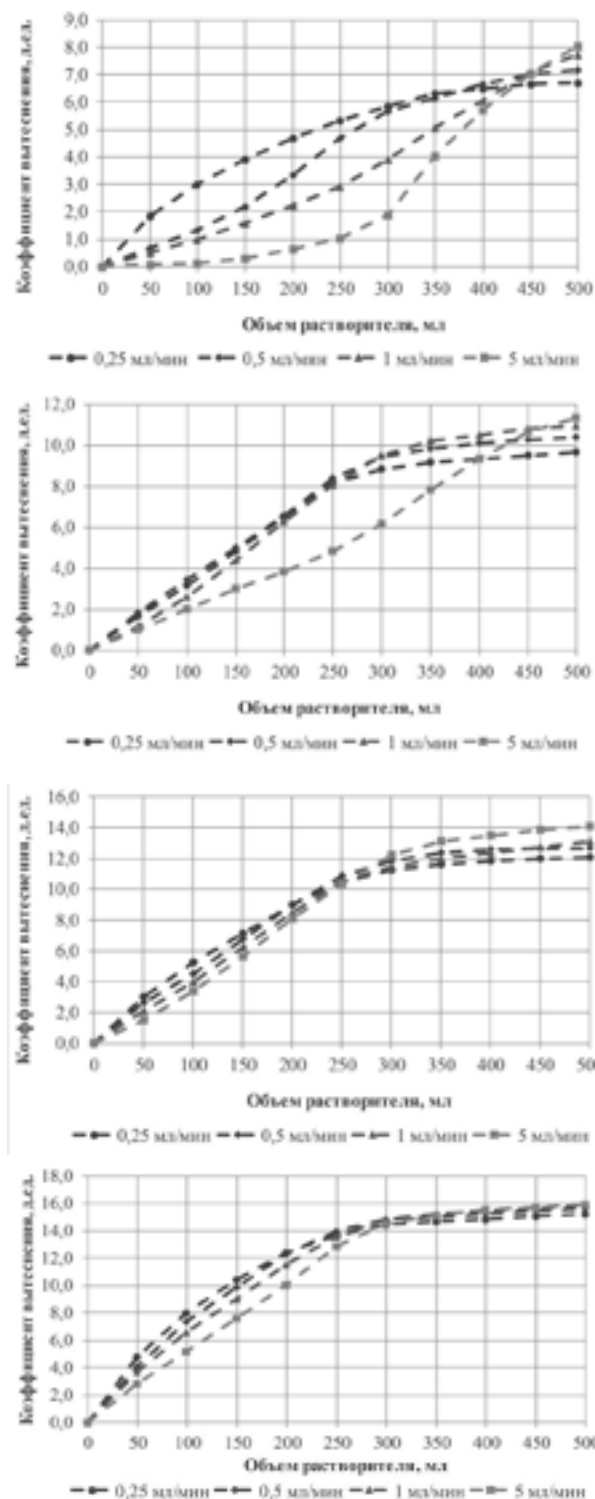


Рис. 7. Зависимости коэффициента вытеснения нефти от объема закаченного растворителя при разных расходах: а – температура 28 °С; б – температура 50 °С; в – температура 75 °С; г – температура 100 °С.

Fig. 7. Dependence of oil displacement from injected solvent volume at different rates: а – temperature 28 °С; б – temperature 50 °С; в – temperature 75 °С; г – temperature 100 °С.

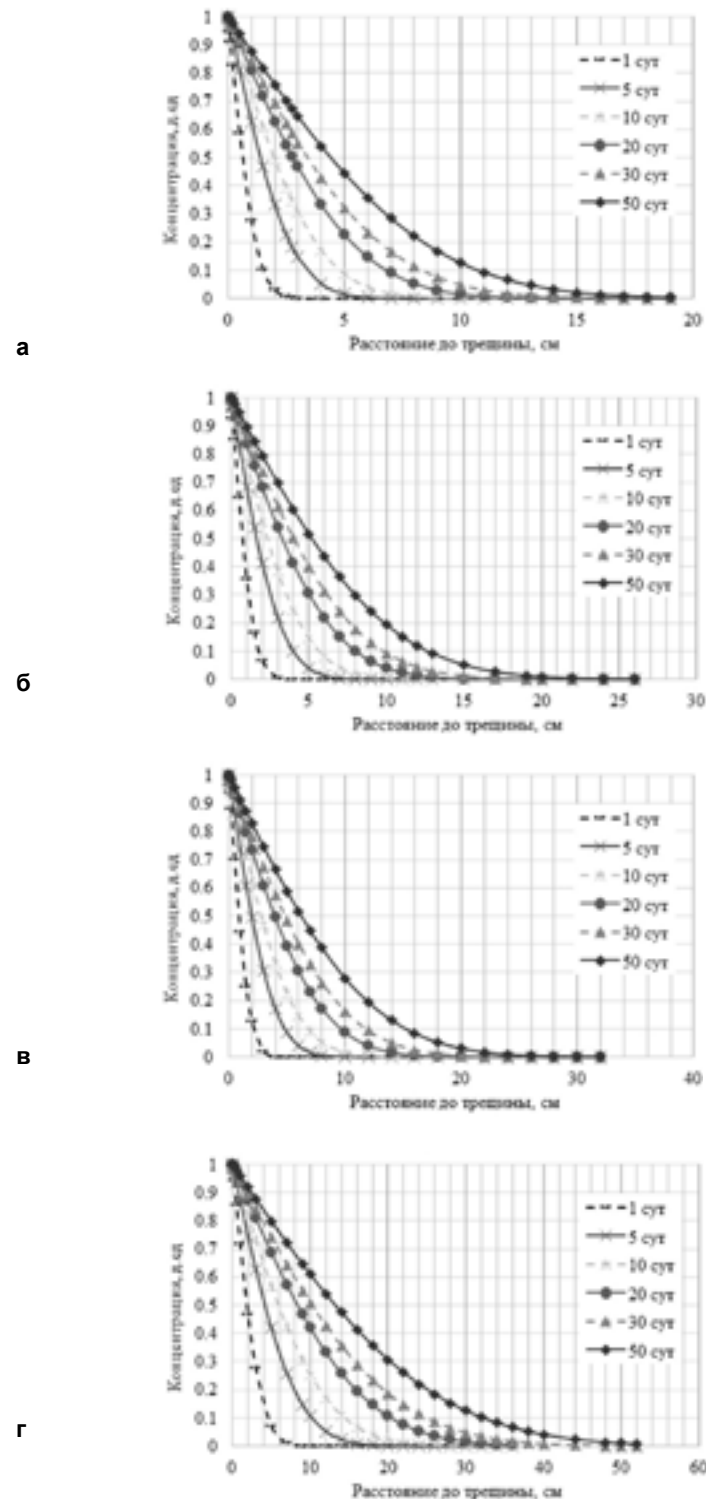


Рис. 8. Распределение концентрации растворителя в зависимости от расстояния до трещины:

а – температура 28 °С; б – температура 50 °С; в – температура 75 °С; г – температура 100 °С

Fig. 8. Depending of the distribution solvent concentration from distance to the fracture: а – temperature 28 °С; б – temperature 50 °С; в – temperature 75 °С; г – temperature 100 °С

буется больше времени для достижения давления прорыва при малых расходах, в результате чего растворитель находится в контакте с керном дольше.

При повышении температуры в кернодержателе также увеличивается коэффициент вытеснения нефти: при повышении температуры с 28 до 50 °С в среднем на 1,4%; до 75 °С – на 3,7%; до 100 °С – на 6,8%, соответственно.

С увеличением расхода закачиваемого растворителя изменяется характер вытеснения нефти: при расходе 0,25 мл/мин наблюдается равномерное вытеснение нефти под воздействием диффузионных сил. При повышении скорости закачки преобладает конвективный характер вытеснения нефти растворителем. Численным показателем, отражающим характер вытеснения, является критерий подобия Пекле [3]

$$N_{Pe} = \frac{v \cdot b}{m \cdot D} \quad (2)$$

v – линейная скорость фильтрации, м/с;

b – раскрытость трещины, м;

m – пористость, д.ед.;

D – коэффициент диффузии, м²/с.

При значении числа Пекле менее 1 можно учитывать только диффузионные силы при вытеснении нефти, а при значениях выше 1 пренебрежение конвективным механизмом ошибочно [4].

На основе уравнения Wilke-Chang [4], которое является модификацией уравнения Стокса-Эйнштейна можно определить коэффициент диффузии растворителя в нефть, однако в качестве растворимого вещества следует принять керосин, в качестве растворителя – нефть:

$$D = \frac{7,4 \cdot 10^{-8} \cdot M^{0,5} \cdot T}{\mu_n \cdot V^{0,6}} \quad (3)$$

D – коэффициент диффузии, см²/с;

M – молекулярная масса нефти, г/моль;

T – температура, К;

μ_n – вязкость нефти при температуре T , мПа·с;

V – мольный объем растворителя, мл/моль.

Молекулярную массу нефти можно найти из следующей корреляции [5]:

$$M_n = 140,5 + 53,7 \cdot \ln \mu_{nП} - 1,915 \cdot (\ln \mu_{nП})^2 \quad (4)$$

$\mu_{nП}$ – динамическая вязкость нефти при температуре пласта, мПа·с;

M_n – молекулярная масса нефти, г/моль.

На основе второго закона Фика можно определить концентрацию растворителя в зависимости от расстояния до трещины при различной температуре и времени выдержки [7]:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (5)$$

$C(x, t)$ – концентрация растворителя на расстоянии от трещины x в момент времени t после начала процесса диффузии, д. ед.

Решением уравнения (5) относительно концентрации растворителя C в зависимости от удаленности x от трещины является:

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot (Dt)^{0.5}} \right) \right) \quad (6)$$

Как видно из рисунка 10 область проникновения растворителя сильно зависит от температуры пласта и времени выдержки. К примеру, для достижения оптимальной концентрации 15% и глубины проникновения 10 см сроки диффузионного обмена составляют менее 10 суток для температуры 100 °С, а для пластовой температуры 28 °С – 50 суток. Таким образом можно определить необходимое время диффузионного обмена растворителя и сверхвязкой нефти в зависимости от температуры пласта.

С целью повышения эффективности применения растворителей для интенсификации добычи нефти необходимо вести его закачку с максимально возможным расходом и дальнейшей выдержкой на диффузионный обмен. Это позволит повысить глубину обработки в призабойной зоне пласта за счет конвективного механизма взаимодействия с нефтью, а для удаленной зоны пласта, в которой достичь высоких скоростей фильтрации невозможно – за счет диффузионных сил.

Выводы

1. Экспериментальным путем установлено, что расход закачиваемого в трещину карбонатной породы углеводородного растворителя влияет на коэффициент вытеснения сверхвязкой нефти. При малых скоростях закачки наблюдается процесс диффузионного вытеснения нефти, а при повешении расхода закачиваемого растворителя преобладает конвективный механизм вытеснения нефти. Данные механизмы были определены на основе экспериментальных исследований, а также косвенно – на основе уточнения числа Пекле.

2. При повышении расхода закачиваемого растворителя увеличивается коэффициент вытеснения нефти, что можно объяснить увеличением глубины его проникновения за счет конвективных сил. Конечный коэффициент вытеснения нефти соответствовал 8%, 11,5%, 14% и 16% при температурах 28, 50, 75 и 100°С.

3. Установлено, что холодная закачка растворителя в карбонатную породу трещинного типа малоэффективна и требует значительного количества времени для диффузионного обмена растворителя и нефти. К примеру, для достижения оптимальной концентрации 15% и глубины проникновения 10 см сроки диффузионного обмена составляют менее 10 суток для температуры 100 °С, а для пластовой температуры 28 °С – 50 суток. Таким образом можно определить необходимое время диффузионного обмена растворителя и сверхвязкой нефти в зависимости от температуры пласта.

4. Высокое пластовое давление изучаемого объекта ограничивает процесс парообразования растворителя, в результате нецелесообразно применение только дорогостоящих, легкокипящих алифатических растворителей.

5. Для изучаемого объекта предпочтительнее закачивать комплексные растворители, в составе которых должны быть ароматические углеводороды с концентрацией не менее 20%. Закачка только лёгких углеводородных растворителей алканового ряда может вызвать осаждение тяжелых углеводородов из нефти.

Библиографический список

1. Bayestehparvin B., Ali S.M.F., Abedi J. Solvent-Based and Solvent-Assisted Recovery Processes: State of the Art // SPE EOR Conf. Oil Gas West Asia. 2018. № 03. P. 1–21.
2. ASTM 2042. Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene; ASTM International, West Conshohocken, PA. 1997.
3. Cinar Y., Alhamdan M.R. Gravity drainage effects on compositional displacements in fractured reservoirs // SPE Middle East Oil Gas Show Conf. held Manama, Bahrain. 2015.
4. Cronin M., Emami-Meybodi H., Johns R.T. Diffusion-Dominated Proxy Model for Solvent Injection in Ultra-Tight Oil Reservoirs // SPE Improv. Oil Recover. Conf. 14-18 April. Tulsa, Oklahoma, USA. 2018.
5. Clossman P.J., Seba R.D. A correlation of viscosity and molecular weight // J. Can. Pet. Technol. 1990.
6. Алексеев С.Г. и др. Методы оценки взрывоопасности топливоздушных смесей на примере керосина марки РТ. IV. ГОСТ Р 12.3.047-98 // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21, № 6.
7. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. М.: Химия, 1993. 208 с.

References

1. Bayestehparvin B., Ali S.M.F., Abedi J. Solvent-Based and Solvent-Assisted Recovery Processes: State of the Art // SPE EOR Conf. Oil Gas West Asia. 2018. № 03. P. 1–21.

2. ASTM 2042. Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene; ASTM International, West Conshohocken, PA. 1997.

3. Cinar Y., Alhamdan M.R. Gravity drainage effects on compositional displacements in fractured reservoirs // SPE Middle East Oil Gas Show Conf. held Manama, Bahrain. 2015.

4. Cronin M., Emami-Meybodi H., Johns R.T. Diffusion-Dominated Proxy Model for Solvent Injection in Ultra-Tight Oil Reservoirs // SPE Improv. Oil Recover. Conf. 14-18 April. Tulsa, Oklahoma, USA. 2018.

5. Clossman P.J., Seba R.D. A correlation of viscosity and molecular weight // J. Can. Pet. Technol. 1990.

6. Alekseev S.G. i dr. Metody ocenki vzryvoopasnosti toplivovozdushnyx smesey na primere kerosina marki RT. IV. GOST R 12.3.047-98 // Pozharovzryvobezopasnost. 2012. t. 21, № 6 (in Russ).

7. Rudobashta S.P., Kartashov E.M. Diffuziya v ximiko-technologicheskix processax. M.: Ximiya, 1993. 208 p. (in Russ).

Рукопись попала в редакцию 12.01.19, принята к публикации 01.03.19

Об авторах

Шарифов Анар Рабилович, аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Санкт-Петербургского горного университета. ScopusID: 57200435965.
Email: anarshar@mail.ru.

Мардашов Дмитрий Владимирович, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Санкт-Петербургского горного университета. ScopusID: 55596392500.
Email: Mardashov_DV@pers.spmi.ru.

About the authors

Sharifov Anar Rabilovich, PhD student of the Department of development and operation of oil and gas fields Saint Petersburg mining university. ScopusID: 57200435965:
Email: anarshar@mail.ru

Mardashov Dmitry Vladimirovich Associate Professor of the Department of development and operation of oil and gas fields Saint Petersburg mining university. ScopusID: 55596392500.
Email: Mardashov_DV@pers.spmi.ru.

25.00.23
УДК 004.910.25:502.17

Лазарева А.А.
Слаута А.А.
Афонина Т.Е.

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ
И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

МОНИТОРИНГ ГЕОСИСТЕМ
ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ
ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ В УСЛОВИЯХ
АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

Введение: Состояние окружающей природной среды является актуальной проблемой настоящего времени. Особо охраняемые природные территории – основа территориальной охраны природной среды. Категория охраняемых территорий определяется законом №33-ФЗ «Об особо охраняемых природных территориях», каждая из которых имеет свои особенности природоохранной деятельности. В зависимости от статуса заповедных участков, определяется их режим использования. Несмотря на охранную деятельность, ценные природные комплексы подвергаются различному антропогенному воздействию. В связи с этим, возникает необходимость в систематическом отслеживании динамики состояния геосистем и объективной оценке негативных процессов. В данной статье рассмотрен комплексный мониторинг особо охраняемых природных территорий на примере Тункинского национального парка и центральной экологической зоны юго-восточного побережья оз. Байкал.

Материалы и методы исследования: Тункинский национальный парк расположен в юго-западной части Республики Бурятия, парк территориально был создан в административных границах Тункинского района. Как и Тункинскому национальному парку, побережью Байкала наносится непоправимый экологический ущерб: вырубается лес, загрязняются устья рек, побережье захламляется мусором, вытаптывается растительность и как следствие данных воздействий приводит к исчезновению редких видов растений. Комплексный мониторинг включает в себя сбор оперативной информации о состоянии геосистем, количественный и качественный учет за процессами антропогенного воздействия путем закладки пробных площадок и детального наблюдения за ними. Лесопожарный мониторинг заключается в сборе информации о лесных пожарах и о площади поврежденных насаждений для дальнейшего прогноза и оценки фактической горимости лесных геосистем. На гарях и вырубках изучается процесс естественного возобновления лесов. Оценка рекреационной нагрузки проводится на территориях популярных для туристов. В зоне антропогенного воздействия и других факторов оценивается лесопатологическое и санитарное состояния лесных геосистем.

Результаты исследования и их обсуждения: Анализ мониторинга лесных пожаров показал снижение их числа за последние 15 лет, однако, площадь погибших насаждений достигает максимальных значений. По данным обследования насаждений, пройденных огнем, восстановление не ожидается на большей территории пробных площадей. Ослабленные деревья в будущем подвержены заселению насекомыми-вредителями. Массовый летний приток неорганизованных отдыхающих приводит к превышению экологически допустимых норм, что приводит к критическому экологическому и санитарно-гигиеническому состоянию геосистем парка и юго-восточному побережью оз. Байкал. Возобновление лесов на территории парка отмечается на заброшенных сельхозземлях. Распределение самосева неравномерное, но жизнеспособное.

Выводы: За период регулярных наблюдений выявлено, что главной причиной гибели и ослабления геосистем национального парка «Тункинский» являются лесные пожары, а на юго-восточном побережье оз. Байкал - неконтролируемый туристический поток. Неблагоприятные погодные условия оказывают негативное воздействие на санитарное состояние лесных геосистем. Это относится к явлениям, которые носят катастрофический характер, таким как селевые потоки, наводнения, ветроваль. При отсутствии рубок ухода на обследованных пробных площадях прогнозируется ухудшение состояния лесных насаждений. В угнетенном состоянии находятся редкие виды растений, подвергавшиеся рекреационному воздействию на рассматриваемых территориях.

Ключевые слова: мониторинг лесов, национальный парк «Тункинский», антропогенные воздействия, геосистемы, особо охраняемые природные территории, лесные пожары, лесовозобновление, рекреационная нагрузка.

Lazareva A.A.
Slauta A.A.
Afonina T.E.

Irkutsk State Agrarian University. A.A. Ezhevsky,
Irkutsk, Russia
lazarewa.ali@yandex.ru

Monitoring geosystems of specially protected natural territories in the conditions of anthropogenous load

Introduction:

The state of the environment is an urgent problem of the present time. Specially protected natural areas are the basis of territorial protection of the natural environment. The category of protected areas is determined by the law "on specially protected natural areas", each of which has its own characteristics of environmental activities. Depending on the status of protected areas, their mode of use is determined, but despite this they are subjected to various anthropogenic impacts. In this regard, there is a need for systematic monitoring of the dynamics of the state of geosystems and objective assessment of negative processes. In this article the complex monitoring of especially protected natural territories on the example of Tunka national Park and the Central ecological zone of the South-East coast of oz is considered. Baikal.

Materials and methods of research:

Tunkinsky National Park is located in the South-Western part of the Republic of Buryatia, this Park was created geographically within the administrative boundaries of Tunka district. Like the Tunka national Park, the coast of lake Baikal suffers irreparable environmental damage: the forest is cut down, the mouths of rivers are polluted, the coast is littered with garbage, the vegetation is trampled down and as a result of these impacts leads to the disappearance of rare plant species. Comprehensive monitoring includes the collection of operational information on the state of geosystems, quantitative and qualitative accounting for the processes of anthropogenic impact by laying test sites and detailed observation of them. Forest fire monitoring is the collection of information on forest fires and the area of damaged plantations for further prediction and assessment of the actual burning of forest geosystems. The process of natural regeneration of forests is studied on the felling and felling. Assessment of recreational load is carried out on the territories popular for tourists. Forest pathology and sanitary conditions of forest geosystems are assessed in the zone of anthropogenic impact and other factors.

The results of the study and their discussion:

Analysis of monitoring of forest fires showed a decrease in their number over the past 15 years, but the area of dead plantations reaches maximum values. According to the survey of plantations covered by fire, recovery is not expected in a large area of test areas. Weakened trees are susceptible to future insect infestation. The massive summer influx of unorganized vacationers leads to the excess of environmentally acceptable standards, which leads to a critical ecological and sanitary condition of the Park's geosystems and the South-East coast of the lake. Baikal. The renewal of forests in the Park is noted on abandoned agricultural land. The distribution of self-seeding is uneven, but viable.

Findings:

During the period of regular observations revealed that the main cause of death and weakening of the geosystems of the national Park "Tunkinsky" – forest fires, and on the South-East coast of the lake. Baikal is an uncontrolled tourist flow. Adverse weather conditions have also had irreversible effects on the health of forest geosystems. This applies to phenomena that are catastrophic, such as mudflows, floods, windfalls. In the absence of thinning on the surveyed sample areas is predicted deterioration of forest plantations. In a depressed state, rare species of plants are exposed to recreational effects in the territories under consideration.

Keywords:

forest monitoring, Tunkinsky National Park, anthropogenic impacts, geosystems, specially protected natural territories, forest fires, forest pathological, reforestation, recreational load.

Введение

Особо охраняемые природные территории (далее ООПТ) являются важной формой сохранения ареала обитания редких видов растений и животных, многие из этих видов, особенно в последнее время, снижают свою численность и переходят в категорию редких и исчезающих [1]. Данный фактор в большинстве случаев является следствием естественных процессов в геосистемах, но чаще причиной служит воздействие антропогенных процессов: разрушение и трансформация мест обитания (лесные пожары, выруб-ка лесов, рекреационная нагрузка), различные формы загрязнения (выбросы в атмосферу и в водоемы вредных веществ). Поэтому создание новых ООПТ, рациональное функционирование существующих, позволит сохранять те заповедные участки, которые необходимы для поддержания экологического равновесия природной среды.

В границах Байкальской природной территории сеть ООПТ представлена тремя национальными парками, пятью заповедниками, 23-мя заказниками, 128-мью памятниками природы, лечебно-оздоровительными местностями и курортами и т.д.

В национальных парках, помимо заповедных и охраняемых территорий, существуют зоны рекреационного и хозяйственного назначения, где установлен щадящий режим природопользования. Указанные зоны территориально не закреплены, что в свою очередь накладывает негативный отпечаток на охраняемые природные комплексы. Детальное изучение антропогенных воздействий позволит вовремя предупредить их дальнейшее развитие.

Материалы и методы исследования

Тункинский национальный парк расположен в юго-западной части Республики Бурятия, в 40 км к западу от озера Байкал. Национальный парк является уникальным и единственным в России представителем ООПТ, так как границы парка совмещены с границами административного района. Юго-восточное побережье оз. Байкал находится в центральной экологической зоне Байкальской природной территории (далее БПТ). Охраняемые территории БПТ предусматривают особый щадящий режим природопользования. Таким образом, геосистемы ООПТ должны быть под постоянным контролем и изучением в местах антропогенного воздействия.

Мониторинг геосистем ООПТ, проводится нами с 2013 г. до настоящего времени и включает в себя:

1. Лесные пожары (воздействие огня на геосистемы).
2. Процесс лесовозобновления.
3. Рекреационная деятельность.
4. Лесопатологическое состояние.

В соответствии с Перечнем лесорастительных зон и Перечнем лесных районов РФ вся территория лесов Тункинского парка отнесена к Южно-Сибирской горной области, Алтае-Саянского горнотаежного лесного района. В лесных геосистемах преобладают насаждения кедра и лиственницы, занимающие, соответственно 25,5% и 52,8% от покрытых лесом земель; доля хвойных насаждений составляет 86,2%, мягколиственных 11,0%. Средний состав насаждений 5К3Л1С1Б+Ос,Е,П,Т [6].

Основу мониторинга состояния лесного фонда составляли статистические наблюдения, проводимые за изменением площадей пожаров с 1998 по 2017 год. Основу полевых исследований составили анализ техногенных воздействий, полученных в результате заложения контрольных площадей в период 2013-2017 гг.

Лесопатологическое и санитарное состояние насаждений на контрольных площадках определялась по общепринятым в лесозащите методами – путем перечета деревьев по породам, ступеням толщины и категориям состояния с выделением пораженных болезнями и с другими признаками повреждения [3].

Мониторинг рекреационных нагрузок проводили на ключевых площадках с наибольшим туристическим прессингом.

Результаты исследований и их обсуждение

Лесопожарный мониторинг за анализируемый период 2002-2017 гг. показал следующие результаты: общее количество пожаров составило 618, наибольшее количество возгораний зафиксировано в 2003 г. – 134, а минимальное отмечено в 2016 г. – 4 (рис. 1).

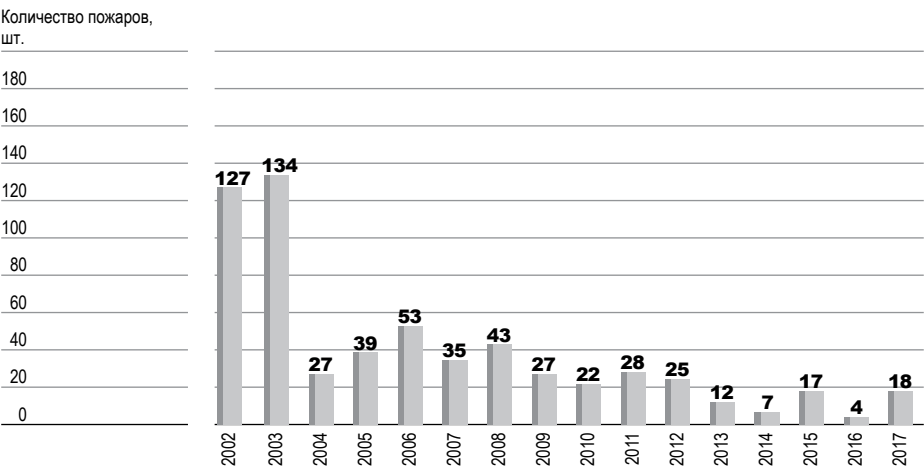


Рис. 1. Количество лесных пожаров (2002–2017 гг.).
Fig. 1. Number of forest fires (2002–2017).

Распределение площади погибших и поврежденных деревьев в результате пожаров представлено на рисунке 2.

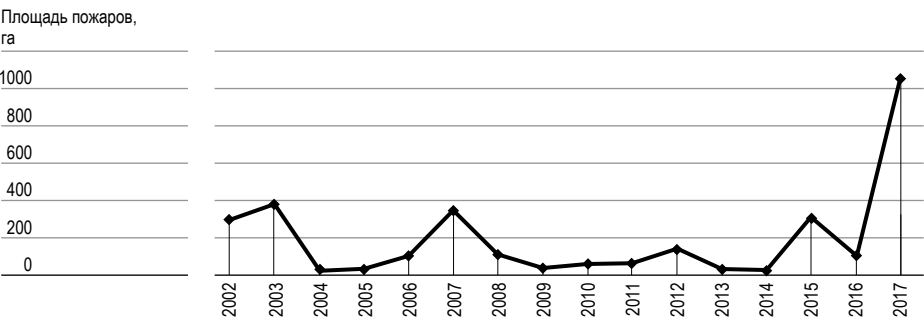


Рис. 2. Динамика погибших и поврежденных деревьев в результате пожаров (2002–2017 гг.).
Fig. 2. Dynamics of dead and damaged trees by fire (2002–2017).

Из полученных данных следует, что площадь погибших и поврежденных деревьев увеличивается, достигая максимума в 2017 г. более 1000 га.

Оценка влияния пожаров на состояния лесных насаждений проводилась на контрольных площадях в августе-сентябре 2015 и мае-августе 2016, 2017 года в разновозрастных сосняках Кыренского участкового лесничества, где огнем различной интенсивности были повреждены лесные насаждения (табл. 1).

Таблица 1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДРЕВОСТОЕВ НА ПРОБНОЙ ПЛОЩАДИ
Table 1. Brief description of stands on the plot

Номер пробной площади (квартала)	Средний диаметр деревьев	Количество деревьев на пробной площади	Протяженность сухобокости (подгара), м	Оценка состояния насаждений по категориям
1 (399)	30	256	11	6
2 (400)	28	869	0,9	3
3 (424)	20	334	2	3
4 (425)	31	220	8	4

Во всех выбранных кварталах состав насаждений – сосна с сопутствующими породами березы и лиственницы. В квартале 399 на пробной площадке №1 древостой подвергся частично верховому и низовому пожару. При осмотре была установлена высокая степень поражения древесины огнем на высоте ствола 11–15 м и падение части древесных стволов. При низовом пожаре в обследованных участках было отмечено выгорание древесины внутри ствола на высоту 3–6 м. Таким образом, возможность восстановления насаждений на пробных площадях №1–4 не ожидается. На пробных площадях № 2, 3 предложены такие мероприятия как санитарная рубка.

Для лесопатологического мониторинга проводились выборочные наземные наблюдения за санитарным состоянием лесных насаждений национального парка в зоне различных воздействий антропогенного характера. Задача данного наблюдения – это сбор и актуализация информации о санитарном состоянии (степень усыхания, загрязнения, захламления) и степени повреждения насаждений насекомыми-вредителями и болезнями леса.

В июне 2014 года на территории Аршанского участкового лесничества национального парка «Тункинский» обрушился селевой поток (рис. 3).



Рис. 3. Последствия селевого потока вблизи п. Аршан (Аршанское лесничество).

Fig. 3. Effects of debris flow near p. Arshan (Arshanskoe forest).

По предварительным сведениям, площадь лесных насаждений, погибших в результате селевого потока составила 85,84 га, общая площадь селевого потока составила 315,22 га [7].

Исследования проводились на восьми контрольных площадях, растительный покров которых характеризует сосновые насаждения преобладающих на данной территории. В результате были произведены замеры стволов деревьев, заваленные содержимым селевого потока, для определения санитарного состояния лесов и дальнейшего прогнозирования состояния лесных насаждений. На 2016 и 2017 г. обследования территории лесных геосистем на контрольных площадях происходит усыхание крон деревьев, а также стволов

деревьев до 100% (2015 – 85%) (2016 – 98%). Участки на обследуемой территории характеризуются как утратившие биологическую устойчивость. Хвой на деревьев нет или пожелтела.

Одной из подсистем мониторинга лесов является лесопатологический мониторинг. Лесопатологические обследования проводили в целях установления санитарного состояния лесов, особенно после пожаров, выявления возникающих очагов вредных насекомых и вредителей, изучения их качественного состояния. За весь период мониторинговых исследований на территории парка наблюдались следующие насекомые-вредители и болезни леса (табл. 2). В зоне действия очагов была дана степень усыхания насаждений.

Таблица 2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕННОЙ ПЛОЩАДИ
ВРЕДИТЕЛЯМИ И БОЛЕЗНЯМИ ЛЕСА, га
Table 2. Distribution of damaged forest pest and disease area, ha

Вид вредителя/болезни	Площадь, га
Северный трутовик (<i>Abortiporus borealis</i>)	8,6
Корневая губка (<i>Fomitopsis annosa</i>)	13,2
Стереум жестковолосистый (<i>Stereum hirsutum</i>)	2,0
Черный сосновый усач (<i>Monochamus galloprovincialis Oliv</i>)	8,0
Шестизубчатый короед (<i>Ips sexdentatus</i>)	10,0
Бактериальная водянка (<i>Erwinia nimipressularis</i>)	164,0

При обследовании контрольных площадей в качестве одного из первоначального критерия оценки состояния древостоев нами была выбрана сумма всех живых деревьев (1, 2 и 3 категории). Как показали результаты такой оценки, первоначальная величина живых деревьев составила на контрольных площадях 71,5% в Аршанском лесничестве, 56,7% в Зун-Муринском и 29,1% в Кыренском. Повторные пересчеты показали прежние результаты. В таблице 3 приведены результаты степени повреждения лесных насаждений на контрольных площадях.

Мониторинг естественного возобновления лесов показал, что на территории национального парка «Тункинский» естественное возобновление леса более интенсивно развивается на землях сельскохозяйственного назначения и землях запаса, и значительно медленнее на вырубках и гарях.

По данным наших исследований под пологом древостоя на контрольных площадях численность самосева и подроста колеблется от 985 до 2461 шт. (табл. 4). На лесовозобновляемых площадях на самосев приходится до 15% на площадях №1 и №4, от 24 % до 27,5% приходится на площади №2 и №3 соответственно.

Таблица 3. СТЕПЕНЬ ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ НА КОНТРОЛЬНЫХ ПЛОЩАДЯХ
Table 3. The degree of damage to forests in the control areas

Наименование ППП	Количество обследованных деревьев	Черный сосновый усач (<i>Monochamus galloprovincialis</i> Oliv), шт. 2013/2016 гг.	Бактериальная водянка (<i>Erwinia nimipressularis</i>) шт. 2013/2016 гг.
(Зун-Муринское лес-во) Долина р. Маргасан	165	68/41	46/76
Аршанское лесничество	190	104/55	36,8/70
Кыренское лесничество Урочище Бадары	171	107/63	33/ 57

Таблица 4. ХАРАКТЕРИСТИКА ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗОБНОВЛЕНИЯ НА КОНТРОЛЬНЫХ ПЛОЩАДЯХ
Table 4. Characteristics of natural regeneration in control areas

№ участка	Численность шт./га		Характеристика размещения
	Самосев	подрост	
1 (Зун-Мурино)	150	835	Неравномерное
2 (Хужиры)	408	1187	Неравномерное
3 (Жемчуг)	380	992	Неравномерное
4 (Никольск)	259	2202	Равномерное

На контрольных площадках преобладает благонадежное возобновление, на которое приходится от 57% до 84%. Индекс жизненного состояния показал, что на территории 3 лесничеств (№2, 3, 4) ценопопуляцию естественного возобновления оценили как здоровую [5].

Мониторинг рекреационного воздействия проводили на территориях более привлекательных для туристов.

Наиболее подверженные антропогенной нагрузке, являлись геосистемы в Аршанском лесничестве – в окрестностях пос. Аршан, пос. Никольск, урочища Толтой. В Зун-Муринском лесничестве – урочище Маргасан, в окрестностях пос. Торы. В Кыренском – урочище Бадары, Жемчуг – Вышка.

На юго-восточном побережье оз. Байкал мониторинг также проводили на территориях привлекательных для туристов от п. Култук до п. Новоснежный (рис. 4–7).

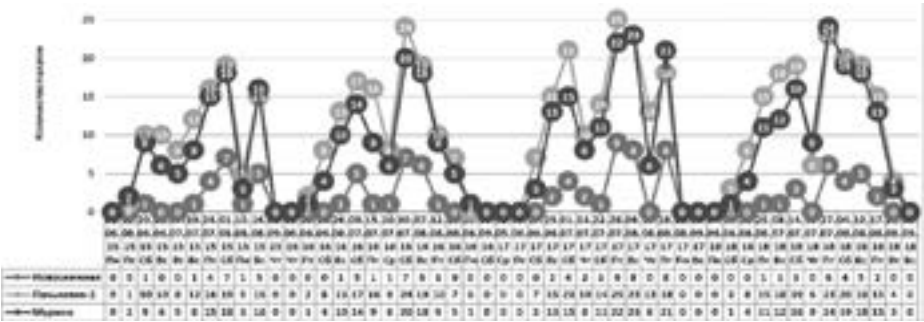


Рис. 4. Количество палаток на ключевых участках (площадью 2500 м²): п. Новоснежная, п. Паньковка-2, п. Мурино.
Fig. 4. The number of tents at key stations (2500 m²): p. Novosnezhnaja, p. Pankovka-2, p. Murino.

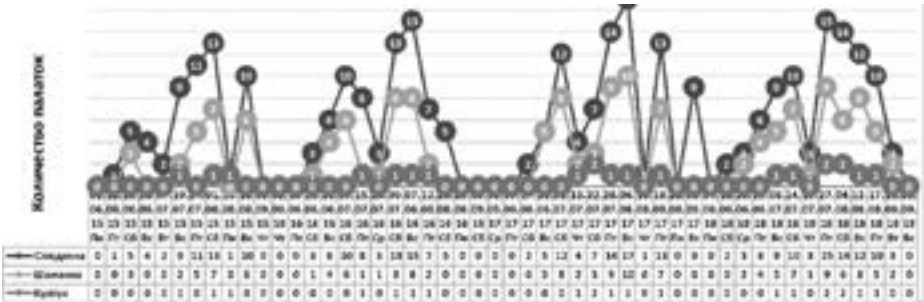


Рис. 5. Количество палаток на ключевых участках (площадью 2500 м²): г. Слюдянка, мыс Шаманский, п. Култук.
Fig. 5. The number of tents at key stations (2500 m²): slyudyanka, Cape Shaman, p. Kultuk.

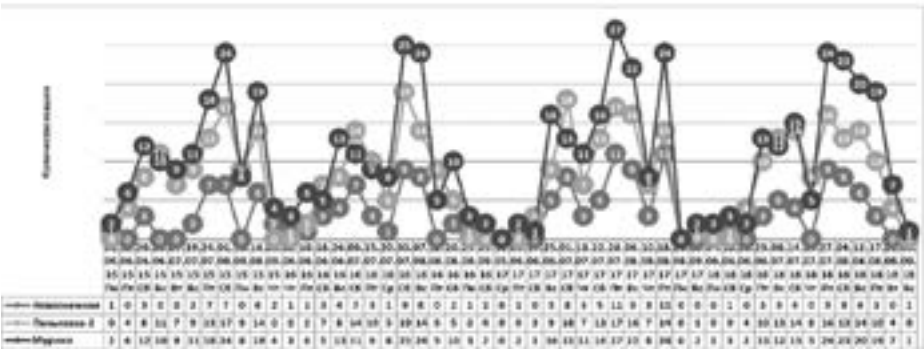


Рис. 6. Количество машин на ключевых участках (площадью 2500 м²): п. Новоснежная, п. Паньковка-2, п. Мурино.
Fig. 6. The number of cars in key areas (2500 m²): Novoslozhnaya, Pankovka-2, Murino.

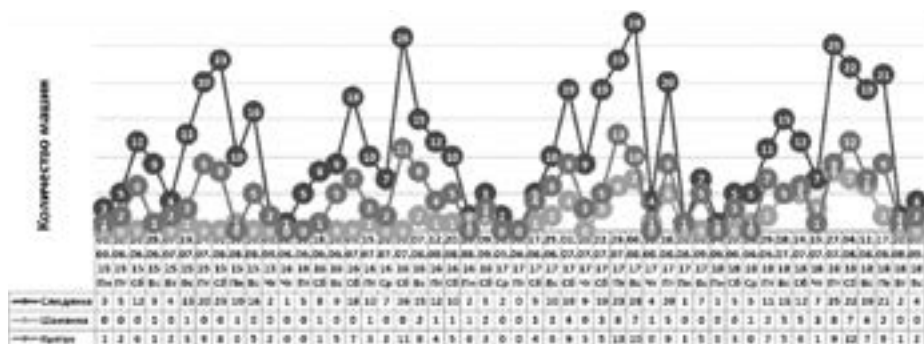


Рис. 7. Количество машин на ключевых участках (площадью 2500 м²): г. Слюдянка, мыс Шаманский, п. Култук.
Fig. 7. The number of cars in key areas (with an area of 2500 m²): Slyudyanka town, Shamansky cape, Kultuk settlement.

В результате вытаптывания на южном побережье практически полностью уничтожены некоторые виды растений, такие как Лилия кудреватая (саранка) (*Lilium mártag*), Красоднев малый (*Hemerocallis minor* Miller), Башмачок крупноцветковый (*Cypripedium macranthos*).

При проведении рекреационной оценки в районе исследований Тункинского парка установлено, что на протяжении четырех лет наблюдений на участках, подверженных антропогенному воздействию, произошло увеличение площади поврежденной территории в среднем с 6,54 до 15,66%, на отдельных площадках — до 34%.

Выводы

За период регулярных наблюдений выявлено, что главной причиной гибели и ослабления лесных геосистем национального парка являются лесные пожары и их последствия. Лесные насаждения, пройденные верховыми пожарами — погибают. Низовые пожары в условиях парка также приводят к усыханию в последующие годы наблюдений. За наблюдаемый период площадь пожаров составила 16148,06 га.

При проведении рекреационной оценки в районе исследований национального парка «Тункинский» установлено, что на протяжении четырех лет наблюдений на участках, подверженных антропогенному воздействию, произошло увеличение площади поврежденной территории в среднем с 6,54 до 15,66%, на отдельных площадках — до 34%, что способствовало нарастанию процессов дигрессии.

Повышенная рекреационная нагрузка способствует изменению видового состава в сторону исчезновения редких растений и внедрению в фитоценозы синантропных видов, нехарактерных для подобных ассоциаций.

Процессы лесовозобновления формируются в зоне тайги Тункинского парка, с тенденциями развития таежно-степных сообществ.

Библиографический список

1. Федеральный закон от 14.03.1995 № ФЗ-33 «Об особо охраняемых природных территориях» [Электронный ресурс]. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант-плюс».
2. Воронцов А.И., Мозолевская Е.Г. Лесная энтомология. М.: Высшая школа, 1982. 298 с.
3. Ильичев Ю.Н. Бушков Н.Т., Тараканов В.В. Естественное лесовосстановление на гарях Среднеобских боров. Новосибирск: Наука (Сиб. отд-ние), 2003. 196 с.
4. Лазарева, А.А. Национальный парк «Тункинский», как объект охраны биоразнообразия растительного и животного мира / А.А. Лазарева, Т.Е. Афонина // Материалы научно-практического семинара, посвященного «Дню аспиранта ИРГСХА». Иркутск, 2013. С. 68-72.
5. Лазарева, А.А. Естественное возобновление лесов национального парка «Тункинский» / А.А. Лазарева, Т.Е. Афонина // Вестник ИРГСХА, №76, 2016 С. 53-59.
6. Лесохозяйственный регламент лесничества национальный парк «Тункинский» 2016. 17 с.
7. Лехатинов, А.М. Селевая опасность территории автотуристического кластера «Тункинская долина» / А.М. Лехатинов, Э.Б. Лехатинова // Материалы III Международной конференция «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита» (Южно-Сахалинск, 22-26 сентября 2014 г.). Южно-Сахалинск, Сахалинский филиал ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН. С. 82-88.

References

1. Federal Law of 14.03.1995 No. FZ-33 «On Specially Protected Natural Territories» [Electronic resource]. Access from the referral legal system «Consultant Plus» (in Russ).
2. Vorontsov A.I., Mozolevskaya E.G. Forest entomology. M.: Higher School, 1982. 298 p. (in Russ).
3. Il'ichev YU.N. Bushkov N.T., Tarakanov V.V. Natural reforestation on the burned areas of Sredneobsky hogs. Novosibirsk: Nauka. Sib.otd-nie, 2003. 196 p.
4. Lazareva, A.A. Tunkinsky National Park as an object of protection of plant and animal biodiversity / A.A. Lazareva, T.E. Afonina // Materials of the scientific-practical seminar devoted to the "Day of the postgraduate student of the FGBOOU WAUGH", Irkutsk 2013. P. 68-72.

5. Lazareva, A.A. Natural reforestation of the Tunkinsky National Park / A.A. Lazareva, T.E. Afonina // Bulletin of the Institute of Civil Engineering. №76. 2016 P. 53-59.
6. Forest management regulations of the forest area Tunkinsky National Park 2016. 17 p.
7. Lekhatinov, A.M. Mudflow danger of the territory of the autotourism cluster «Tunkinskaya Valley» / A.M. Lekhatinov, E.B. Lekhatinova // Proceedings of the III International Conference «Mudflows: catastrophes, risk, forecast, protection»: a collection of reports, Yuzhno-Sakhalinsk, September 22-26, 2014 – Yuzhno-Sakhalinsk, Sakhalin branch of the Far East Geological Institute of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences. С. 82-88.

**Рукопись поступила в редакцию 12.01.19,
принята к публикации 01.03.19**

Сведения об авторах

- А.А. Лазарева,** преподаватель кафедры землеустройства, кадастров и сельскохозяйственной мелиорации агрономического факультета. ФГБОУ ВО Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, lazarewa.ali@yandex.ru, г. Иркутск, Россия.
- А.А. Слаута,** преподаватель кафедры землеустройства, кадастров и сельскохозяйственной мелиорации агрономического факультета. ФГБОУ ВО Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, slauta_a.a@mail.ru, г. Иркутск, Россия.
- Т.Е. Афонина,** доктор географических наук, профессор кафедры землеустройства, кадастров и сельскохозяйственной мелиорации агрономического факультета. ФГБОУ ВО Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, bf-vniprirodi@yandex.ru, г. Иркутск, Россия.

About the authors

- A.A. Lazareva,** teacher of department of land management, inventories and agricultural melioration of agronomical faculty. FGBOU WAUGH Irkutsky state agricultural university of A.A. Ezhevsky, lazarewa.ali@yandex.ru, Irkutsk, Russia.
- A.A. Slauta,** teacher of department of land management, inventories and agricultural melioration of agronomical faculty. FGBOU WAUGH Irkutsky state agricultural university of A.A. Ezhevsky, slauta_a.a@mail.ru, Irkutsk, Russia.
- T.E. Afonina,** is professor of department of land management, inventories and agricultural melioration of agronomical faculty. FGBOU WAUGH Irkutsky state agricultural university of A.A. Ezhevsky, bf-vniprirodi@yandex.ru, Irkutsk, Russia.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ», № 1, 2019

25.00.23
УДК 616.993

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ
И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

Сигида С.И.

ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет».

**Маркова М.Ю.,
Пурмак К.А.**

355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1;
ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Ставропольском крае».
355008, г. Ставрополь, пер. Фадеева, 4.

АНАЛИЗ ЛАНДШАФТНО- БИОТОПИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОПУЛЯЦИЙ МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ

Введение.

Ставропольский край занимает площадь 66,3 тыс. м². Рельеф края разнообразен и делится по абсолютным высотам на низменный (менее 200 метров) и горной (более 500 метров). На этой площади распространены весьма разнообразные зоны от северных и северо-восточных полупустынных и степных районов до южных горнолесных с альпийскими лугами и вечными ледниками, что в свою очередь, определяет многообразие животного мира Ставрополья в частности, мелких млекопитающих (ММ). В данной работе проводится анализ приуроченности мелких млекопитающих к естественным и антропогенным биотомам а так же оценка влияния человеческой деятельности на представителей этой группы животных [8]. Мониторинг численности грызунов осуществлялся в различных ландшафтно-климатических зонах Ставропольского края.

Материалы и методы
исследования.

Материалом для настоящей работы послужили сборы авторов во время экспедиций и стационарных наблюдений в различных ландшафтных зонах Ставропольского края в 2011–2018 гг. Отлов ММ производился ежегодно в разные триады зимой перед началом размножения, в начале лета и осенью по окончании размножения по стандартной методике. За отчетный период отработано 26700 ловушко-суток, в результате чего отловлено 4086 особей мелких млекопитающих. Всего на исследуемой территории отмечено 10 видов грызунов.

Результаты исследования
и их обсуждения.

Во всех ландшафтных провинциях Ставропольского края в структуре населения ММ доминировала – малая лесная мышь, в полупустынных ландшафтах – домовая мышь. Наибольшая численность ММ во всех ландшафтах исследуемого региона отмечались в конце лета начало осени, минимальная – в конце зимы – начале весны. В провинции лесостепных ландшафтов края затрачено 8100 ловушко-суток, отловлено 2580 особей грызунов. Видовой состав представлен 10 видами из них доминирующими видами явились: малая лесная мышь (ИД – 40,1%), мышь домовая – ИД 27,5%. В провинции степных ландшафтов в 2011–2018 гг. затрачено 14000 ловушко-суток отловлено 1882 особи ММ. Видовой состав представлен 9 видами доминирующим видом явились: мышь малая лесная (ИД – 44,4%). В провинции полупустынных ландшафтов края за исследуемый период затрачено 1300 ловушко-суток, в результате чего отловлено 95 особей ММ. Видовой состав представлен четырьмя видами ММ доминирующим видом явилась мышь домовая при ИД – 45,3%. В провинции предгорных степных и лесостепных ландшафтов края затрачено 1300 ловушко-суток, отловлено 529 особей ММ. Видовой состав представлен 8 видами ММ среди них доминирующим видом явилась мышь малая лесная – ИД 73,1%.

Ключевые слова:

ландшафтно-биотопическое распределение, малая лесная мышь, домовая мышь, полевая, мышка-малютка, мелкие млекопитающие.

Sigida S.I., FSAEI HE «North-Caucasus Federal University»
355009, Stavropol, Pushkin Street, 1.
Markova M.Y., FBHI «Hygienic and Epidemiological Center in the Stavropol Territory»
Purmak K.A. 355008, Stavropol, Fadeev Lane, 4.

Analysis of landscapes-biotopic distribution of small mammals populations of the Stavropol territory

Introduction: Stavropol region covers an area of 66300 m². The relief of the region is diverse and is divided by absolute heights into low (less than 200 meters) and mountain (more than 500 meters). In this area, quite diverse zones are spread from the northern and northeastern semi-desert and steppe areas to the southern mountain-forest with alpine meadows and sterol glaciers. The marked variety of conditions for existence determines the diversity of the animal world of the Stavropol region, in particular, small mammals (MM). This analysis the confinement of small mammals to natural and anthropogenic biotopes to assess the impact of human activity on members of this group of animals.

Materials and research methods: The material for this work was the collections of the autos during expeditions of stationary observations in various landscape zones of the Stavropol Territory in 2011-2018. Rodents were captured annually by various triads in the winter before the start of breeding, in early summer and in autumn in the end of breeding according to standard. During the reporting period 26700 traps-days wave worked out, as result of which 4086 small mammals were caught. Altogether, 10 species were observed in the study area in most of the territories. The Lessen Forest Mouse prevailed in the population structure of the MM, semi-desert landscapes of the Pre Caucasia-the house mouse. The greatest number of MM in the conditions of the Stavropol territory in all landscapes were noted in the end of summer the beginning of autumn, the minimum-ache end of winter early spring. Species composition is represented by the following species.

The results of the study and their discussion: MM was monitored in various landscapes-climatic zones of the Stavropol Territory. In the forest-steppe landscapes zone, trap-days wave spent on captures individuals of rodents. In the province of forest-steppe landscapes of the region were spent 8100 trap-days, 1580 individuals were caught. The species composition is represented by 10 species of which the dominate species were: Small Forest Mouse (EID-40,1%), House Mouse (EID-27,5%). In the province of steppe landscapes in 2011–2018. Spent 14000 trap-days captured 1882 individuals MM. Species composition is represented by 9 species: forest small mouse (EID-44,4%) is dominate species. In the province of semi-desert landscapes of the region for study period spent 1300 trap-days, as a result caught 95 individuals MM. Species composition is represented by 4 species: House Mouse (EID-45,3%) is dominate species. In the province foothill, steppe and forest-steppe spent 3300trap-days, caught 529 individuals MM. Species composition is represented by 8 species: Little Wood Mouse (EID-73,1%) is dominate species.

Key words: landscape-biotopic distribution, little wood mouse, house, hanvest mouse, baby mouse, small mammals.

Введение

Мелкие млекопитающие (ММ) широко распространены во всех наземных биоценозах Ставропольского края, это компоненты природных и антропогенных экосистем – резервуарные хозяева многих природно-очаговых инфекций на юге России. Это достаточно хорошо изученный компонент экосистем [2, 7, 13, 15, 16, 23, 24, 26, 34]

Жизнедеятельность мелких мышевидных млекопитающих определяет активность многих природных очагов инфекций и численность хищников, поедающих их. Исходя из выше сказанного, мониторинг динамики численности мышевидных грызунов из отрядов насекомоядные и грызуны является актуальной проблемой в естественных экосистемах и антропогенных ландшафтах Ставрополья.

Мышевидные грызуны являются перспективными и с точки зрения биоиндикации, они могут быть использованы для характеристики условий обитания, а так же, имеют важное значение при оценке эпидемиологической ситуации по туляремии, лептоспирозу, лихорадки с почечным синдромом и др. природно-очаговых и особо опасных инфекций.

Целью настоящей работы является выявление видового состава ММ, динамики их численности, анализ структуры популяций этих животных в различных ландшафтах Ставропольского края.

Материалы и методы

Материалом для настоящей работы послужили сборы авторов на территории Ставропольского края во время экспедиций и стационарные наблюдения на протяжении 8 лет с 2011 по 2018 г.

Исследования проводили специалисты ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Ставропольском крае» с 2011 по 2018 годы в различные месяцы (табл. 1). Учеты численности ММ осуществляли методом ловушко-линий, при помощи ловушек «Геро» с крючками. Приманкой служили кусочки черного хлеба размером 1 см³, сдобренные подсолнечным маслом и подсушенные на солнце

Показателем численности служило число попавших зверьков в пересчете на 100 ловушко-суток. Зоологические работы вели в рамках эпизоотологического мониторинга, проводимого учреждениями Роспотребнадзора

Анализ полученных данных осуществляли по разным ландшафтным провинциям Предкавказья: лесостепных ландшафтов, степных ландшафтов, провинция полупустынных ландшафтов, предгорных степных и лесостепных ландшафтов (рис. 1)

За период эпизоотологических обследований в различных ландшафтных зонах и стациях края было отработано 26700 ловушко-суток в результате чего отловлено 4086 особей мелких млекопитающих.

Сборы материала проводились ежегодно в разные триады: зимой перед началом размножения, в начале лета и осенью по окончании размножения, по стандартной методике [9, 14]. Показателем численности служило число попав-

ших зверьков в пересчете на 100 ловушко-суток [6]. В работе использовали систематико-географический справочник млекопитающих России под редакцией И.Я. Павлинова и А.А. Лисовского и определитель Ф.А. Темботовой
Расчеты проводили в программе Microsoft Excel.

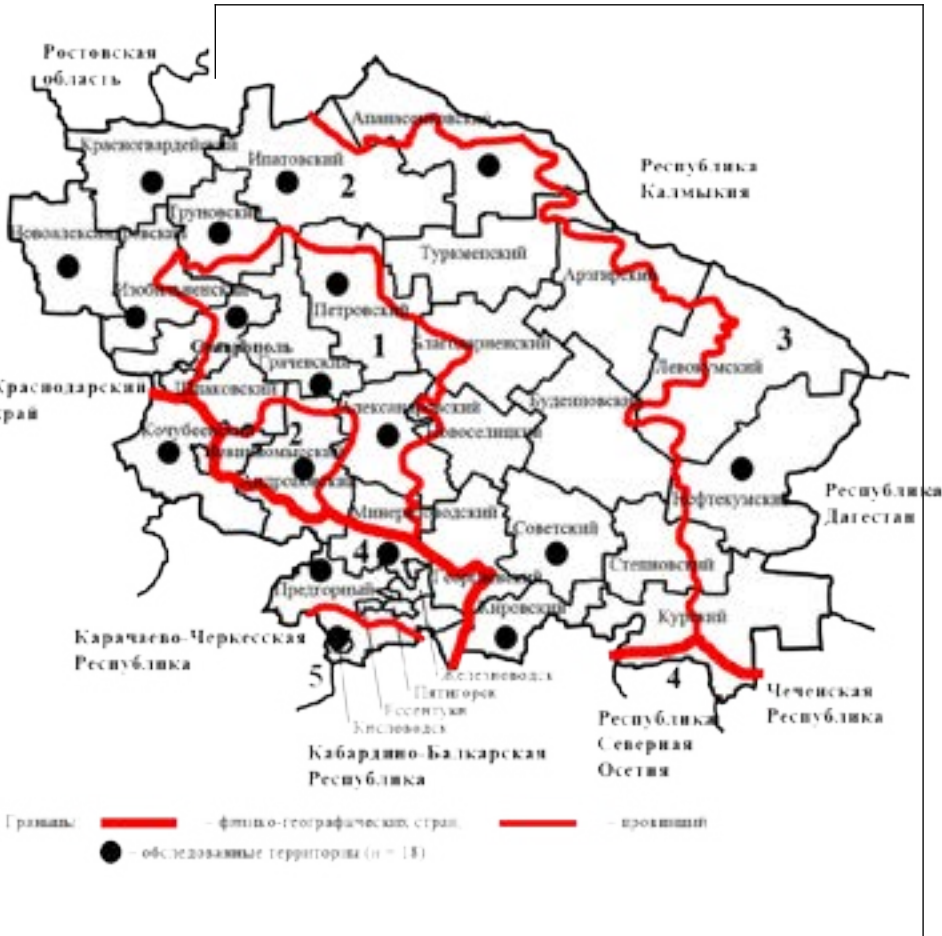


Рис. 1. Карта-схема ландшафтов Ставропольского края. Ландшафты равнин Предкавказья: 1 – провинция лесостепных ландшафтов, 2 – провинция степных ландшафтов, 3 – провинция полупустынных ландшафтов. Ландшафты Большого Кавказа: 4 – провинция предгорных степных и лесостепных ландшафтов.

Fig. 1. Map-scheme of landscapes of Stavropol region. Landscapes of the Ciscaucasian plains: 1 – province of forest-steppe landscapes, 2 – province of steppe landscapes, 3 – province of semi-desert landscapes. Landscapes Of the greater Caucasus: 4 – the province of foothill steppe and forest-steppe landscapes.

Результаты исследования и их обсуждения

Таблица 1. ОБЪЁМ И РЕЗУЛЬТАТЫ УЧЕТА ЧИСЛЕННОСТИ ММ С 2011 ПО 2018 Г. В РАЗЛИЧНЫХ ЛАНДШАФТАХ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ
Table. 1. The scope and results of counting the number of MM from 2011 to 2018 in different landscapes of the Stavropol territory

период учета	Провинции	Отработано л/с		Добыто ММ		Процент по-падения ММ на 100 л-с
		всего	в среднем за 8 лет	всего	в среднем за 8 лет	
январь-март	лесостепных ландшафтов	1900	237,5	200	25	10,5
	степных ландшафтов	3510	438,75	172	21,5	4,9
	полупустынных ландшафтов	0	0	0	0	0
	предгорных степных и лесостепных ландшафтов	1400	175	144	18	10,3
	Всего	6810	851,25	516	64,5	7,6
июнь – август	лесостепных ландшафтов	2200	275	468	58,5	21,3
	степных ландшафтов	5000	625	618	77,3	8,9
	предгорных степных и лесостепных ландшафтов	1900	237,5	385	48,1	20,3
	полупустынных ландшафтов	700	87,5	5	0,6	0,7
	Всего	9800	1225	1476	184,5	15,1
сентябрь-октябрь	лесостепных ландшафтов	1500	187,5	327	40,9	21,8
	степных ландшафтов	4290	536,25	825	103,1	19,2
	предгорных степных и лесостепных ландшафтов	0	0	0	0,0	0
	полупустынных ландшафтов	400	50	51	6,4	12,8
	Всего	6190	773,75	1203	150,4	19,4
ноябрь-декабрь	лесостепных ландшафтов	2500	312,5	585	73,1	23,4
	степных ландшафтов	1200	150	267	33,4	22,3
	предгорных степных и лесостепных ландшафтов	0	0	0	0,0	0,0
	полупустынных ландшафтов	200	25	39	4,9	19,5
	Всего	3900	487,5	891	111,4	22,8
Всего	лесостепных ландшафтов	8100	1012,5	1580	197,5	19,5
	степных ландшафтов	14000	1750	1882	235,3	13,4
	предгорных степных и лесостепных ландшафтов	3300	412,5	529	66,1	16,0
	полупустынных ландшафтов	1300	162,5	95	11,9	7,3
	Всего	26700	3337,5	4086	510,8	15,3

Результаты и обсуждение

В результате учетов было выявлено 10 видов ММ – обитающих на территории Ставропольского края [1–3, 7, 11, 12, 15–29, 37] (табл. 2).

В том числе, из семейства *Soricidae* 2 вида: обыкновенная бурозубка (*Sorex araneus*, Linnaeus 1758) малая белозубка (*Crocidura suaveolens* Pallas, 1811).

Семейство *Cricetidae* 3 вида: серый хомячок (*Cricetulus migratorius* Pallas, 1773) – на ряду с мышинными, представители семейства Хомяковых (*Cricetidae*) также были широко распространены в анализируемое время в Ставропольском крае. На их долю приходится от 9 до 32% от всех отловленных ММ в различных провинциях Предкавказья и Большого Кавказа. При этом большую долю эти грызуны составляли в степных ландшафтах Предкавказья, меньшую – в полупустынных (табл. 2). Серый хомячок в Ставропольском крае распространен широко, численность его увеличивается в осенний период, особенно на полях с убранном подсолнечником. Размеры мелкие, длина тела до 120 мм. Окраска верха светло-серая, вдоль спины окраска меха темнее, чем по бокам. Брюшко белое. Распространен очень широко – от полупустынь до высокогорья. Стации разнообразные – степи, песчаные массивы, поля, лесополосы, сады, виноградники, хозяйственные постройки. В зимнюю спячку не впадает. В степном Предкавказье размножение протекает с марта по сентябрь. В году до 3-х выводков, по 6-7 детенышей в каждом [25]. Образ жизни одиночный, сумеречно-ночной. Норы простого устройства, часто селится в заброшенных норах других мелких грызунов. Питается в основном семенами, поедает также зеленые части растений, насекомых, моллюсков. Численность повсеместно невысокая. Считается одним из основных носителей туляремии.

Обыкновенная полевка (*Microtus arvalis* Pallas, 1778) – ведет колониальный образ жизни, заселяя поля с озимыми, нанося огромный вред посевам в годы массового размножения [1–3, 5–7, 11, 15–16, 18, 20–29].

Численность этого грызуна может достигать значительных показателей [5]. В структуре населения ММ этот вид занимает наибольшую долю в степных ландшафтах Ставропольского края (табл. 2). Отличительным признаком обыкновенной полевки является: окрас верха бурый, брюшко грязно – серое. Хвост двухцветный, темнее сверху. На подошве ступни обычно 6 бугорков, длина тела до 130 мм. норы поверхностные (до 20–30 см. глубиной) с большим количеством входных отверстий и сложной системой ходов. Активность круглосуточная и круглогодичная. Питается в основном зелеными частями растений. Размножение в течение теплого периода года: на равнине с марта по октябрь, в горах – с апреля по сентябрь. Молодые зверьки ранних выводков принимают активное размножение в год своего рождения. Численность отчетливо устойчива – периоды массового размножения сменяются резкой депрессией, примерно, с 3-5-летней периодичностью. Данный вид характеризуется как вредитель полевых и садовых культур а так же основной носитель туляремии в Предкавказье. Все эпидемические вспышки туляремии тесно связаны с массовым размножением полевых.

Общественная полевка *Microtus socialis* Pallas, 1773 – обитает в различных условиях, заселяя целинные участки степей, полевые защитные полосы, скалы и осыпи, строения различных типов [1–3, 5–7, 11–12, 15–16, 18, 20, 36]. По нашим наблюдениям, эта полевка распространена в ландшафтах равнин Предкавказья и Большого Кавказа. Наибольшую долю в отловах этот вид составляет в лесостепных ландшафтах Ставропольского края (табл. 2). Отличительными признаками зверька является: мелкие размеры, длина тела до 125 мм. Окраска верха палево-серая, нижняя сторона светлая. Хвост светлый, короткий. На подошве ступни обычно 5 бугорков. Распространена по всей степной зоне края.

Типичный обитатель разнотравно-злаковых, полынно-злаковых степей и полупустынь, включая солончаки и закрепленные пески. Селится также на полях культурных растений, в садах, лесополосах. Образ жизни колониальный. Норы поверхностные, но довольно сложного устройства.

Размножение в течение всего теплого периода, а при благоприятных кормовых и погодных условиях также и зимой. Сеголетки приступают к размножению в возрасте около 2-х месяцев. Численность резко колеблется достигая в отдельные годы, размеров «мышинной напасти». Питается самыми разнообразными растениями, которые встречаются около нор. На зиму делает запасы из семян и подземных частей растений. При высокой численности наносит большой урон пастбищам и посевам.

В семействе *Muridae* 4 вида: *Mus musculus* Linnaeus, 1758. Домовая мышь, относится к настоящим синантропам, заселяет жилые помещения, постройки человека, а также скирды и ометы [10]. В условиях целинных степей и провинции среднегорных ландшафтов лесостепей и остепненных лугов численность домовых мышей – малая. Наибольшая численность домовых мышей приходится на осенне-зимний период в закрытых луго-полевых стациях. Домовая мышь встречается во всех ландшафтных провинциях Ставропольского края. Размеры зверька мелкие, длина тела до 100 мм. Окрас верха однотонный, с преобладанием темно – серых тонов. Окраска брюшной стороны светлая, сероватая или охристая, четко ограниченная от окраски боков тела. Кожный чехол на конце хвоста держится достаточно прочно даже при попытке сдернуть его (надежный признак отличия от лесной мыши, особенно для молодых особей).

Питается домовая мышь в основном семенами культурных и диких растений. Гнезда устраивает в естественных нишах, в заброшенных норах других грызунов или роет собственные норы очень простого устройства. Наибольшая активность в сумеречные и ночные часы.

Очень серьезный вредитель сельскохозяйственных культур, большой вред наносит на складах, в жилищах человека, где поедает, портит и загрязняет продукты питания. Значительную роль играет как переносчик ряда особо опасных болезней человека в том числе туляремией.

Малая лесная мышь – *Sylvemus uralensis* Pallas, 1811. Обитает во всех провинциях ставропольского края. Многочисленна в горных и в байрачных лесах,

в зарослях кустарников, по лесополосам, по зарослям тростников, берегам водоемов [13]. Период размножения длится с февраля по октябрь. Пик размножения приходится на апрель-июль. Основу питания составляют семена, в том числе и древесных пород. В летний период поедает и зеленые части растений. В лесных биотопах гнезда и убежища устраивает в дуплах деревьев, под корнями, под кучами хвороста. В открытых стациях роет норы довольно простого устройства.

Численность малой лесной мыши значительно меняется по годам. В степных районах резких перепадов численности не отмечается [25]. Являясь многочисленным обитателем полей и лесов мыши наносят существенный вред зерновому хозяйству, лесовозобновлению и особенно при искусственных лесопосадках. Велика роль этих грызунов и как носителей ряда природноочаговых инфекций, в частности, туляремии [30-33].

Полевая мышь – *Apodemus agrarius* Pallas, 1771 – зарегистрирована в лесостепных, степных и предгорных степных и лесостепных ландшафтах Ставропольского края, за исключением полупустынь [11, 13, 35]. Окраска верха рыжевато – коричневая, брюшко белое, с темным основанием волос. Вдоль спины проходит черная полоска. Широко распространена в предгорных районах, на Ставропольской возвышенности. Размножение в течение всего теплого периода, в выводке 5-7 детенышей.

В питании преобладают семена диких и культурных растений, поедает также насекомых, ягоды, вегетативные части и корни растений. Живет в норах, но может селиться в дуплах деревьев, иногда сооружает надземные шарообразные гнезда в кустах.

Полевая мышь относится к числу наиболее вредных грызунов, принося большой урон культурным растениям. Носитель ряда опасных болезней.

Мышь-малютка – *Micromys minutus* Pallas, 1771 – вид довольно редкий, отмечен в лесостепных ландшафтах Ставропольского края. Один из самых мелких видов грызунов – длина тела до 70 мм. Окраска верха тела яркая песчано-охристая с оранжевым оттенком. Брюшко белое, резко отграниченное от более темного цвета боков. Оптимальные местообитания – высокотравные луга, заросли кустарников в долинах рек, степные балки.

Строит шарообразные гнезда из травы, которые подвешивает на стебли травы невысоко от земли. Иногда такие гнезда располагаются в скирдах, под копами сена, под кочками [25].

Семейство *Gliridae*, лесная соня – *Dryomys nitedula* Pallas, 1779. отмечена во всех ландшафтных провинциях Ставропольского края, за исключением полупустыни. Размеры зверька мелкие, длина тела до 100 мм. Хвост примерно равен длине тела, покрыт длинными густыми волосами. От носа вокруг глаз к основанию уха проходит черная полоса. Окраска меха варьирует от охристой до серо – коричневой. Низ тела от бледно-палевого до белого цвета.

Широко распространена от верхней границы леса до зоны сухих степей, по лесополосам проникает до приманычских полупустынь. Населяет широколи-

Таблица 2. СТРУКТУРА НАСЕЛЕНИЯ ММ В ЛАНДШАФТАХ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ (в % от общего числа учтенных мелких млекопитающих)
Table 2. The structure of the population of MM in landscapes of the Stavropol Territory (% of the total number of small mammals recorded)

Мелкие млекопитающие	Провинции			
	равнин Предкавказья			предгорий Большого Кавказа
	лесостепных ландшафтов	степных ландшафтов	полу-пустынных ландшафтов	предгорных степных и лесостепных ландшафтов
Малая лесная мышь	40,3	44,4	22,1	73,1
Домовая мышь	27,5	19,4	45,3	4,4
Полевая мышь	6,6	2,0	0	4,6
Мышь-малютка	0,4	0	0	0
Общественная полевка	12,8	8,7	15,8	10,6
Обыкновенная полевка	4,1	11,4	0	1,9
Серый хомячок	1,1	3,3	0	3,0
Белозубка малая	4,7	3,8	16,8	0
Бурозубка обыкновенная	2,7	2,0	0	0,7
Соня лесная	0,06	0,4	0	0,2

ственные и пойменные леса, заросли кустарников, сады, виноградники. Летние убежища устраивает в дуплах, в пустующих гнездах птиц, в нежилых норах грызунов. Зимние убежища располагаются под землей, под корнями деревьев. Зиму проводит в спячке, сроки и продолжительность которой зависят от климата местности. В предгорьях активный период жизни длится с мая до конца сентября. Образ жизни сумеречный и ночной. Очень подвижна, одинаково быстро передвигается по земле, по ветвям и стволам деревьев. Период размножения растянут, в году один выводок, число детенышей в нем обычно 3-4. Питается преимущественно плодами, семенами, ягодами, насекомыми, поедает также яйца птиц, птенцов, мелких грызунов. При высокой численности может наносить заметный вред в садах и виноградниках.

По сравнению с описанными выше семействами, результаты учетов численности Землеройковых (*Soricidae*) методом ловушко-линий не всегда показательны [6].

В структуре населения ММ Ставропольского края основное место принадлежит мышинным (*Muridae*), которые составляют от 70 до 85% от всех добытых грызунов и насекомоядных в различных ландшафтах (табл. 2).

Малая лесная мышь обитает в древесных и кустарниковых насаждениях, в залежах и на полях с посевами различных сельскохозяйственных культур. Численность этого вида зависит от разных условий, при теплых зимах и хорошей кормовой базе она достигает значительных показателей.

По нашим наблюдениям, *A. uralensis* повсеместно преобладала в отловах на территориях Предкавказья, за исключением полупустынных ландшафтов, где значительную долю в отловах занимала *M. musculus* (табл. 2).

По полученным нами данным, на территории Ставропольского края в отловах присутствуют малая белозубка и обыкновенная бурозубка.

Доля в отловах малой белозубки больше, по сравнению с обыкновенной бурозубкой. Обыкновенная бурозубка зарегистрирована в лесостепных и степных ландшафтах равнин Предкавказья (табл. 2).

Единичные особи лесной сони регистрировались в пойменных лесах в зарослях кустарника, садах. В рассматриваемых биотопах как правило были плодовые деревья. Доля этого вида не велика (табл. 2).

Результаты наблюдений за ММ в различных ландшафтах Ставропольского края мы анализировали за 8 лет. Необходимо принимать во внимание, что доля определенного вида среди отловленных ММ во многом зависит от их численности. По нашим наблюдениям, а также сообщениям ряда авторов, численность ММ в анализируемом регионе колеблется.

Малая лесная мышь преобладающая во всех ландшафтах Ставропольского края сохраняла в течение 8 лет приблизительно одинаковую численность. Определенная синхронность и периодичность колебаний численности ММ во многом определялись погодными условиями осенне-зимних периодов 2011–2018 гг. и кормовой базой. Наименьшая численность ММ наблюдалась в конце зимы и весной. К летне-осеннему периоду во всех ландшафтах Ставропольского края численность ММ достигала значительных показателей (табл. 1).

Ландшафты Ставропольского края разнообразны (рис. 1). Лесостепные ландшафты занимают южные части края. В рельефе преобладают платообразные высокие равнины с глубоко расчлененными речными долинами. Климат умеренно континентальный. Особенности лесостепных ландшафтов исследуемого региона и богатые природные ресурсы – черноземы, леса, подземные воды – обуславливают биоразнообразие.

В лесостепной ландшафтной зоне выставлено 7900 ловушко-суток, отловлено 1519 грызунов (рис. 1.), представленных десятью видами: малая лесная мышь ИД – 40,3%; домовая мышь (ИД – 30%); общественная полевка (ИД – 9,8%); полевая мышь (ИД – 7,2%); малая белозубка (ИД – 4,7%); обыкновенная полевка (ИД – 3,3%); бурозубка обыкновенная (ИД – 2,9%); серый хомячок (ИД – 1,3%), мышь-малютка (0,5%).

Степные ландшафты занимают западные, северные и восточные районы с абсолютными высотами 200-350 м. Рельеф преимущественно – равнинный. Водораздельные слабо расчлененные пространства чередуются с речными долинами и балками. Климат, сравнительно с лесостепью, более континентальный. Сумма осадков 400-450 мм. Большая часть территории сложена лессовидными суглинками. Природные экосистемы сохранились на площади 5–10%, остальное – пахотные угодья.

В зоне степей ловушки «Геро» устанавливались в открытой и закрытой луго-полевой стациях, а также в лесокустарниковой и околородной. Всего за 2011–2018 гг. выставлено 14000 ловушко-суток, отловлено 1972 особи мелких млекопитающих (рис. 1.), относящихся к 9 видам, среди которых доминировала: малая лесная мышь, (ИД – 44,4%); содоминантными видами явились домовая мышь (ИД – 19,4%), обыкновенная полевка (ИД – 11,4%); общественная полевка (ИД – 8,7%); малочисленными видами явились: малая белозубка (ИД – 3,8%); серый хомячок (ИД – 3,3%); полевая мышь (ИД – 2,1%); обыкновенная бурозубка (ИД – 2,0%); лесная соня (ИД – 0,4%).

Полупустынные ландшафты занимают северо-восточные и восточные районы края. В рельефе преобладают низменные равнины с абсолютными высотами от 5 до 200 м. Климатические условия отличаются континентальностью и засушливостью. Почвы здесь каштановые и светло-каштановые с обилием солонцов и солончаков.

В полупустынной ландшафтной зоне за анализируемый период выставлено 1300 ловушко-ночей охватывающих лесокустарниковую и околородную стаии, отловлено 95 особей мышевидных грызунов (рис. 1.) относящихся к 4 видам: доминирующим видом явилась домовая мышь (ИД – 45,5%); содоминантными видами явились: малая лесная мышь (ИД – 22,1%), малая белозубка (ИД – 16,4%), полевка общественная (ИД – 15,8%).

Провинция предгорных степных и лесостепных ландшафтов занимает южные районы края и представляет собой переходную зону от равнин Предкавказья к горным склонам Большого Кавказа [38, 39]. Климат умеренно влажный и годовыми суммами осадков 450-500 мм. Почвы – выщелоченные черноземы.

В провинции предгорной края выставлено 3500 ловушко-суток, которые выставлялись в открытой лесокустарниковой, луго-полевой и околородной стаиях. Отловлено 590 особей мелких млекопитающих. Видовой состав представлен 9 видами мелких млекопитающих. Доминирующим видом, попавшим в орудие лова явилась – малая лесная мышь (ИД – 63,7%); содоминантными видами явились: общественная полевка при (ИД – 19,5%); обыкновенная полевка (ИД – 6,4%); домовая мышь (ИД – 4,1%); полевая мышь (ИД – 3,9%); полевка общественная (ИД – 3,3%); малочисленным видом явилась обыкновенная белозубка малая (ИД – 2,7%); хомячок серый (ИД – 2,2%); бурозубка обыкновенная (ИД – 0,7%).

Таким образом, на территории Ставропольского края в различных ландшафтно-климатических провинциях, нами выявлено 10 видов мелких млекопита-

ющих. Доминантными видами оказались: малая лесная мышь (ИД- 50,8%) в степной, лесостепной и предгорной ландшафтной зоне, мышь домовая (ИД – 19,2%) доминировала в полупустынной ландшафтной провинции.

Наибольшее количество ловушко-суток 1400 проведено в зоне степей, отловлено 1972 экз. мелких млекопитающих. Наибольшая численность ММ в условиях Ставропольского края во всех ландшафтно-климатических зонах отмечалась в конце лета – начале осени, минимальная – в конце зимы – начале весны.

Библиографический список

1. Бёме Л.Б. К биологии животных Северного Кавказа // Отдельный оттиск издательства Северо-Кавказского института краеведения. Владикавказ, 1925б. 15 с.
2. Бёме Л.Б. К биологии и распространению некоторых грызунов Северного Кавказа. Владикавказ, 1925а. 45 с.
3. Верещагин Н.К. Млекопитающие Кавказа. Москва; Ленинград: Издательство Академии наук СССР, 1959. 704 с.
4. Вержуцкий Д.Б. Современное состояние зоологической работы по обеспечению эпидемиологического благополучия России // Байкальский зоологический журнал, 2013. № 1 (12). С. 109-112.
5. Даль С.К. Ландшафтно-экологический очерк позвоночных животных в местах возможной природной очаговости бруцеллёза в Ставропольском крае // Труды научно-исследовательского противочумного института Кавказа и Закавказья. Ставрополь, 1959. Вып. 2. С. 34-65.
6. Карасева Е.В., Телицына А.Ю. Методы изучения грызунов в полевых условиях. Учеты численности и мечение / под редакцией В.Е. Соколова и В.В. Кучерука. Москва: Наука, 1996. 227 с.
7. Кистяковский А.В. Материалы по распространению грызунов в степях Предкавказья // Борьба с грызунами в степях Предкавказья. Ростов-на-Дону, 1935. С. 43-46.
8. Коренберг Э.И. Пути совершенствования эпидемиологического надзора за природноочаговыми инфекциями // Эпидемиология и вакцинопрофилактика, 2016. №6. С. 18-29.
9. Кучерук В.В. Количественный учёт важнейших видов вредных грызунов и землероек // Методы учёта численности и географического распределения наземных позвоночных. Москва, 1952. С. 9-47.
10. Кучерук В.В. Синантропные грызуны и формы синантропии // Дезинфекционное дело, 2000. № 2. С. 61-65.
11. Лаврова М.Я. Грызуны лесных полей защитных полос Ставропольских и Сальских степей // Труды Института географии Академии наук СССР. 1955. Вып. 66. С. 34-56.
12. Левченко Б.И., Тихенко Н.И., Тарасов М.П., Брюханов А.Ф., Каршин С.П., Дегтярёва Л.В. Влияние антропогенного воздействия на видовой состав и численность мелких млекопитающих

в природном очаге туляремии степного типа Ставропольского края // Материалы научной конференции по проблемам зоонозных и других инфекционных болезней. Ставрополь, 1994. С. 47-60.

13. Маркова М.Ю., Сигида С.И., Пурмак К.А., Структура населения мелких млекопитающих в Ставропольском крае в 2015-2017 годах // Дезинфекционное дело, 2018. №4 (106). С. 53-61.
14. МУ 3.1.1029-01 Отлов, учет и прогноз численности мелких млекопитающих и птиц в природных очагах инфекций.
15. Оболенский С.И. Фауна грызунов степей Предкавказья // Борьба с грызунами в степях Предкавказья (сборник статей о работах 1932-1934). Ростов-на-Дону, 1935. С. 32-41.
16. Огнёв С.И. Грызуны Северного Кавказа. Ростов-на-Дону, 1924. 61 с.
17. Павлинов И.Я., Лисовский А.А. Млекопитающие России: систематико-географический справочник. Москва. Товарищество научных изданий КМК. 2012. 604 с.
18. Пилипенко В.Г., Щёкина Т.А. Некоторые итоги многолетнего изучения структурных особенностей природного очага туляремии степного типа в Ставропольском крае // Переносчики особо опасных инфекций и борьба с ними. Ставрополь, 1970. С. 483-498.
19. Приказ Руководителя федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 14.01.2013 №6 «Об утверждении инструкции по оформлению обзора и прогноза численности мелких млекопитающих и членистоногих» // Дезинфекционное дело, 2013. № 1. С. 51-56.
20. Прокофьева З.В. Видовой состав и численность грызунов в разных ландшафтах Ставрополья // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института защиты растений. Приспособительная изменчивость грызунов. Ставрополь, 1969. Вып. 30. Ч. 1. С. 34-51
21. Прокофьева З.В. Картирование численности мелких мышевидных грызунов на территории степного туляремийного очага в Ставропольском крае // Особо опасные инфекции на Кавказе. Ставрополь, 1966. С. 86-91.
22. Прокофьева З.В. Распределение и динамика численности грызунов в Ставропольском крае: Автореферат диссертации кандидата биологических наук. Ленинград, 1968. 17 с.
23. Свириденко П.А. Грызуны Северного Кавказа и предкавказских степей // Учебные записки Московского государственного университета, 1935. Вып. 4. С. 45-61.
24. Свириденко П.А. Лесные мыши Северного Кавказа и Предкавказья // Бюллетень научно-исследовательского института московского государственного университета, 1936. № 3. С. 71-87.
25. Тарасов М.П. Определитель грызунов и зайцеобразных Северного Кавказа. Ставрополь, 2002. 80 с.
26. Тарасов М.П. Природные очаги туляремии на Кавказе: Авто-

- реферат диссертации доктора биологических наук. Саратов, 1991. 31 с.
27. Темботов А.К. Определитель млекопитающих Северного Кавказа. Нальчик, 1965. 88 с.
 28. Темботова Ф.А. Млекопитающие Кавказа и омывающих его морей. Определитель. Москва. Товарищество научных изданий КМК, 2015. 352 с.
 29. Ткаченко В.И. Особенности экологии некоторых грызунов-норников на поливных землях Восточного Ставрополя // Фауна Ставрополя. Ставрополь, 1992. Вып. 4. С.109-112.
 30. Транквилевский Д.В. Об инфицированности мелких млекопитающих возбудителями зоонозов в Российской Федерации // Здоровье населения и среда обитания, 2016. № 10 (283). С. 53-56.
 31. Транквилевский Д.В., Квасов Д.А., Мещерякова И.С. и др. Вопросы организации мониторинга природных очагов инфекций опасных для человека. Планирование, проведение и анализ результатов полевых наблюдений // Здоровье населения и среда обитания, 2014. № 8 (257). С. 38-43.
 32. Транквилевский Д.В., Удовиков А.И., Попов В.П. и др. Состояние численности грызунов и эпидемиологическая обстановка по туляремии на территории Российской Федерации во втором полугодии 2014 г. и прогноз на 2015 г. // Проблемы особо опасных инфекций, 2015. № 1. С. 30-35.
 33. Транквилевский Д.В., Царенко В.А., Жуков В.И. Современное состояние эпизоотологического мониторинга за природными очагами инфекций в Российской Федерации // Медицинская паразитология и паразитарные болезни, 2016. № 2. С. 19-24.
 34. Формозов А.Н. Заметки о млекопитающих Северного Кавказа // Ученые записки Северо-Кавказского института краеведения. Владикавказ. 1926. Т. 1. С. 31-42.
 35. Хе В.Х. К истории изучения мышей рода *Apodemus* Центрального Предкавказья // Фауна Ставрополя. Ставрополь, 2003. Вып. 11. С. 113-125.
 36. Хе В.Х. Об особенностях жизнедеятельности мелких млекопитающих Ставропольской возвышенности // Проблемы развития биологии на Северном Кавказе. Ставрополь, 1999. С. 51-53.
 37. Хе В.Х., Котти Б.К. Мелкие млекопитающие Прикалаусских высот // Проблемы развития биологии и химии на Северном Кавказе. Ставрополь, 2001. С. 77-78.
 38. Шальнев В.А. Эволюция ландшафтов Северного Кавказа. Ставрополь. Издательство Ставропольский государственный университет, 2007. 310 с.
 39. Шальнев В.А. Эволюция ландшафтов Северного Кавказа. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук. Ставрополь. 2007. 45 с.

References

1. Byome L.B. To animal biology of the North Caucasus. Separate print of the publishing house of the North Caucasus Institute of Local History. Vladikavkaz, 1925b, p 15.
2. Byome L.B. To the biology and distribution of some rodents of the North Caucasus. Vladikavkaz, 1925a, p. 45.
3. Vereshchagin N.K. Mammals of the Caucasus. Moskva; Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1959, p. 704.
4. Verzhuckij D.B. The current state of Zoological work to ensure the epidemiological welfare of Russia. Baikal Zoological Journal, 2013, no 1 (12), pp. 109-112.
5. Dal' S.K. Landscape-ecological sketch of vertebrates in places of possible natural foci of brucellosis in the Stavropol Territory. Proceedings of the Research Anti-Plague Institute of the Caucasus and Transcaucasia, 1959, Vol 2, pp. 34-65.
6. Karaseva E.V., Telicyna A.YU. Methods for the study of rodents in the field. Counting and flagging. Nauka – The science, 1996, p. 227.
7. Kistyakovskij A.V. Materials on the distribution of rodents in the steppes of the Pre-Caucasus. Fight against rodents in the steppes of the Pre-Caucasus. Rostov-na-Donu, 1935, pp. 43-46.
8. Korenberg E.H.I. Ways to improve the epidemiological surveillance of natural focal infections. Epidemiology and vaccine prevention, 2016, no 6, pp. 18-29.
9. Kucheruk V.V. Quantitative accounting of the most important species of harmful rodents and shrews. Methods of accounting for the number and geographical distribution of terrestrial vertebrates. Moskva, 1952, pp. 9-47.
10. Kucheruk V.V. Synanthropic rodents and synanthropy forms. Disinfection Case, 2000, no 2, pp. 61-65.
11. Lavrova M.YA. Rodents of forest shelter belts of the Stavropol and Salsk steppes. Transactions of the Institute of Geography of the Academy of Sciences of the USSR, 1955, Vol 66, pp. 34-56.
12. Levchenko B.I., Tihenko N.I., Tarasov M.P., Bryuhanov A.F., Karshin S.P., Degtyaryova L.V. The influence of anthropogenic impact on the species composition and number of small mammals in the natural foci of steppe-type tularemia of the Stavropol Territory. Proceedings of the scientific conference on zoonotic and other infectious diseases. Stavropol, 1994, pp. 47-60.
13. Markova M.Yu., Sigida S.I., Purmak K.A. The structure of the population of small mammals in the Stavropol Territory in 2015-2017. Disinfection Case, 2018. no 4 (106), – pp. 53-61.
14. MU 3.1.1029-01 Catching, accounting and forecasting of the number of small mammals and birds in natural foci of infections.
15. Obolenskij S.I. Rodent fauna of the steppes of the Pre-Caucasus. Fight against rodents in the steppes of the Pre-Caucasus (collection of articles on the work of 1932-1934). Rostov-na-Donu, 1935, pp. 32-41.

16. Ogniyov S.I. Rodents of the North Caucasus. Rostov-na-Donu, 1924, p. 61.
17. Pavlinov I.YA., Lisovskij A.A. Mammals of Russia: a systematic-geographical guide. Moskva. Tovarishestvo nauchnyh izdaniy KMK, 2012, p. 604.
18. Pilipenko V.G., SHCHekina T.A. Some results of a long-term study of the structural features of the natural focus of steppe-type tularmia in the Stavropol Territory. Carriers of particularly dangerous infections and fight off. Stavropol, 1970, pp. 483-498.
19. Prikaz Rukovoditelya federalnoy sluzhby po nadzoru v sfere zashchity prav potrebiteley i blagopoluchiya cheloveka 14.01.2013 no 6 «Order of the Head of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare of January 14, 2013 no. 6 "On Approval of the Guidelines for the Review and Forecast of the Number of Small Mammals and Arthropods. Disinfection Case, 2013. no 1, pp. 51-56.
20. Prokofeva Z.V. Species composition and number of rodents in different landscapes of Stavropol. Proceedings of the all-union scientific research institute of plant Protection. Adaptive variability of rodents. Stavropol, 1969, Vol. 30, part 1, p. 34-51.
21. Prokofeva Z.V. Mapping the number of small mouse-like rodents in the territory of the steppe tularmia nidus in the Stavropol Territory. Particularly dangerous infections in the Caucasus. Stavropol, 1966. – pp. 86-91.
22. Prokofeva Z.V. (1968). Distribution and dynamics of the number of rodents in the Stavropol Territory. Extended abstract of candidate thesis, Leningrad, 17p.
23. Sviridenko P.A. Rodents of the North Caucasus and the pre-Caucasus steppes. Teaching notes of the Moscow State University. 1935, Vol. 4, pp. 45-61
24. Sviridenko P.A. Forest mice of the North Caucasus and Ciscaucasia. Bulletin of the Moscow State University Research Institute, 1936, no 3, pp. 71-87.
25. Tarasov M.P. Key to rodents and lagomorphs of the North Caucasus. Stavropol, 2002, 80 p.
26. Tarasov M.P. Natural foci of tularmia in the Caucasus. Extended abstract of doctor's thesis, Saratov, 1991, 31 p.
27. Tembotov A.K. The determinant of mammals of the North Caucasus. Nalchik, 1965, 88 p.
28. Tembotova F.A. Mammals of the Caucasus and the seas washing it. Determinant. Moskva. Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2015, 352 p.
29. Tkachenko V.I. Ecological features of some rodents-nornikov on irrigated lands of Eastern Stavropol. Fauna of Stavropol. Stavropol, 1992, Vol. 4, pp. 109-112.
30. Trankvilevsky D.V. About infection of small mammals with pathogens of zoonoses in the russian federation. Health and environment, 2016, no 10 (283), pp. 53-56.

31. Trankvilevskiy D.V., Kvasov D.A., Mescheryakova I.S., Mikhaylova T.V., Kormilitsyna M.I., Demidova T.N., Ananyina Yu.V., Savelyeva O.V., Malkin G.A., Mutnykh E.S., Korotina N.A., Dzagurova T.K., Prostakov N.I., Surkov A.V., Kurolap S.A., Klepikov O.V., Stepkin Yu.I., Chubirko M.I., Zhukov V.I. Questions organization monitoring the natural foci of infections are dangerous to humans. Planning, conducting and analyzing the results of field observations. Health and environment, 2014, no 8 (257), pp. 38-43.
32. Trankvilevsky D.V., Udovikov A.I., Popov V.P., Zakharov K.S., Popov N.V., Bezsmertny V.E. Situation on Rodents Abundance and Epidemiological Situation on Tularmia in the Territory of the Russian Federation in the Second Half of 2014, and Prognosis for 2015. Problemy osobo opasnykh infekcij, 2015, no 1, pp. 30-35.
33. Trankvilevsky D.V., Tsarenko V.A., Zhukov V.I. Medical Parasitology and Parasitic Diseases. Medicinskaya parasitologia i parazitarnie bolezni, 2016, no 2, pp. 19-24.
34. Formozov A.N. Notes on the mammals of the North Caucasus. Proceedings of the North-Caucasian Institute of regional studies. Vladikavkaz, 1926, Vol. 1, pp. 31-42.
35. Khe V.Kh. To the history of the study of mice of the genus Apodemus of the Central Ciscaucasia. Fauna of Stavropol. Stavropol, 2003, Vol. 11, pp. 113-125.
36. Khe V.Kh. On the peculiarities of life activity of small mammals of the Stavropol Upland. Problems of the development of biology in the North Caucasus. Stavropol, 1999, pp. 51-53.
37. Khe V.Kh., Kotti B.K. Small mammals of Prikalaussky heights. Problems of the development of biology and chemistry in the North Caucasus. Stavropol, 2001, pp. 77-78.
38. Shalnev V.A. Evolution of landscapes of the North Caucasus Stavropol UnivSSU, 2007, 310 p.
39. Shalnev V.A. The evolution of the landscapes of the North Caucasus. Extended abstract of doctor's thesis. Stavropol, 2007, 45 p.

Рукопись поступила в редакцию 13.01.2019 г.

Принята к публикации 25.02.2019 г.

Об авторах

Сигида Сергей Иванович – доктор биологических наук, профессор кафедры общей биологии и биоразнообразия ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»; Scopus ID: ... , Researcher ID Phone: (8652) 33-08-55.
E-mail omophon@yandex.ru.

- Маркова** Марина Юрьевна – энтомолог ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Ставропольском крае», Scopus ID: ... , Researcher ID Phone: (8652) 29-83-70, E-mail: mari-markova@yandex.ru.
- Пурмак** Кристина Александровна – заведующий отделением мониторинга природно-очаговых и особо опасных инфекций ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Ставропольском крае», служеб. тел.: (8652) 29-83-70, E-mail: kristypurmak@mail.ru

About the authors

- Sigida** Sergey Ivanovich – Doctor of biological Sciences, professor of the Department of General biology and biodiversity, North-Caucasus Federal University. Researcher ID Phone: (8652) 33-08-55 E-mail omophon@yandex.ru
- Markova** Marina Yuryevna – Entomologist FBHI «Hygienic and Epidemiological Center in the Stavropol Territory»; Researcher ID Phone: (8652) 29-83-70, E-mail: mari-markova@yandex.ru
- Kristina** Alexandrovna Purmak – Head of Department of Monitoring natural-focal and Highly dangerous Infections of the for Hygiene and Epidemiology Center in the Stavropol Territory, Researcher ID Phone: (8652) 29-83-70, E-mail: kristypurmak@mail.ru

25.00.24
УДК 911.3:711.4

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, ПОЛИТИЧЕСКАЯ
И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

Шальнев В.А.
Каторгин И.Ю.
Юрин Д.В.
Самокиш М.А.

Северо-Кавказский федеральный университет,
г. Ставрополь, Россия

E-mail: rinyu@yandex.ru

ИСТОРИЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ
ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОЛЕДЕНЕНИЙ
ЗАПАДНОГО КАВКАЗА

Введение:

Изучение четвертичных оледенений Центрального и Западного Кавказа началось в конце XIX в. с учетом опыта европейских ученых по исследованию Альп. Наиболее полно динамика ледников этого времени была рассмотрена на примере долины левого притока Кубани - Теберды. Другие районы Западного Кавказа оказались слабо изученными. Маршрутные исследования с использованием геоинформационных методов по дешифрированию космоснимков позволили получить дополнительные сведения о других речных долинах Кубани и труднодоступных районах высокогорий. Это позволило привести в определенную систему величины длин ледников древних оледенений выделить заключительную стадию под названием «малый ледниковый период».

Материалы и методы исследований:

В данной работе для уточнения материалов полевых исследований были применены технологии трехмерного моделирования исследуемых территорий и картометрии с использованием расчета длин линейных пространственных объектов, рельефа в частности, по заданной поверхности с помощью модуля ArcGIS 3D Analyst. В качестве материала для создания 3D-моделей территорий и последующих картометрических расчетов были использованы космоснимки SPOT 7 (пространственное разрешение панхроматической съемки в надире 1,5 м) и данные SRTM, по которым были построены цифровые модели рельефа территорий (пространственное разрешение ≈ 90 м).

Результаты исследований и их обсуждение:

По результатам исследования была получена новая информация о древних оледенениях в труднодоступных участках Главного и Бокового Кавказского хребтов и тех районах, где эти исследования не проводились. Эти данные позволили систематизировать точки зрения разных авторов на эту проблему.

Выводы:

Выделена одна стадия среднечетвертичной фазы и восемь стадий отступления ледников верхнечетвертичной фазы оледенения. Лучше всего сохранились конечные моренные валы Каракельской, Гончирской, Аманауской, Алибекской и Птышской стадий в долинах Теберды и Учкулана. Они формируют ступенчатый продольный профиль днищ троговых долин, пересекающих Боковой хребет. Здесь обширные ровные участки «озерных четок» чередуются с более крутыми участками русел рек. Морены Джемагатской и Тебердинской стадий фактически не сохранились и границы ледников можно условно проследить только по «озерным четкам». В то же время, сравнительный анализ данных о местоположении конечных стадийных моренных валов и «озерных четок» ранних стадий в изучаемом регионе показал близкие величины удаленности «языков» ледников от области питания. Следы Птышской и Чотчинской стадий прослеживаются во всех речных долинах Главного Кавказского хребта, но не всегда в полном наборе. Отмечались случаи формирования промежуточных стадийных морен Гончирской стадии в долине Учкулана (2 км ниже по течению от основной морены). Применение метода корреляции стадий конечных моренных валов с использованием абсолютных высот местоположения, предложенной Г.К. Тушинским, оказался востребованным только в пределах конкретного речного бассейна. Так, например, конечная морена Аманауской стадии в бассейне Теберды лежит на высоте 1640 м над у. м., а в бассейне Гондаря – на высоте 1800 м.

Ключевые слова:

стадии оледенения, троговые долины, «озерные четки», стадийные морены.

Shalnev V.A.
Katorgin I.Y.
Yurin D.V.
Samokish M.A.

North Caucasus Federal University,
Stavropol, Russia

E-mail: rinyu@yandex.ru

The history of the construction of the quaternary glaciations of the Western Caucasus

Introduction:

The study of the Quaternary glaciations of the Central and Western Caucasus began at the end of the nineteenth century. taking into account the experience of European scientists to study the Alps. The dynamics of the glaciers of this time were most fully examined by the example of the valley of the left tributary of the Kuban - Teberda. Other areas of the Western Caucasus have been poorly studied. The route studies using geoinformational methods for the interpretation of satellite images provided additional information on other river valleys of the Kuban and hard-to-reach areas of highlands. This allowed to bring to a certain system the magnitudes of the lengths of glaciers of ancient glaciations to distinguish the final stage called the "Little Ice Age".

Materials and research methods:

In this work, three-dimensional modeling of the studied territories and cartometry were applied to clarify the field research materials using the calculation of the lengths of linear spatial objects, relief in particular, over a given surface using the ArcGIS 3D Analyst module. SPOT 7 satellite images (spatial resolution of the panchromatic survey in the 1.5 m nadir) and SRTM data were used as material for creating 3D-models of the territories and SRTM data, which were used to construct digital models of the relief of the territories (spatial resolution ≈ 90 m).

Research results and their discussion:

According to the research results, new information was obtained about ancient glaciations in hard-to-reach areas of the Main and Lateral Caucasus ranges and those areas where these studies were not conducted. These data allowed to systematize the points of view of different authors on this problem.

Conclusions:

One stage of the Middle Quaternary phase and eight stages of the retreat of glaciers of the Upper Quaternary glaciation phase have been identified. The finite moraine ramparts of the Karakel, Gonachkhir, Amanauz, Alibek and Pтыsk stages in the valleys of Teberda and Uchkulan are best preserved. They form a stepped longitudinal profile of the bottoms of the trough valleys that cross the Lateral Ridge. Here, extensive flat areas of the "lake rosary" alternate with steeper sections of the river beds. The moraines of the Dzhemagatskaya and Teberdinskaya stages are not actually preserved and the borders of the glaciers can be conditionally traced only along the "lake rosary". At the same time, a comparative analysis of data on the location of the final staged moraine shafts and the "lake rosary" of the early stages in the studied region showed close values of the distance between the "tongues" of glaciers and the field of nutrition. Traces of the Pтыsh and Chotchinsk stages can be traced in all the river valleys of the Greater Caucasus Mountain Range, but not always in their entirety. Cases of the formation of intermediate stage moraines of the Gonachkhir stage in the Uchkulan valley (2 km downstream from the main moraine) were noted. Application of the method of correlation of the stages of the final moraine shafts using the absolute altitudes of the location proposed by GK Tushinsky, turned out to be in demand only within a particular river basin. For example, the final moraine of the Amanauz stage in the Teberda basin lies at an altitude of 1640 m above sea level. m, and in the pool Gondaraya - at an altitude of 1800m.

Key words:

glaciation stages, trough valleys, "lake rosary", stage moraines.

ВВЕДЕНИЕ

Четвертичные оледенения оказали большое влияние на формирование облика рельефа и ландшафтов Главного Кавказского и Бокового хребтов Западного Кавказа и формирование современного облика троговых долин, «лестниц» древних кары, моренных озер и «бараньих лбов». В результате деятельности ледников сформировались удивительные и уникальные палеогляциальные ландшафты среднегорий и высокогорий, пейзажные образы которых привлекают сюда большое количество любителей красивой природы и туристов. Реакция ледников на изменение климата включает в себя сложную цепь процессов [1, 2]. Ледники этого времени отступали не сразу. Процесс их сокращения затягивался на длительный срок и прерывался длительными задержками, во время которых успевали формироваться конечные стадийные моренные валы и после отступления ледника моренные озера. Изменялись и процессы тепловлагообмена в троговых долинах, что влияло на климатические условия и динамику в смене высотных геоботанических поясов [3]. В настоящее время это необходимо учитывать при реализации различных программ, решающих сложные комплексные проблемы развития горных территорий данного региона, связанные с сохранением экологического равновесия [4]. Возникают здесь аналогии и с современным состоянием ледников, площади которых сокращаются, что сказывается на водности бассейнов рек Кубани и Терка.

История древних оледенений Большого Кавказа привлекла рельефа в конце XIX – начале XX веков. В ранних публикациях И.В. Мушкетова [5], А.Л. Рейнгарда [6, 7, 8], Л.А. Варданянца [9, 10], Г.Ф. Мирчинка [11] и В.Н. Олюнина [12] озвучен первый опыт осмысления этой проблемы. Изучение этих материалов показал отсутствие единого мнения не только о количестве фаз и стадий четвертичных оледенений, их периодике, но и их названий. Так, Л.А. Варданянц и В.Н. Олюнин используют терминологию оледенений, принятую для горной системы Альп, выделяя три фазы оледенений (бюль, гшниц и даун) и 8–9 стадий отступления ледников. Последняя стадия оледенения у них называется «современной XX века», а 7 и 8 – исторической (XVII–XIX вв.), что созвучно с современной трактовкой «малого ледникового периода», вызвавшего в равнинной части Европы похолодание, а в горах Большого Кавказа положительную динамику ледников. А.Л. Рейнгард выделяет три стадии оледенения в пределах долины реки Теберды, используя терминологию смешанного типа и сохраняя альпийский вариант названий в сочетании с местными названиями. Так, стадию гшниц он называл Гоначхирской (по месту впадения р. Гоначхир в Теберду), а стадию даун – Аманаузской (река в районе Домбайской поляны, один из истоков Теберды).

Шесть стадий отступления ледников верхнечетвертичного времени выделяет Г.К. Тушинский [13, 14]. Учитывая специфику оледенений Западно-

го Кавказа, он дополняет список А.Л. Рейнгарда местными названиями стадий – Алибекской, Птышской и Чотчинской, заменяя Тебердинскую стадию на Каракельскую (по названию озера в пределах города-курорта Теберда). И.Н. Сафронов [15, 16] выделяет три фазы оледенений: нижнечетвертичную, среднечетвертичную и верхнечетвертичную. Первую он называет Кубанской, считая, что ледник долины Теберды достигал города Карачаевска. Однако следов этого оледенения не сохранилось и предполагаемый конечный моренный вал коррелируется с IX террасой рек Теберды и Кубани, описанной автором в районе Учкуланской котловины. По нашим наблюдениям можно предполагать, что этот ледник оставил свои следы в виде «озерной четки» и конечного моренного вала перекрытого конусом выноса в районе поселка Эльбрусского, расположенного на левом берегу Кубани. Ниже по течению реки Кубани, у впадения в нее правого притока Худеса, сохранился религиозный памятник карачаевского народа Камень Карчи, который по своему происхождению является вулканической породой – андезитом. Возможно, он был принесен сюда ледником нижнечетвертичного времени со склонов вулкана Эльбрус, последние извержения которого датируются I-II веками нашей эры [17]. Некоторые исследователи выделяют извержение, происходившее всего 900 лет назад. Далее внизу по течению реки Кубани, пересекающей Передовую хребет, заметных следов деятельности ледника не встречается. Долина реки имеет V-образную форму типичного горного ущелья, а не трога.

И.Н. Сафронов называет среднечетвертичное оледенение Тебердинским. Эти ледники были короче нижнечетвертичных и заканчивались перед эрозионными ущельями Передового хребта в районе аулов Верхняя Теберда и Карт-Джурт (долина Кубани). Конечные стадияльные морены сохранились плохо и коррелируются им с VIII террасой этих рек. При отступании ледников верхнечетвертичного времени формировались пять стадияльных морен – Джемагатская, две Каракельских, Гонахирская и Аманаузская. Используя местные названия различных стадияльных морен, автор тем самым подчеркивал региональные особенности и отличия оледенений Большого Кавказа от Алып.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе для уточнения материалов полевых исследований были применены технологии трехмерного моделирования исследуемых территорий и картометрии с использованием расчета длин линейных пространственных объектов, рельефа в частности, по заданной поверхности с помощью модуля ArcGIS 3D Analyst. Полученные в результате дешифрирования космоснимков предварительные данные о размещении стадияльных морен, длины древних ледников разных стадий отступления, «озерных четок», возникших на месте древних ледниковых озер, позволили создать карты-гипотезы с последующей их доработкой в процессе полевых исследова-

ний. Данные о длине ледников четвертичных оледенений, полученные методом дешифрирования космоснимков, отличаются от данных Г.К. Тушинского и И.Н. Сафронова, приведенных в их публикациях [13, 14, 15, 16]. Скорее всего, в общей длине ледников этими авторами не учитывались современные размеры ледников (табл. 1, 2). При определении длины современных ледников с овальной формой его «языка» исходной точкой отсчета считалось место выхода подледной реки, которое хорошо прослеживается на космоснимках. Однако есть и более сложные формы окончания ледника. Например, у ледника Алибек центральная и левая часть «языка» долгое время находилась на «бараньих лбах», поэтому таяние ледника здесь осуществлялось быстрее. От места выхода подледной реки длина такого ледника (данные 2014 г.) составила 4575 м. В правой части ледника, в условиях глубокой ложбины сформировался длинный «рукав языка» ледника с поверхностными моренами. В этом случае длина ледника составила 5090 м. В связи с этим в таблице 1 приводятся две цифры. Первая обозначает среднюю длину ледника, в скобках – от места выхода подледной реки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование палеогляциальных форм древних оледенений в современных ландшафтах Главного и Бокового хребтов Западного Кавказа проводилось в верховьях реки Кубани, ее левых притоков – Узункола, Учкулана, Теберды, Большого Зеленчука, а также в Южно-Юрской депрессии (Учкуланский и Архызский участки). В меридиональных эрозионно-тектонических долинах Бокового хребта отчетливо выражены троговые долины, имеющие два яруса рельефа – древнего верхнего и молодого нижнего трогов. Днища верхних трогов местами прослеживаются на высоте от 300 до 600 метров над современными руслами рек [15]. Магистральные троговые долины имеют переуглубленное ложе, что определяет образование висячих долин у их притоков. Перепады высот здесь могут достигать 20-400 м над руслом главной реки. На днищах современных трогов сохранились конечные моренные валы, с которыми связано формирование «озерных четок» на месте древних ледниковых озер, заполненных в последствии флювиогляциальными отложениями.

По времени формирования стадияльных морен и «озерных четок» выделены две фазы оледенения – среднечетвертичная и верхнечетвертичная, так как следы нижнечетвертичных оледенений с помощью космоснимков обнаружить не удалось. Верхнечетвертичная фаза оледенения насчитывала от 6 до 8 стадий стабилизации таяния ледников, что способствовало формированию конечных моренных валов. Названия этих стадий стабилизации взяты из публикаций Г.К. Тушинского и И.Н. Сафронова (табл. 1, 2) и приведены в единую систему. К ним добавлено название стадии «малого ледникового периода» [3].

Конечные моренные валы Каракельской, Гоначхирской, Аманаузской и Алибекской стадий хорошо сохранились. Весь их набор представлен в долинах Теберды и Гондарая, а также в истоках этих рек. Они отчетливо фиксируются «озерными четками» крупных размеров, длина которых достигает 2–3 км. В бассейне реки Узункол, левом притоке Уллукама, из названных стадий хорошо сохранились морены Гоначхирской, Алибекской и Птышской стадий. «Озерная четка» Птышской стадии оледенения здесь имеет большие размеры, до двух километров длины. Это связано с тем, что долина реки Мырды-Су относится к всеячому типу долин с малыми перепадами высот русла реки на больших расстояниях.

Таблица 1. ФАЗЫ И СТАДИИ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОЛЕДЕНЕНИЙ БАСЕЙНОВ РЕК ЗАПАДНОГО КАВКАЗА (БАСЕЙН Р. ТЕБЕРДЫ)
Table1 . Phases and stages of quaternary glaciations river basins of the Western Caucasus (The river basin of the Teberda)

Стадиальные морены бассейна реки Кубань	Бассейн р. Теберда (Сафронов, 1960)	Бассейн р. Теберды			
		От ледника Алибек		От ледника Птыш	
		Длина, км			
		L	ОЧ	L	ОЧ
Фазы и стадии четвертичных оледенений	Длина (L), км				
Средне-четвертичная Тебердинская	46,0	44,0	2,5?*	44,5	2,5?*
Верхне-четвертичная Джамагатская	29,0–32,0	34,0	1,4	34,2	1,4
Каракельская	26,0	31,0	3,2	31,5	3,2
Гоначхирская	12,0	17,3	2.25	17,8	2,25
Аманаузская	6,0-7,0	12,7	0,8	13,2	0,8
Алибекская	–	8,5	0,87	7,8	1,4
Птышская	–	–	–	4,5	0,4
Чотчинская	–	–	–	3,8	0,3
Малый ледниковый период	–	6,1	0,2	2,9	0,15
Современный ледник	–	4,6	(4,85)?**	1,9	–

В связи с этим «озерная четка» сильно заболочена, что дало название этой реки («мырды» с карачаевского языка – болото). Морена и «озерная четка» Каракельской стадии находятся уже в пределах долины Уллукама в районе аула Хурзук. Такая же морена, описана в долине реки Учкулан, на южной окраине аула Верхний Учкулан. Длина ледников этой стадии

Таблица 2. ФАЗЫ И СТАДИИ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОЛЕДЕНЕНИЙ БАСЕЙНОВ РЕК ЗАПАДНОГО КАВКАЗА (БАСЕЙНЫ РЕК ВЕРХОВИЙ КУБАНИ И БОЛЬШОГО ЗЕЛЕНЧУКА)
Table 2. Phases and stages of quaternary glaciations river basins of the Western Caucasus (the basins of the upper reaches of the Kuban and Bolshoy Zelenchuk)

Стадиальные морены бассейна реки Кубань	Бассейн верховий Кубани				Бассейн р. Большой Зеленчук			
	От ледника Мырды-Ауш долины р. Узункол и р. Уллукам		От ледника Гондарай долины р. Учкулан		От ледника долины р. Кизгыч		От ледника Псыш долины р. Псыш	
	Длина, км				Длина, км		Длина, км	
	L	ОЧ	L	ОЧ	L	ОЧ	L	ОЧ
Фазы и стадии четвертичных оледенений								
Средне-четвертичная Тебердинская	47,4	2,5?*	40,7	2,5?*	–	–	–	–
Верхне-четвертичная Джамагатская	36,2	3,0?*	34,2	2,8?*	–	–	–	–
Каракельская	29,7	3,6	29,0	2,35	23,2	–	31,0	3,2?*
Гоначхирская	16,3	0,7	16,2	1,53	13,9	2,2	14,8	2,4
Аманаузская	11,7	0,5?*	9,76	1,25	9,3	1,3	11,4	0,7
Алибекская	9,4	0,3	6,0	0,65	–	–	7,5	0,5
Птышская	5,9	1,9	–	–	5,0	0,35	3,6	0,5
Чотчинская	–	–	3,2	0,4	4,0	0,6	2,7	0,5
Малый ледниковый период	4,8	0,6	2,67	–	2,7	0,7	2,1	0,44
Современный ледник	3,0	–	1,56	–	0,9	–	0,93	–

Примечание к таблицам 1 и 2: ?* – Длина ледника определялась конечной частью «озерной четки», поскольку моренный вал не сохранился; ** Средняя длина ледника указана в точке выхода подледной части реки; ОЧ – «озерная четка»; L – длина, км.

достигала 29 км (рисунок). «Озерные четки» и в настоящее время сохраняют большие размеры, достигая 2,4 км и 3,6 км соответственно.

Полученные при дешифрировании космоснимков данные о длине ледников разных стадий верхнечетвертичных оледенений, сравнивались с величинами, приведенными в публикациях И.Н. Сафронова [15]. Имеются определенные расхождения. Видимо это связано, во-первых, с тем, что автор не учитывал длину современных ледников, а во-вторых, не указывались современные ледники, от которых велось измерение длины палеоледника. Например, ледник Тебердинской стадии формировался из трех основных центров оледенения – Алибекского, Аманаузского и Птышского.

Стадиальные морены верхнечетвертичного оледенения в бассейне реки Большого Зеленчука сохранились плохо. В долине Кизгыча описаны лишь конечные моренные валы и «озерные четки» Гончирской и Аманаузской стадий оледенения. Длина ледников здесь достигала 19 и 12 километров соответственно. При слиянии Кизгыча с рекой Псыш, у аула Архыз имеются следы срединной морены в районе Мертвого озера. Данное озеро можно сравнить с озером Каракель, которое находится в долине реки Теберды и дало название этой стадии оледенения. Конечная морена Каракельской стадии не сохранилась и условно фиксируется началом «озерной четки» Архызской котловины после «впадения» Кизгичского ледника в Псышский. И длина ледника тогда достигала всего 24–25 км.

Конечные морены заключительных стадий верхнечетвертичных оледенений формировались в районе истоков современных рек, которые обычно находятся в пределах Главного Кавказского хребта. Такие долины имеют небольшую длину (5–6 км) и очень крутые склоны с активными денудационными процессами, формирующими конуса выноса и делювиально-коллювиальные склоны. Эти отложения часто перекрывают ледниковые отложения, что затрудняет дешифрирование космоснимков. Конечные морены и «озерные четки» Птышской и Чотчинской стадий имеются в долинах рек Птыша, Мырды-Су и Псыша. Здесь длина ледников (с учетом современных размеров) достигала у Чотчинской стадии 3–5 км, у Псышской – 4–5,5 км. Размеры «озерных четок» не превышали 0,3–0,6 км. У ледника Алибек эти стадиальные морены не прослеживаются. В верховьях Гондарая участок долины между моренами Чотчинской и Алибекской стадий имеет большой перепад высот. Крутизна склона местами достигает здесь 20°. В таких условиях «озерная четка», видимо, не могла формироваться, так как конечная морена быстро разрушалась и перекрывалась пролювиальными отложениями, формируемыми здесь конуса выноса.

Морены «малого ледникового периода» имеют небольшие размеры, но сохранились во всех речных долинах. Ледники за последние 200–250 лет отступили на 1,5–2,0 км. При этом длина ледников колебалась в пределах 2,5–6,0 км с учетом длины современных ледников (табл. 1, 2). Их «озерные четки» хорошо читаются на космоснимках и имеют размеры от 300 до 700 м.

Современная эпоха характеризуется довольно быстрым и устойчивым отступанием ледников Большого Кавказа, приводя к сокращению их площади и запасов воды в ледниках. При этом в Центральном и Западном Кавказе отмечается рост количества ледников за счет распада крупных образований. В Западном Кавказе число ледников сократилось на 11%, а их динамика за последние 120 лет носило индивидуальный характер. Так, ледник Алибек за период с 1875 по 1954 годы отступал со средней скоростью 6–16 м в год, что составило величину 770 м. Затем скорость таяния менялась, уменьшаясь до годовых величин 0,6–2,0 м со знаком минус, а в отдельные годы и со знаком

плюс. С 1998 года таяние ледника усиливается (11–21 м/год) и к 2007 г. ледник (его левая часть) отступает на 120 м [18, 19].

Совсем другой режим таяния был у Аманаузского ледника, расположенного в верховьях реки Псыш, одного из истоков Б. Зеленчука. Здесь, по данным Н.И. Иванова, в период с 1908 по 1931 годы отмечалась положительная динамика, что увеличило длину ледника на 850 м. В последующие 34 года годовая скорость таяния ледника возрастает до 20 м, и он отступает на 700 м. В 90-е годы ледник отступает еще на 65 м. Можно предполагать, что региональные различия в таянии ледников проявлялись также и в разные эпохи верхнечетвертичных оледенений, что сказывалось на длине ледников и величине конечных моренных валов. Видимо, поэтому И.Н. Сафронов выделяет два этапа в отступании ледника Каракельской стадии.

ВЫВОДЫ

Полученные данные позволили систематизировать точки зрения разных авторов, изучающих эту проблему. Бесспорными являются две фазы древних оледенений – среднечетвертичная и верхнечетвертичная. Выделены также восемь стадий отступления ледников верхнечетвертичной фазы. Лучше всего сохранились конечные моренные валы Каракельской, Гончирской, Аманаузской и Алибекской стадий. Их мощные моренные валы формируют ступенчатый продольный профиль долин, пересекающих Боковой хребет. Здесь обширные ровные участки «озерных четок» чередуются с более крутыми участками русел рек. Морены Джемагатской и Тебердинской стадий фактически не сохранились и границы ледников можно условно проследить только по «озерным четкам». Сравнительный анализ данных о местоположении конечных моренных валов и «озерных четок» ранних стадий в изучаемом регионе показал близкие величины удаленности «языков» ледников от области питания. Следы Птышской и Чотчинской стадий прослеживаются во всех речных долинах Главного Кавказского хребта, но не всегда в полном наборе. Отмечались случаи формирования промежуточных стадиальных морен Гончирской стадии в долине Учкулана (2 км ниже по течению от основной морены). Применение метода корреляции стадий конечных моренных валов с использованием абсолютных высот местоположения, предложенной Г.К. Тушинским, оказался востребованным только в пределах конкретного речного бассейна. Так, например, конечная морена Аманаузской стадии в бассейне Теберды лежит на высоте 1640 м над у. м., а в бассейне Гондарая – на высоте 1800 м.

Библиографический список

1. Kargel, J.S., G.J. Leonard, M.P. Bishop, A. Kaab, B. Raup (Eds.): Global Land Ice Measurements from Space (Springer- Praxis). 33 chapters, 876 pp. DOI: 10.1007/978-3-540-79818-7, 2014.
2. Kozachek, A., Mikhaleiko, V., Masson-Delmotte, V., Ekaykin, A.,

- Ginot, P., Kutuzov, S., Legrand, M., Lipenkov, V., and Preunkert, S.: Large-scale drivers of Caucasus climate variability in meteorological records and Mt Elbrus ice cores, *Clim. Past Discuss.*, DOI:10.5194/cp-2016-62, in review, 2016.
3. Шальнев В.А., Ковалева Т.В., Настатуха Д.С. Древние оледенения и трансформация высотной поясности среднегорных и высокогорных ландшафтов Западного Кавказ (на примере долины Гондарая) // Вестник СКФУ. Наука. Инновации. Технологии. 2016. – Вып.1.
 4. Вайнгартнер Р., Гуня А.Н. Значение гор и необходимость активного участия в горных программах // Устойчивое развитие горных территорий. Т.8. 2016. N 2. С. 120– 126.
 5. Мушкетов И.В. Геологический очерк ледниковой области Теберды и Чхалты на Кавказе / Труды Геол. комитета. Т. XIV. 1896. №4.
 6. Рейнгард А.Л. Стадии отступления делювиальных ледников в бассейнах рек Теберды и Кубани // Изв. Кавк. отд. Русск. географич. об-ва. Т. XXIII. 1915. – №2.
 7. Рейнгард А.Л. Гляциально-морфологические наблюдения в бассейнах Кубани и Кодора на Кавказе летом 1924 г // Изв. Госуд. географич. об-ва. Т. 58. 1926.
 8. Рейнгард А.Л. К проблеме стратиграфии ледникового периода Кавказа / Труды Совет. секции международ. ассоциации по изучению четверт. периода. 1937. – Вып 1.
 9. Варданыц Л.А. О новом способе подсчета депрессий снеговой границы в связи с изучением стадий отступления ледников // Изв. Русск. географ. об-ва. Т. XIII. 1930. №2.
 10. Варданыц Л.А. Постплиоценовая история Кавказско-Черноморско-Каспийской области. Изд. АН Армянской ССР. Ереван, 1948.
 11. Мирчинк Г.Ф. Соотношение четвертичных континентальных отложений Русской равнины и Кавказа // Изв. ассоциаций научно-исслед. Ин-тов. Москва, 1929.
 12. Олюнин В.Н. К истории оледенения на юго-востоке Кабардинской АССР / Труды ин-та Географии АН СССР. 1953. – Вып. 58.
 13. Тушинский Г.К. Современное и древнее оледенение Тебердинского района // «Побежденные вершины». Ежегодник советского альпинизма, 1949.
 14. Тушинский Г.К. Геоморфологический очерк Тебердинского государственного заповедника / Труды Тебердинского гос. заповедника. Ставрополь, 1957.
 15. Сафронов И.Н. О древнем оледенении Северо-Западного Кавказа / Сборник трудов СГПИ, 1960. - Вып. 18.
 16. Сафронов И.Н. Геоморфология Северного Кавказа. Ростов-н/Д: Изд-во РГУ, 1969.
 17. Богатилов О.А. Основные циклы эволюции вулкана Эльбрус (Северный Кавказ, Россия) по данным ЭПР датирования кварца / О.А. Богатилов, А.Г. Гурбанов, Д.Г. Кошуг и др. // Вулканология и сейсмология. 2003. № 3.
 18. Панов В.Д., Ильичев Ю.Г., Салпагаров А.Д. Колебания ледников

Северного Кавказа за XIX–XX столетия. Кисловодск; Изд-во Северокавказского МИЛ.2008.

19. Шальнев В.А. Конева В.В. История изучения и современных ландшафтов Тебердинского заповедника. Ставрополь; Изд-во «Сервисшкола», 2014.

References

1. Kargel, J.S., G.J. Leonard, M.P. Bishop, A. Kaab, B. Raup (Eds.): Global Land Ice Measurements from Space (Springer- Praxis). 33 chapters, 876 pp. DOI: 10.1007/978-3-540-79818-7, 2014.
2. Kozachek, A., Mikhaleiko, V., Masson-Delmotte, V., Ekaykin, A., Ginot, P., Kutuzov, S., Legrand, M., Lipenkov, V., and Preunkert, S.: Large-scale drivers of Caucasus climate variability in meteorological records and Mt Elbrus ice cores, *Clim. Past Discuss.*, DOI:10.5194/cp-2016-62, in review, 2016.
3. Shalnev V. A., Kovaleva T. V., Nastatucha D.S. Ancient glaciation and the transformation of altitudinal zonation middle and high mountainous landscapes of the Western Caucasus (on the example of the valley Gjndaray)//Bulletin of the NCFU. Science. Innovation. Technology. 2016. Vol. 1.
4. Weingartner R., Gunya A.N. The value of mountains and the need for active participation in the international mountain programmes. Sustainable Development of Mountain Territories, 2016, Vol. 8, No. 2, pp. 120–126 (in Russian).
5. Mushketov I. V. Geologic essay of the glacial region of Teberda and Chally in the Caucasus / Proceedings of GEOL. Committee. T. XIV. 1896. No. 4.
6. Reinhard A. L. Stage of the recession diluvial glaciers in the basins of the rivers Teberda and Kuban, *Izv. Kavko. dep. Russian. geographic. society*. T. XXIII. 1915. №2.
7. Reinhard, A. L., Glacial-morphological observations in the basins of the Kuban, Kodori and on the Caucasus in the summer of 1924, *Izv. GOV't. geographic. society*. Vol. 58. 1926.
8. Reinhard A. L. To the problem of the stratigraphy of the glacial period the Caucasus / the Works Council. sections of the international. Association for the study quarter. period. 1937. Vol 1.
10. Vardanyants, L. A. On a new method of calculating the depression of the snow line in connection with the study of the stages of the glacier recession, *Izv. Russian. geographer. society*. T. XIII. 1930. №2.
11. Vardanyants, L. A. Post pliocene the history of Caucasian-black sea-Caspian region. Ed. Of Sciences of the Armenian SSR. Yerevan, 1948.
12. Mirchink G. F. Correlation of Quaternary continental deposits of the Russian plain and Caucasus, *Izv. associations nauchno-issled. In-tov. Moscow*, 1929.
13. Olenin, V. N. The history of glaciation in the South-East of the Kabardian ASSR / Proceedings of the Institute of Geography, USSR Academy of Sciences. 1953. – Vol. 58.

14. Tushinsky, G. K. Geomorphological essay of the Teberdinsky state reserve / Proceedings of the Teberdinsky state reserve. Stavropol, 1957.
15. Safronov I. N. About the ancient glaciation of the Northwest Caucasus / the Collection of works, Saratov state pedagogical University, 1960. Vol. 18.
16. Safronov I. N. Geomorphology Of The North Caucasus. Rostov n/D: Izd-vo RGU, 1969.
17. Bogatkov O. A. Main stages of the evolution of the volcano Elbrus (Northern Caucasus, Russia) according to the ESR Dating of quartz / O. A. Bogatkov, A. G. Gurbanov, D. G. Kosov etc. // Volcanology and seismology. 2003. No. 3.
18. Panov V. D, Ilyichev I. G., Salpagarov A. D. Fluctuations of glaciers of the North Caucasus in the XIX-XX century. Kislovodsk; publishing house of the North Caucasus MIL.2008.
19. Shalnev, V. A. Koneva, V. V. History of studies and modern landscapes of Teberda reserve. Stavropol, Publishing house "Servisol", 2014.

Поступила в редакцию 18.12.2018 г.

Принята к публикации 25.02.2019 г.

Об авторах

- Шальнев** Виктор Александрович – доктор географических наук, профессор, кафедры физической географии и кадастров, Scopus ID: 57196120913; E-mail: 470524@yandex.ru
- Каторгин** Игорь Юрьевич – кандидат географических наук, доцент, Институт математики и естественных наук Северо-Кавказского федерального университета, E-mail: katorgin1974@mail.ru
- Юрин** Дмитрий Викторович – кандидат географических наук, доцент, Институт математики и естественных наук Северо-Кавказского федерального университета, E-mail: rinyu@yandex.ru
- Самокиш** Мария Андреевна – аспирант кафедры физической географии и кадастров E-mail: marifsamokish@mail.ru

About the authors:

- Shalnev** Viktor Aleksandrovich - Doctor of Geography, Professor, Department of Physical Geography and Cadastres, E-mail: 470524@yandex.ru
- Katorgin** Igor Yuryevich - Candidate of Geographical Sciences, Institute of Mathematics and Natural Sciences of the North-Caucasian Federal University, E-mail: katorgin1974@mail.ru
- Dmitry** Viktorovich Yurin - Candidate of Geographical Sciences, Institute of Mathematics and Natural Sciences, North-Caucasian Federal University, E-mail: rinyu@yandex.ru
- Samokish** Maria Andreevna - graduate student of the Department of Physical Geography and Cadastre, E-mail: marifsamokish@mail.ru

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ», № 1, 2019

25.00.24
УДК 911.3:711.4

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, ПОЛИТИЧЕСКАЯ
И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

Бадов А.Д.

Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова,
г. Владикавказ, Россия, badov@list.ru

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРЕСТУПНОСТИ В РОССИИ

Введение.

В статье исследуются особенности динамики числа правонарушений в России за 1990-2014 гг. Определена география преступности в пределах РФ. Выявлены существенные различия в динамике и уровне преступности по федеральным округам и регионам страны. Определены причины различий, а также геокриминалогические факторы (факторы риска), влияющие на состояние преступности в том или ином регионе. Обосновано, что одной из главных причин роста преступности в нашей стране является снижение уровня жизни людей. Особое внимание уделено латентности преступности, а также повышению темпов преступности в Центральном ФО. Показана география основных видов преступлений против личности.

Материалы и методы
исследования.

Для расчета уровня преступности географы чаще всего применяют наиболее простой показатель – общий коэффициент преступности (ОКП) – отношение числа преступлений за год на 1000 жителей (в ‰). ОКП довольно просто исчисляется и очень удобен для сравнения уровня преступности на разных территориях. Однако, вследствие весьма сложной структуры преступлений, их тяжести и направленности, влияния различных факторов, латентности (скрытости) преступлений и т.д. ОКП дает лишь приблизительную оценку ситуации. Вследствие этого, в геокриминалогии применяют множество других специальных показателей. Результаты исследований и их обсуждение. Рост уровня преступности за 1990–2014 гг. произошел во всех федеральных округах за исключением Северокавказского. При этом в округе в 2002–2004 гг. ОКП был менее 10‰, а в 2005–2007 гг. – более. Затем стало наблюдаться снижение ОКП. В результате ОКП Северного Кавказа был в 2,1 раза меньше, чем среднероссийский показатель. В регионах, с высоким уровнем преступности (Забайкальский и Приморский края, Хакасия, Тыва и др. много общих геокриминалогических факторов (факторов риска) и один из главных – при изобилии природных ресурсов – крайняя бедность населения, его деградация. В пятерку регионов с самым низким уровнем преступности в 2014 г. входили Чеченская Республика, Ингушетия, Дагестан, Карачаево-Черкесия и Тульская область. Латентность преступности в северокавказских республиках отмечалась выше. Тем не менее, на Северном Кавказе «работают» отдельные факторы, действительно влияющие на снижение преступности. Так, в Чечне сложился достаточно жесткий режим, существенно ограничивающий преступность. Важную роль имеют также местные традиции, которые имеют большое влияние и в других республиках. Единственный не северокавказский регион, входящий в «пятерку» – Тульская область, в которой, наряду с Рязанской и Белгородской областями, действительно низкий уровень преступности.

Выводы.

Снижение коэффициентов преступности (или сохранение их на прежнем уровне) возможно при улучшении экономической ситуации, снижении уровня безработицы, реального улучшения уровня и условий жизни населения.

Ключевые слова:

преступность, регионы, латентность, коэффициенты, геокриминалогия, факторы, уровень жизни, убийства и покушения на убийства, умышленные причинения тяжкого вреда здоровью, изнасилования.

Badov A.D.

North Ossetian State University after K.L. Hetagurov, Vladikivkaz, Russia,
badov@list.ru

Regional peculiarities of crime in Russia

Abstract.

In the article the peculiarities of the dynamics of the number of offenses in Russia for 1990-2014 are studied. The geography of crime within the Russian Federation has been determined. Significant differences in the dynamics and the level of crime by federal districts and regions of the country are revealed. The reasons of the differences, as well as the geocriminological factors (risk factors) that affect the state of crime in a given region are determined. It is justified that one of the main reasons for the growth of crime in our country is the deterioration of people's living standards. Particular attention is paid to the latency of crime, as well as to the increase in crime rates in the Central Federal District. The geography of the main types of crimes against the person is shown.

Materials and methods of research.

To calculate the crime rate, geographers most often use the simplest indicator – the total crime rate (TCR) – the ratio of the number of crimes per year per 1000 inhabitants (in ‰). TCR is quite simply calculated and is very convenient for comparing the level of crime in different territories. However, due to a very complex structure of crimes, their severity, the influence of various factors, the latency (secrecy) of crimes, etc. TCR provides only an approximate assessment of the situation. As a result, many other special indicators are used in geocryminology.

The results of the research.

The increase in crime rates in 1990-2014 occurred in all federal districts with the exception of the North Caucasus. At the same time in the district in 2002-2004 TCR was less than 10 ‰, and in 2005-2007 – more. Then there was a decline in TCR. As a result, the PCR of the North Caucasus was 2.1 times less than the average Russian indicator. In regions with a high level of crime (Zabaykalsky and Primorsky Krai, Khakassia, Tyva and others) there are many common geocryminological factors (risk factors) and one of the main factors, with abundant natural resources, there is extreme poverty of the population, its degradation.

The top five regions with the lowest crime rates in 2014 included the Chechen Republic, Ingushetia, Dagestan, Karachay-Cherkessia and the Tula region. Crime latency in the North Caucasian republics was noted above. However, in the North Caucasus “work” certain factors that actually affect the reduction of crime. So, in Chechnya, there was a fairly tough regime, significantly limiting crime. Local traditions also play an important role as they have a great influence in other republics as well. The only non-North Caucasian region included in the «five» is the Tula region, in which, along with the Ryazan and Belgorod regions, there is indeed a low crime rate.

Conclusion.

A decrease in crime rates (or keeping them at the same level) is possible with an improvement of the economic situation, decrease in the level of unemployment, real improvement of living conditions of the population.

Keywords:

crime, regions, latency, coefficients, geocriminology, factors, standard of living, murders and attempted murders, intentional infliction of grievous bodily harm, rape.

Введение

Среди отрицательных явлений в жизни общества на одно из первых мест можно поставить преступность. При этом темпы роста противоправных деяний значительно превышают темпы роста численности населения. Издержки федерального бюджета на правоохранительную деятельность составляют около 10% от общей суммы [3]. На уровень преступности в том или ином регионе оказывает влияние комплекс факторов: геокриминалогическое положение, природно-географические, демографические, социально-экономические, расселенческие и многие другие [1, 6, 10, 11, 12]. В связи с этим, географическое изучение преступности приобретает особую актуальность.

Материалы и методы исследования

Для расчета уровня преступности географы чаще всего применяют наиболее простой показатель – общий коэффициент преступности (ОКП) – отношение числа преступлений за год на 1000 жителей (в ‰). ОКП довольно просто исчисляется и очень удобен для сравнения уровня преступности на разных территориях [2].

Однако, вследствие весьма сложной структуры преступлений, их тяжести и направленности, влияния различных факторов, латентности (скрытости) преступлений и т.д. ОКП дает лишь приблизительную оценку ситуации. Вследствие этого, в геокриминалогии применяют множество других специальных показателей [2].

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ динамики ОКП в России в целом за 1990–2014 гг. показал, что если до 2007 г. преступность в нашей стране развивалась также как и общемировая, то после 2006 г. эта тенденция была нарушена. Россия пошла вразрез с общемировыми тенденциями. Бурный рост преступности, наблюдавшийся в 1990-х и начале 2000-х гг., сменился ее снижением.

В целом за 1990–2014 гг. ОКП в России вырос на 20,6% (табл. 1). То есть спад преступности, наблюдавшийся в 2007-2014 гг. не компенсировал бурного роста 1990–2006 гг.

Рост уровня преступности за 1990–2014 гг. произошел во всех федеральных округах за исключением Северокавказского. При этом в округе в 2002-2004 гг. ОКП был менее 10‰, а в 2005–2007 гг. – более. Затем стало наблюдаться снижение ОКП. В результате ОКП Северного Кавказа был в 2,1 раза меньше, чем среднероссийский показатель. Однако здесь есть некоторые нюансы. В ряде публикаций мы упоминали о латентности (скрытости) преступлений [2, 4, 5]. В мире в целом коэффициент латентности (ОКЛП) равен 2,0. В России же этот показатель равен 4–5 [2]. При этом самые низкие ОКЛП наблюдались в Центральной России (2–3,5), с некоторым повышением в Москве (4). Наиболее высокие коэффициенты латентности наблюдались как раз в республиках

Северного Кавказа (8–10,5) [2]. В последние годы латентность преступности, по мнению экспертов, существенно снизилась. Но, в то же время, наблюдается «экспорт» преступности из Чечни, Дагестана и Ингушетии в другие регионы, особенно, в Ставропольский край, Москву и Санкт–Петербург.

При изучении латентности преступлений необходимо также учитывать, что отдельные виды преступности «скрыты» по-разному. Так, наименее латентны убийства и причинения тяжкого вреда здоровью, а самыми латентными считаются кражи и взяточничество.

Судя по официальным данным, и в 1990 и в 2014 гг. самый высокий уровень преступности наблюдался в Дальневосточном ФО, вторым был Сибирский ФО, третьим – Уральский и четвертым – Северо-Западный. Эти регионы места не поменяли. В тоже время Южный ФО перебрался с пятого места на седьмое. У этого округа за 1990–2014 гг. уровень преступности повысился незначительно.

В Центральном ФО наблюдались самые высокие темпы роста уровня преступности. Вследствие этого, округ переместился с шестого на седьмое место. Улучшилось место Приволжского ФО.

Изменения наблюдались и среди субъектов Российской Федерации. В 1990-м г. в пятерку регионов с самым высоким уровнем преступности входили (по мере убывания ОКП): Тыва, Томская область, Приморский и Хабаровский края, Хакасия. В 2014 г. пятерка изменилась на 60%: Забайкальский край, Хакасия, Приморский край, Бурятия, Коми. Из прежнего состава оста-

Таблица 1. ОБЩИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ПРЕСТУПНОСТИ ПО ФЕДЕРАЛЬНЫМ ОКРУГАМ РФ ЗА 1990–2014 ГГ., в %
Table 1. Total crime rates by federal districts of the Russian Federation for 1990-2014, %

	1990 г.	1995 г.	2000 г.	2005 г.	2010 г.	2014 г.
РФ	12,43	18,57	20,14	24,84	18,39	14,99
ЦФО	8,82	14,55	15,62	20,83	15,63	13,32
СЗФО	13,05	21,89	22,76	23,84	17,15	14,74
ЮФО	12,58	15,26	17,90	17,23	14,80	13,03
СКФО	8,38	8,72	10,55	10,28	7,91	7,24
ПрФО	11,13	16,50	18,47	26,50	18,51	13,52
УрФО	14,34	23,71	29,74	33,79	23,70	17,64
СФО	14,62	22,76	24,23	28,92	23,78	20,38
ДФО	16,85	26,93	25,70	29,15	22,80	20,92
КрФО						10,55

Источник: Регионы России. Социально-экономические показатели. 2015: Стат. сб. / Росстат. М., 2015. 1266 с.

лись Приморский край и Хакасия. У «преступного лидера» России 1990 г. – Тывы показатель снизился ровно на треть.

Другая важнейшая особенность – вхождение в пятерку «лидеров» – европейского представителя регионов – Республики Коми. Ее показатели увеличились в 1,7 раза и здесь, по-видимому, сыграл свою роль пенитенциарный фактор.

В разработанной ранее идее пенитенциарного фактора подчеркивается, «что выявлена взаимосвязь между числом содержащихся заключенных и уровнем преступности...». В наиболее пенитенциарно нагруженных (т.е. с высокой плотностью пенитенциарных учреждений) регионах (Пермская область, Республика Коми) уровень преступности значительно выше, чем в окружающих территориях» [7: 50]. Одна из причин – бывшие заключенные, выходя на свободу, часто оседают недалеко от мест заключения. Иногда происходит рецидив. Бывшие заключенные объединяются в преступные группировки. Все это так или иначе сказывается на уровне преступности. В этих регионах высока рецидивная преступность. Классический пример обратного характера – Магаданская область, где с закрытием подавляющего большинства зон, уровень преступности снизился в 1,5 раза по сравнению с 1990-ми гг.

Проблема в пенитенциарно-нагруженных регионах обострилась в связи с отменой в 1993 г. уголовной ответственности за нарушение правил административного надзора, а с 2002 г. – института административного надзора.

Приморский и Хабаровский края, помимо всего прочего, так же пенитенциарно перегружены. Кроме того, оба региона находятся на наркотрафи-

Таблица 2. ДИНАМИКА ОБЩИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРЕСТУПНОСТИ ПО ФЕДЕРАЛЬНЫМ ОКРУГАМ РФ ЗА 1990-2014 ГГ., в %
Table 2. Total crime dynamics rates by federal districts of the Russian Federation for 1990-2014, in%

	1995 г. к 1990 г.	2000 г. к 1995 г.	2005 г. к 2000 г.	2010 г. к 2005 г.	2014 г. к 2005 г.	2014 г. к 1990 г.
РФ	149,4	108,4	123,3	74,0	81,5	120,6
ЦФО	163,8	108,1	133,3	75,0	85,2	151,0
СЗФО	167,7	104,0	104,7	71,9	85,9	112,9
ЮФО	121,3	117,3	96,3	85,9	88,0	103,6
СКФО	104,1	121,0	97,4	76,9	91,5	86,4
ПрФО	148,2	111,9	143,5	69,8	73,0	121,4
УрФО	165,3	125,4	113,6	70,1	74,4	123,0
СФО	155,7	106,4	119,3	82,2	85,7	139,4
ДФО	159,8	95,4	113,4	78,2	91,7	124,1

Рассчитано по: Регионы России. Социально-экономические показатели. 2015: Стат. сб. / Росстат. М., 2015. 1266 с.

Таблица 3. ГЕОКРИМИНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ПРЕСТУПНОСТИ (ФАКТОРЫ РИСКА) ПО НЕКОТОРЫМ РЕГИОНАМ РФ
Table 3. Geocryminological factors of crime (risk factors) for some regions of the Russian Federation

Регионы	Факторы риска
Забайкальский край	Приграничное положение (контрабанда), обширные площади лесов («черные лесорубы»), месторождения золота (незаконная добыча), крайняя бедность населения (особенно в отдаленных районах), наркотрафик (наркотизация населения)
Республика Хакасия	Обширные площади лесов, месторождения золота, наркотрафик, исключительная бедность населения
Приморский край	Приграничное положение, богатые морские ресурсы, лесные ресурсы, производство наркотических веществ и наркотрафик из-за рубежа, высокая плотность пенитенциарных учреждений, бедность населения.

ках и являются поставщиками каннабиоидов. В краях действуют крупные группировки контрабандистов и т. д. [1, 8, 9]

Феномен Забайкальского края еще требует объяснений – здесь за 1990-2014 гг. ОКП вырос в два раза – больше, чем в каком-либо регионе России. Растет число убийств, тяжких и особо тяжких преступлений. Регион три года подряд (2013-2015 гг.) является первым в РФ по уровню преступности. В Забайкалье проблемы Приморского и Хабаровского краев сочетаются с весьма высоким уровнем безработицы. Особенно это касается отдаленных от Читы районов. Высока степень алкоголизации и наркотизации населения. Схожие проблемы и в Бурятии.

Из табл. 3 видно, что в регионах, вошедших в таблицу, много общих геокриминологических факторов (факторов риска) и один из главных – при изобилии природных ресурсов – крайняя бедность населения, его деградация.

В пятерку регионов с самым низким уровнем преступности в 2014 г. входили Чеченская Республика, Ингушетия, Дагестан, Карачаево-Черкесия и Тульская область.

Латентность преступности в северокавказских республиках отмечалась выше. Тем не менее, на Северном Кавказе «работают» отдельные факторы, действительно влияющие на снижение преступности. Так, в Чечне сложился достаточно жесткий режим, существенно ограничивающий преступность. Важную роль имеют также местные традиции, которые имеют большое влияние и в других республиках. Особняком стоит Дагестан, где очень высокая латентность преступлений. К тому же, значительная часть преступлений совершается с применением огнестрельного оружия.

Единственный не северокавказский регион, входящий в «пятерку» – Тульская область, в которой, наряду с Рязанской и Белгородской областями,



Рис. 1. Общие коэффициенты преступности по регионам РФ в 2014 г., в ‰.
Fig. 1. Total crime rates by regions of the Russian Federation in 2014, in ‰.

действительно низкий уровень преступности. В нашей стране подавляющее число противоправных деяний подразделяют на две основные группы: преступления против личности и экономическую преступность. В группу преступлений против личности включают убийства и покушения на убийство, умышленные причинения тяжкого вреда здоровью, изнасилования и покушения на изнасилования. Эта группа преступлений направлена непосредственно против личности.

К экономическим преступлениям относят грабежи, разбои, кражи и преступления в сфере экономики. Особняком стоят наркомания, незаконный оборот наркотиков, терроризм и некоторые другие виды.

Большинство видов преступлений против личности относят к тяжким и особо тяжким. В связи с этим, этой группе противоправных деяний уделяется особое внимание.

Общемировые тенденции по преступлениям против личности выявить крайне сложно. Это связано с различиями в подходах в разных странах и довольно частыми изменениями в Уголовных кодексах отдельных государств.

Главные относительные показатели, по которым производят исследования, это коэффициенты убийств и покушений на убийство (K_u), коэффициенты умышленного причинения тяжкого вреда здоровью ($K_{вз}$) и коэффициенты изнасилований и покушений на изнасилование ($K_{и}$) [4: 65].

В СССР и России динамика убийств и покушений на убийство была крайне неоднозначной. В 1970–1980-х гг. число убийств росло постепенно (около 2,5% в год). Но в конце 1980-х гг. и особенно в 1990-х гг. наблюдался существенный (до 5% в год)рост числа этого вида преступлений. Лишь после 2003 г. стало наблюдаться снижение числа убийств. Как и общая преступность, показатели K_u существенно зависят от экономической ситуации в стране. Падение

ние уровня жизни населения в 1980–1990 гг. привело к резкому росту преступности. Так же, как и дефолт 1998 г. и последующие экономические кризисы.

Как и с показателями общей преступности, K_y имели тенденцию увеличения с движением с запада на восток. Это наблюдалось и в 1990 и в 2014 г. Однако, в 1990 г. наблюдалось некоторое исключение: «лидером» был Сибирский федеральный округ. В 2015 г. все стало на свои места: самые низкие показатели были зафиксированы в СКФО, а самые высокие – в Дальневосточном.

В 2014 г. в разрезе регионов низкие K_y были зарегистрированы во всех регионах СКФО плюс Москва, Санкт-Петербург, Мордовия, Белгородская и Рязанская области (K_y менее 0,050‰), а самые высокие – на Алтае, в Бурятии, Тыве, Забайкалье и на Чукотке (K_y более 0,20‰ и более). Показатели Тывы в 20 раз превышали K_y Чеченской Республики. На протяжении 25 лет Тыва стабильно является «лидером» по коэффициентам убийств и покушений на убийство.

Умышленные причинения тяжкого вреда здоровью (УПТВЗ) весьма сопряжены с убийствами и покушениями на убийство. Тем более, что к последним часто ведут УПТВЗ. В уголовной статистике США если УПТВЗ привело по истечении некоторого времени к смерти потерпевшего, то это преступление квалифицируется как убийство. В нашей стране данное событие квалифицируется как УПТВЗ, приведшее к смерти потерпевшего.

За 1990–2002 гг. в стране наблюдался быстрый рост УПТВЗ, а за 2002–2014 гг. $K_{вз}$ снизился в 1,8 раза. Снижение существенное, но это ниже, чем коэффициент убийств (2,5 раза).

География $K_{вз}$ существенно отличалась от K_y . Наиболее высокие $K_{вз}$ наблюдались в Сибирском, Уральском и Дальневосточном округах (в сторону снижения). Таким образом, четкого тренда роста преступности с движением с запада на восток не наблюдалось.

В 2014 г. «лидером» остался Сибирский ФО. К нему по показателям существенно приблизился Дальневосточный ФО. Сравнительно низкий $K_{вз}$ наблюдался в Европейской части России. Среди регионов с очень высоким $K_{вз}$ были Тыва, Чукотка, Забайкальский край, Кемеровская, Иркутская и Сахалинская области. В группе с низкими $K_{вз}$ были почти все республики Северного Кавказа (без КЧР), Крым и Севастополь. Показатель Тывы был в 147 раз выше чеченского.

Изнасилование – одно из немногих видов преступлений, которые стабильно сокращались на территории России в течение последних 25 лет. Так, в целом по России $K_{и}$ за 1990–2014 гг. сократились почти в четыре раза. При этом в Южном ФО $K_{и}$ сократились в шесть раз, а в Дальневосточном – только в два раза. Снижение было настолько существенным, что уже в 2002 г. $K_{и}$ в России был весьма близким к показателям СССР 1960-х гг., а показатели 2014 г. были значительно ниже данных по СССР середины 1950-х гг. Значительное снижение $K_{и}$ в России специалисты объясняют значительным улучшением сексуальной грамотности населения [1: 67].



Рис. 2.

Коэффициенты умышленных причинений тяжкого вреда здоровью по регионам России в 2014 г., в ‰.

Fig. 2. The rates of intentional infliction of serious harm to health by regions of Russia in 2014, in ‰.

Как и следовало ожидать, и в 1990 и в 2014 гг. самые низкие показатели $K_{и}$ наблюдались в Северо-Кавказском ФО. Правда, в 2014 г. к Северному Кавказу (по показателям) присоединился Крым (табл. 1).

В 2014 г. довольно низкие показатели наблюдались в Центральном и Северо-Западном ФО. Несколько выше были $K_{и}$ в Южном ФО, близкие к среднероссийским – Приволжского ФО, а с движением на восток $K_{и}$ резко увеличивались, достигая максимума в Дальневосточном ФО. Картина, знакомая по общей преступности, убийствам и умышленным причинениям тяжкого вреда здоровью.

В 1990 г. очень низкие коэффициенты изнасилований были зафиксированы в Костромской области (0,047‰), Москве (0,045‰), Мурманской области (0,044‰), Дагестане (0,029‰), Ингушетии (0,041‰) и Чечне (0,041‰), а очень высокие – в Вологодской (0,270‰) и Кемеровской (0,172) областях, на Алтае (0,198‰) и в Тыве (0,576‰). Таким образом, в группе с очень низкими коэффициентами было три представителя Северного Кавказа, два – Центра и один – Северо-Запада. В группе с очень высокими коэффициентами были три региона из Сибири и один – из Северо-Запада.

Картина весьма сложная и куда более мозаичная, чем с коэффициентами убийств и умышленных причинений тяжкого вреда здоровью [1: 67]. Соотношение между минимальным $K_{и}$ (Дагестан, 0,029‰) и максимальным (Тыва, 0,576‰) составляло 1:20 [1: 67].

Таблица 4. ДИНАМИКА КОЭФФИЦИЕНТОВ ИЗНАСИЛОВАНИЙ И ПОКУШЕНИЙ НА ИЗНАСИЛОВАНИЕ ПО ФЕДЕРАЛЬНЫМ ОКРУГАМ РОССИИ ЗА 1990–2014 ГГ.
Table 4. Dynamics of rape and attempted rape rates by federal districts of Russia for 1990–2014

	Ки в ‰		Динамика Ки в %			
	1990 г.	2002 г.	2014 г.	2002 г. к 1990 г.	2014 г. к 2002 г.	2014 г. к 1990 г.
РФ	0,108	0,056	0,028	51,8	50,0	25,9
ЦФО	0,082	0,043	0,020	52,4	46,5	24,4
СЗФО	0,099	0,043	0,020	43,4	46,5	20,2
ЮФО	0,150	0,070	0,025	46,7	35,7	16,6
СКФО	0,086	0,044	0,018	51,2	40,9	20,9
ПФО	0,097	0,063	0,029	64,9	46,0	29,9
УФО	0,119	0,067	0,042	56,3	62,7	35,3
СФО	0,174	0,068	0,041	39,1	60,3	23,6
ДФО	0,103	0,054	0,051	52,4	94,4	49,5
КФО	0,013					

Источник: Регионы России. Социально-экономические показатели. 2015: Стат. сб. / Росстат. М., 2015. 1266 с.

Таблица 5. ГРУППИРОВКА РЕГИОНОВ РФ ПО ВЕЛИЧИНЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИЗНАСИЛОВАНИЙ И ПОКУШЕНИЙ НА ИЗНАСИЛОВАНИЕ В 2014 Г.

Очень низкий, менее 0,014‰	Низкий, 0,015-0,029‰
Белгородская (0,009), Липецкая (0,013), Рязанская (0,011), Тамбовская (0,012), тульская (0,014), Ненецкий (0,0), Вологодская (0,014), Санкт-Петербург (0,011), Дагестан (0,013), Ингушетия (0,006), Северная Осетия (0,013), Чечня (0,005), Мордовия (0,009), Нижегородская (0,013), Крым (0,012)	Брянская (0,026), Воронежская (0,019), Ивановская (0,025), Курская (0,026), Московская (0,022), Орловская (0,023), Смоленская (0,016), Ярославская (0,018), Москва (0,019), Карелия (0,027), Калининградская (0,016), Ленинградская (0,020), Мурманская (0,018), Новгородская (0,016), Краснодарский (0,019), Астраханская (0,021), Ростовская (0,021), Кабардино-Балкария (0,020), Ставропольский (0,026), Марий Эл (0,022), Татарстан (0,022), Пензенская (0,025), Самарская (0,017). ЯНАО (0,024), Челябинская (0,026), Кемеровская (0,028), Новосибирская (0,029), Томская (0,019), Севастополь (0,027)

Источник: Регионы России. Социально-экономические показатели. 2015: Стат. сб. / Росстат. М., 2015. 1266 с.

Еще более сложная картина наблюдалась в группировке регионов РФ по величине $K_{и}$ в 2003 г. [1: 67-68].

Группировка регионов по величине $K_{и}$ в 2014 г. приводится в табл. 5. Из нее видно, что в 2014 г. в РФ сложилась довольно неоднозначная ситуация. Таблица получилась крайне ассиметричной, со значительным перекосом в группы с очень низким и низким $K_{и}$ (30). В группе со средним $K_{и}$ 22 региона, с высоким – 4 и очень высоким – 9. В группе с очень низким $K_{и}$ – только регионы Европейской части страны. В группу с низкими $K_{и}$ добавилось незначительное число регионов Уральского и Сибирского ФО. В группе с очень высокими $K_{и}$ преобладали регионы Урала, Сибири и Дальнего Востока, но присутствовали и европейские регионы (Коми и Калмыкия). Соотношение между самым низким (Чечня, 0,005‰) и самым высоким (Тыва 0,213‰) $K_{и}$ составляло 1:43. В Ненецком АО в 2014 г. явление отсутствовало.

Республика Тыва являлась «лидером» по $K_{и}$ на протяжении 1990–2014 гг. Также она выделялась по показателям убийств и покушений на убийство, а также по коэффициентам умышленных причинений тяжкого вреда здоровью. Специфику образа жизни пока никто не отменял. Тем не менее, и в Тыве наблюдалось существенное (в 2,7 раза) снижение $K_{и}$ за обозреваемый период. Однако соотношение между минимальным и максимальным показателями за 1990–2014 гг. существенно увеличилось.

Прогнозировать динамику $K_{и}$ весьма сложно. Этот вид преступлений мало зависит от уровня жизни, который в последнее время падает.

Table 5. Grouping of regions of the Russian Federation in terms of rape and attempted rape ratios in 2014

Средний, 0,030-0,044‰	Высокий, 0,045-0,059‰	Очень высокий, 0,060‰ и более
Владимирская (0,034), Калужская (0,030), Костромская (0,030), Тверская (0,043), Волгоградская (0,036), Адыгея (0,040), Башкортостан (0,033), Кировская (0,035), Оренбургская (0,040), Ульяновская (0,032), Курганская (0,041), ХМАО (0,030), Тюменская (0,040), Бурятия (0,035), Алтайский (0,038), Красноярский (0,044), Омская (0,036), Хабаровский (0,043), Амурская (0,043), Магаданская (0,033), Сахалинская (0,038)	Пермский (0,046), Удмуртия (0,047), Карачаево-Черкесия (0,053), Чукотский (0,059)	Коми (0,061), Калмыкий (0,074), Свердловская (0,060), Алтай (0,126), Тыва (0,273), Хакасия (0,061), Забайкальский (0,085), Камчатская (0,085), Еврейская (0,071)

Выводы

Предварительные данные за 2015 г. показали, что спад преступности, продолжавшийся 8 лет, прекратился. Уровень преступности начал повышаться. Причем это повышение произошло в большинстве российских регионов. Это в очередной раз подтверждает влияние экономического фактора на уровень преступности. Так, экономический кризис в нашей стране в конце 1980-х – начале 1990-х гг. привел к резкому росту преступности. Дефолт 1998 г. привел к росту противоправных деяний во второй половине 1998 и в 1999 гг. [2: 33]. Очередной кризис, связанный с падением курса рубля, санкциями и контрсанкциями, привел к повышению уровня преступности в 2015 г. Благополучные 2010-е гг. способствовали снижению уровня преступности. Этот тезис не коррелируется с богатыми и весьма «преступными» Соединенными Штатами. Но там другая история, другие традиции, где у каждого второго имеется оружие.

Таким образом, снижение коэффициентов преступности (или сохранение их на прежнем уровне) возможно при улучшении экономической ситуации, снижении уровня безработицы, реального улучшения уровня и условий жизни населения.

Особое внимание необходимо уделить регионам юга Сибири и Дальнего Востока, где складывается крайне неблагоприятная ситуация.

Выявленная весьма сложная ситуация в Республике Тыва требует незамедлительной оптимизации ситуации. Несколько лучше положение в общероссийском «лидере» по общей преступности – Забайкальском крае.

Как уже упоминалось выше, в Чеченской Республике в кратчайшие сроки сумели выправить положение. Тем не менее, полностью копировать методы руководства Чечни было бы неправильным: другой менталитет и совершенно другая новейшая история.

Некоторые элементы противостояния криминальным процессам в Чечне можно было бы применить в такой специфичной республике как Тыва. Однако, прежде всего, здесь необходимо постепенно менять образ жизни населения, вовлечь его в трудовую деятельность. Срочно решать проблему снижения общей преступности, убийств и покушений на убийство необходимо в Забайкальском крае, где, особенно в отдаленных районах, наблюдается высокий уровень безработицы, падение нравов, люмпенизация населения и, как следствие, чрезвычайный рост преступности.

Весьма остро стоит вопрос снижения латентности преступлений, особенно это касается регионов Северного Кавказа. Обращают на себя внимание весьма высокие темпы преступности в Центральном округе.

Библиографический список

1. Бадов А.Д. География наркопреступности в России // Вестник Московского университета. Серия 5. География. №3. 2008. М.: МГУ, 2008. С. 55-59.
2. Бадов А.Д. География преступности в России в постсоветский период: Монография. Владикавказ: Изд-во СОГУ, 2009. 333 с.
3. Бадов А.Д. Особенности географии преступности на Северном Кавказе в современный период // Наука. Инновации. Технологии. Изд-во СКФУ. 2017. №3. С. 87-96.
4. Бадов А.Д., Макоев Х.Х. Региональные особенности преступности на Северном Кавказе в постсоветский период // Известия Русского географического общества. Том 141. Вып. 3. С.-Пб.: Наука, 2009. С. 70-76.
5. Бадов А.Д., Макоев Х.Х. Урбанизация и проблемы преступности // Экология урбанизированных территорий. №4. 2008. М.: Камертон. С. 26-29.
6. Бадов А.Д. География преступности в России: изменения за постсоветский период // Вестник Московского университета. Серия 5. География. №2. 2009. М.: МГУ. С. 64-69.
7. Бадов А.Д. Геокриминальное положение как фактор преступности // Известия РАН. Серия географическая. №2. 2009. М.: Наука. С. 48-51.
8. Куташов В.А., Сахаров И.Е. Наркология. Клиника. Диагностика. Лечение. Воронеж: Изд-во ВГМУ. 2016. 982 с.
9. Лунеев В.В. Преступность XX века. Мировые, региональные и российские тенденции. М.: Норма, 199. 316 с.
10. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2015: Стат. сб. / Росстат. М., 2015. 1266 с.
11. Соловьев И.А., Щитова Н.А. Территориальные особенности мигрантофобии в городах Северного Кавказа // Наука. Инновации. Технологии. Изд-во СКФУ. 2018. № 2. С. 149-160.
12. Состояние и тенденции преступности в Российской Федерации: Криминологический и уголовно-правовой справочник // НИИ проблем укрепления законности и правопорядка при Генер. прокуратуре РФ; ВНИИ МВД России: Департамент уголовного розыска МВД России / под общ. ред. А.Я. Сухарева, С.И. Гирько. М.: Изд-во «Экзамен», 2007. 383 с.

References

1. Badov A.D. Geography of drug crime in Russia // Moscow University Bulletin. Series 5. Geography. Number 3. 2008. Moscow: Moscow State University, 2008. P. 55-59.
2. Badov A.D. Geography of crime in Russia in post-Soviet period: Monograph. Vladikavkaz: NOSU Publishing house, 2009. 333 p.
3. Badov A.D. Features of crime geography in the North Caucasus in the modern period // Science. Innovation. Technology. NCFU. 2017. №3. Pp. 87-96.

4. Badov A.D., Makoev Kh.H. Regional features of crime in the North Caucasus in post-Soviet period // News of Russian Geographical Society. Volume 141. Issue. 3. S.-Pb: Science, 2009. P. 70-76.
5. Badov A.D., Makoev Kh.H. Urbanization and the problem of crime // Ecology of urbanized territories. №4. 2008. M.: Kamerton. P. 26-29.
6. Badov A.D. Geography of crime in Russia: changes over the post-Soviet period // Moscow University Bulletin. Series 5. Geography. №2. 2009. Moscow: Moscow State University. P. 64-69.
7. Badov A.D. Geocriminogenic position as a factor of crime // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical series. №2. 2009. M.: Science. P. 48-51.
8. Kutashov V.A., Sakharov I.E. Narcology. Clinic. Diagnostics. Treatment. Voronezh: VSMU Publishing house. 2016. 982 p.
9. Luneev V.V. Crime of XX century. World, regional and Russian trends. M.: Norma, 199. 316 p.
10. Regions of Russia. Socio-economic indicators. 2015: Stat. Dig. / Rosstat. M., 2015. 1266 p.
11. Soloviev, I. A, Shchitova, N.A. Territorial features of migrant-phobia in cities of the North Caucasus. Innovation. Technology. NCFU. 2018. No. 2. P. 149-160.
12. The state and trends of crime in the Russian Federation: criminological and criminal law directory // Research Institute of the problems of strengthening law and order under Prosecutor General's Office of the Russian Federation; All-Russian Scientific-Research Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia: Criminal Investigation Department of the Ministry of Internal Affairs of Russia / Under the general editorship of A.I. Sukhareva, S.I. Girko. Moscow.: "Exam" publishing house, 2007. 383 p.

Рукопись поступила в редакцию 12.01.19.

Принята к публикации 15.02.19

Об авторе

Бадов Александр Даурбекович, доктор географических наук, профессор, профессор кафедры физической и социально-экономической географии Северо-Осетинского государственного университета им. К.Л.Хетагурова, Scopus ID: 25626000600, badov@list.ru 89631769498.

About the author

Badov Alexander Daurbekovich, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Professor of Physical and Socio-economic Geography Department of the North Ossetian State University after K.L. Hetagurov, Scopus ID: 25626000600, badov@list.ru 89631769498.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ», № 1, 2019

25.00.30

УДК 551.509.616/551.509.617

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ, АГРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

Ватиашвили М.Р. Институт генетики Тбилисского Государственного университета им. И. Джавахишвили, г. Тбилиси, Грузия, kbloto@bk.ru

СОСТОЯНИЕ ПОЛЕЙ ОБЛАЧНЫХ СИСТЕМ И ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ, РАЗВИВАЮЩИХСЯ В РЕГИОНЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАВКАЗА

Введение:

исследуются поля облачных систем, сопровождающихся опасными явлениями погоды. Для предотвращения града из них в 1967 г. были начаты производственные работы по защите сельхоз культур от градобитий. Применялись комбинированный метод, методы конкуренции и ускорения процесса осадкообразования в объемах зон роста града и будущего градообразования. Анализ полученных результатов показал, что физическая эффективность противоградовых работ в Российской Федерации в среднем составляет 80–98%, а Республике Грузия – 75–85%. Выпадение града было обусловлено организационно-техническими причинами; недостаточной изученностью условий формирования полей облачности; отсутствием объективных критериев и схем засева градоопасных и градовых облаков; несвоевременной и недостаточной обработкой объемов зон роста града и будущего градообразования противоградовыми ракетами «Алазань», снаряженными частицами кристаллизующего реагента йодида серебра.

Материалы и методы: привлекались материалы визуальных и дистанционных методов наблюдений за развитием облачных систем, научные монографии и статьи, справочники и Атлас облаков, ежегодные отчеты противоградовых работ Военизированных служб региона Центрального Кавказа; физико-статистические методы оценки статистических характеристик параметров полей облачных систем, в основу которых положены параметрические и непараметрические методы исследования.

Результаты исследования:

выявлены особенности формирования полей облачности в синоптических процессах различных масштабов; построен график, на котором в зависимости от значений радиолокационных параметров, с вероятностью 90%, выделены области с ливнями, слабыми, умеренными и катастрофическими градобитиями; получены уравнения для оценки нормы расхода количества ПГР «Алазань» и интенсивности стрельбы в градовых облаках; построены графики вероятности диагноза и сверхкраткосрочного прогноза сильных шквалов, в зависимости от значений аэросиноптических и радиолокационных параметров полей облачности.

Обсуждение и заключения:

многие из вышеперечисленных проблем практически решены в работах автора, которые защищены патентом и успешно применяются в противоградовой защите ВС Ставропольского края.

Ключевые слова:

облако, град, шквалы, смерч, воздействие, ракеты, йодистое серебро.

Vatiashvili M.R.

The Institute of Genetics of Tbilisi State University
named after I. Dzhavakhishvili, Tbilisi, Georgia,
kbloto@bk.ru**The review of the condition of cloud systems fields and dangerous natural phenomena developing in the Central Caucasus region****Abstract:**

the cloud systems fields accompanied by dangerous natural phenomena are under research. To prevent their hailing in 1967 shop-floor applications on protecting agricultural crops from hail damage began. The combined method and methods of competition and process acceleration of sludging within hail and expected hail forming areas were applied. The analysis of the results has shown that average physical activity of anti-hail works in the Russian Federation is 80-98% and in the Republic of Georgia is 75–85%.

Hailfall was stipulated by organizational and technical causes; poor investigation of conditions of cloud fields forming; the lack of objective criteria and seeding schemes of hail-damage and hail clouds; ill-timed and insufficient treatment of hail growth and expected hail forming areas by anti-hail rockets «Alazan» equipped with particles of argentum iodide reagent.

Materials and Methods:

applied the materials of visual and remote observation methods of cloud systems developing, scientific monographs and articles, reference books and the Clouds Atlas, annual reports on anti-hail works of paramilitary services of the Central Caucasus region; physical and statistical evaluation methods of statistic parameters of cloud systems fields based on parametric and non-parametric research techniques.

Results:

the peculiarities of cloud fields forming in different scales synoptic processes have been discovered; the areas of cloudbursts, light, moderate and disastrous hail damage depending on radar data with probability of 90% have been graphed; the equations for estimation of quantity application rate of AHR «Alazan» and shooting intensity in hail clouds have been derived; the probability of diagnosis and super short-term forecast of heavy squalls depending on aersynoptical and radar data of cloud fields have been graphed.

Discussion and conclusions:

many of the abovementioned problems have been practically solved in author's patened works and are successlully applied in anti-hail protection of the Stavropol krai paramilitary services.

Keywords:

cloud, hail, squalls, whirlwind, influence, rockets, argentum iodide.

Введение

Поля облаков и облачных систем (ПООС) представляют собой совокупность водяного пара, взвешенных капель воды и кристаллов льда [9, 11–13, 18, 19]. Они оказывают влияние на круговорот воды в природе; тепловой баланс системы «Земля – атмосфера»; формирование погоды; растительный и животный мир и т.д.

Прохождение ПООС сопровождается опасными явлениями (ОЯ) погоды, включающими в себя обложные осадки, интенсивные ливни и шквалы

различной силы, градоопасные и градовые облака – соответственно объекты воздействия (ОВ) 1–2-й и 3–4-й категорий со значительным ущербом народного хозяйства, исчисляемыми сотнями млн долларов.

К такому региону относится Центральный Кавказ, охватывающий защищаемые территории (ЗТ) Военизированных служб (ВС) Республики Грузия и Российской Федерации [5, 6, 7]. Здесь с 1967 г. ведется противоградовая защита (ПГЗ) сельскохозяйственных (с/х) культур с применением комбинированного метода [2], методов конкуренции [10, 17] и ускорения процесса осадкообразования в зоне роста града (РГ) и будущего градообразования (БГ) [1] с применением артиллерийской и ракетной технологий засева.

В 1990 г. все ВС РФ (Северо-Кавказская, Краснодарская, Ставропольская ВС), работающие с применением артиллерийской технологии засева, были полностью переведены на ракетную технологию засева. Причины – дискретность засева, большой расход противоградовых снарядов (ПГС), невозможность быстрого засева объемов РГ и БГ в крупномасштабных градовых облаках, приводящих к их недозасеву и отрицательным результатам.

Физическая эффективность по ПГЗ в РФ в среднем составляет 80-98%, а Республике Грузия – 75-85%. Физическая эффективность по искусственному увеличению осадков (ИУО) в Республике Грузия составляла 10–15%, с вероятностью 90-95% [16].

В настоящее время площади ЗТ в РФ и Республике Грузия соответственно достигают 2 млн 421 тыс. га и 900 тыс. га. [5, 6, 7].

Несмотря на высокие показатели эффективности ПГЗ на ЗТ региона Центрального Кавказа ежегодно отмечались и по настоящее время все еще отмечаются отдельные случаи пропуска града, сопровождающиеся катастрофическими ливневыми осадками и шквалами более 25 м/с.

Ущерб с/х продукции был обусловлен:

- организационно-техническими причинами; недостаточной изученностью аэросиноптических условий формирования ПООС различных классов;
- отсутствием новых объективных критериев их распознавания, совершенствованных схем засева и норм расхода противоградовых ракет «Алазань», снаряженных частицами кристаллизующего реагента (ЧКР) йодида серебра (AgI).

Целью представленной работы является:

- исследование условий формирования ПООС в синоптических процессах различных масштабов, выявление по данным визуальных и дистанционных методов наблюдений особенностей их генетико-морфологической классификации и связанных с ними типов градовых процессов (ГП);
- совершенствование существующих и разработка новых

- объективных критериев засева ОБ 1–4-й категорий и искусственного регулирования осадков (ИРО – искусственное увеличение или уменьшение осадков воздействием);
- разработка диагноза и сверхкраткосрочного прогноза шквалов различной силы в ПООС по аэросиноптическим данным и данным метеорологических радиолокаторов (МРЛ).
- совершенствование существующих и разработка новых методов ПГЗ и искусственного увеличения осадков (ИУО), проводимых с помощью наземной ракетной технологии засева.

Материалы и методы исследования

В основу классификаций ПООС положены научные монографии и статьи, справочники и Атласы облаков, а также ежегодные отчеты по ПГЗ и ИУО, выполненных ВС региона Центрального Кавказа.

Визуальные наблюдения проводились с помощью наземных метеорологических станций (НМС), контактные измерения самолетами-метеолaborаториями (СМЛ) [13], а дистанционные наблюдения – с помощью (МРЛ) [1, 14].

Для оценки статистических характеристик ПООС привлекались физико-статистические методы, в основу которых положены параметрические и непараметрические методы исследования [15].

Результаты исследования

1. Особенности формирования ПООС синоптических масштабов

При анализе структуры и динамики развития ПООС, процессов зарождения и эволюции в них гидрометеоров наблюдаем явления различных синоптических масштабов: макромасштабные, мезомасштабные и микромасштабные синоптические процессы [9, 11–13, 18, 19].

Макромасштабные процессы характеризуются горизонтальной протяженностью от 1 тыс. до 10 тыс. км и продолжительностью их существования от 4 до 13 суток, составляя в среднем 5–7 суток. К ним относятся циклоны, антициклоны, безградиентные поля относительно пониженного и повышенного давления, теплые фронты, холодные основные и вторичные фронты, фронты окклюзии по типу холодного и теплого фронтов, волновые возмущения, наблюдаемые в Грузии с юга.

Мезомасштабные процессы характеризуются горизонтальной протяженностью от 2 до 100 км и продолжительностью существования от нескольких часов до 3 суток.

Микромасштабные процессы характеризуются размерами гидрометеоров с жидкими и/или твердыми облачными частицами и частицами осадков в облаках от 0,02 мкм до 5 см и продолжительностью их существования от нескольких секунд до десятков минут.

2. Особенности генетико-морфологической классификации ПООС по данным визуальных наблюдений

Анализ многолетних материалов наблюдений показал, что, в зависимости от горизонтальных размеров и вертикальных движений воздушных масс, образуются различные классы ПООС. Они отличаются друг от друга внешним видом (морфологическая классификация) микроструктурой (микрофизическая классификация) и местом их зарождения (генетическая классификация) [9, 12, 13, 18, 19]. Они сопровождаются обложными осадками, интенсивными ливнями, грозоградовыми процессами и шквалами различной силы.

Морфологическая классификация ПООС

Она включает в себя (табл. 1):

- облака нижнего яруса это – слоистые (Stratus, St), слоисто-кучевые (Stratocumulus, Sc) и слоисто-дождевые (Nimbostratus, Ns);
- облака среднего яруса это – высококучевые (Alto cumulus, Ac) и высокослоистые (Altostratus, As);
- облака верхнего яруса это – перистые (Cirrus, Ci), перисто-кучевые (Cirro cumulus, Cc) и перисто-слоистые (Cirrostratus, Cs);
- облака вертикального развития это – кучевые плоские (Cumulus humilis, Cu hum), кучевые средние (Cumulus mediocris, Cu med), мощно-кучевые (Cumulus congestus, Cu Cong), кучево-дождевые лысые (Cumulonimbus calvus, Cb calv) и кучево-дождевые волосатые (Cumulonimbus capillatus, Cb cap).

Микрофизическая классификация ПООС

Она характеризует фазовое состояние гидрометеоров, их размеры и концентрации (табл. 1) [11, 13]. В области положительных температур отмечаются жидкокапельные облака; температурного интервала от 0 °C до минус 30 °C – смешанные облака, состоящие из переохлажденных капель до уровня изотермы минус 12 °C и ледяных кристаллов при температуре ниже минус 12 °C; температур минус 30 °C, как правило, отмечаются кристаллические облака, хотя не исключена возможность существования переохлажденных капель даже при температуре менее минус 40 °C [13].

Фазовое состояние облаков малой мощности и их однородное строение определяются в соответствии с температурой воздуха на уровне их нахождения. В умеренных широтах в теплый период года St и Sc являются жидкокапельными, так как они расположены в теплой части тропосферы, где температура воздуха $t > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; Ci, Cs и Cc – кристаллическими, так как они расположены в области отрицательных температур ($t < -30\text{ }^{\circ}\text{C}$) мощные облака типа Ns и Cb – смешанными так, как нижняя и верхняя их части соответственно расположены в области положительных и отрицательных температур, при

этом размеры гидрометеоров в Сb обусловлены скоростями вертикальных движений воздушных масс и мощностями их переохлажденной части.

Генетическая классификация ПООС

Она включает в себя облачные системы, формирующиеся в результате взаимодействия воздушных масс с различными физическими свойствами. Устойчивая воздушная масса характеризуется облаками St, Sc, As, и Ac [9]. По данным самолетных измерений [13] вертикальная мощность St и Sc колеблется от 0,2 до 0,8 км, As и Ac – от 0,2 до 2 км (табл. 1), а горизонтальная протяженность этих систем – от сотен до тысячи километров [9].

Неустойчивая воздушная масса характеризуется облаками Cu-Cong и Сb [9]. Их вертикальные мощности соответственно изменяется от 0,2 до 4,0 км и от 3 до 5–7 км и более [13], а горизонтальная протяженность – от нескольких километров до нескольких десятков километров [9]. Из Сb отмечаются выпадение кратковременных ливневых осадков и града, сопровождающихся грозоградовыми процессами и шквалистыми усилениями ветра.

В теплый период года:

- теплые фронты характеризуются облачной системой As-Sc-Ns и обуславливают выпадение обложных осадков [9],

Таблица 1. ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПООС ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ (НМС) И САМОЛЕТА-МЕТЕОЛАБОРАТОРИИ (СМЛ)

Параметры ПООС	Классы ПООС								
	St, Sc	Ns	As, Ac	Ci, Cs, Cc	Cu-Cong	Cb	As-Ac-Cb	Ns-As-Cb	Ns-As
$H_{нп}$, км	0.2 ÷ 1.5	0.1 ÷ 1.0	2.0 ÷ 5.0	4.0 ÷ 11.0	1.0 ÷ 1.5	1.5 ÷ 2.0	1.0 ÷ 2.0	0.1 ÷ 1.0	0.1 ÷ 1.0
$H_{в}$, км	0.6 ÷ 2.8	0.6 ÷ 2.8	2.2 ÷ 6.0	6.0 ÷ 13.0	1.2 ÷ 6.0	4.0 ÷ 13.0	5.0 ÷ 13.0	6.0 ÷ 13.0	5.0 ÷ 6.0
ΔH , км	0.2 ÷ 0.8	2.0 ÷ 5.0	0.2 ÷ 2.0	0.1 ÷ 5.0	0.2 ÷ 4.0	3.0 ÷ 5.7	2.0 ÷ 5.0	2.0 ÷ 5.7	2.0 ÷ 5.0
$t_{нп}$, °C	10 ÷ -4	10 ÷ -8	3 ÷ -20	-12 ÷ -70	19 ÷ 1	15 ÷ 6	20 ÷ 10	17 ÷ 10	26 ÷ 8
$t_{в}$, °C	6 ÷ -8	8 ÷ -11	-1 ÷ -26	-25 ÷ -75	-4 ÷ -20	-5 ÷ -25	-1 ÷ -26	-10 ÷ -25	-18
Фазовое состояние	Капельное	Смешанное	Смешанное	Кристаллическое	Смешанное	Смешанное	Смешанное	Смешанное	Смешанное
W , м/с	0.01 ÷ 0.2	0.01 ÷ 0.2	0.02 ÷ 0.2	–	2.0 ÷ 12.0	2.0 ÷ 50.0	2 ÷ 40.0	0.08 ÷ 1.0	0.02 ÷ 0.2
$V_{г}$, м/с	–	–	–	–	1-2	1-4	1-4	1-3	0.1-1.0
$d_{кр}$, мкм	–	–	–	–	≤ 500	≤ 1000	≤ 800	≤ 700	≤ 200
σ_w , м/с	0.1 ÷ 0.3	0.1 ÷ 0.5	0.1 ÷ 0.9	0.1 ÷ 0.7	1.0 ÷ 2.0	1.0 ÷ 20	0.1 ÷ 2.8	0.2 ÷ 1.6	0.1 ÷ 0.3
L_T , км	20	20	10 ÷ 70	10 ÷ 80	10 ÷ 70	20	10 ÷ 40	10 ÷ 50	10 ÷ 70
$\Delta \epsilon$, см ² /с ³	8 ÷ 30	8 ÷ 30	8 ÷ 30	1 ÷ 7	50 ÷ 300	200 ÷ 1000	5 ÷ 6	20 ÷ 100	1 ÷ 5
K , м ² /с	20 ÷ 25	3 ÷ 10	3 ÷ 10	3 ÷ 10	10 ÷ 300	200 ÷ 500	150 ÷ 300	50 ÷ 100	13 ÷ 15
q , г/м ³	0.12 ÷ 0.27	0.15 ÷ 0.33	0.15 ÷ 0.21	0.001	0.06 ÷ 1.2	0.9 ÷ 1.7	0.15 ÷ 0.97	0.13 ÷ 0.75	0.15 ÷ 0.27
P , кг/м ²	0.02 ÷ 0.28	0.02 ÷ 0.56	0.03 ÷ 0.4	0.0001	0.01 ÷ 4.8	2.7 ÷ 9.5	2.2 ÷ 5.3	0.02 ÷ 0.41	0.02 ÷ 0.48

- а при значительной влажности и неустойчивости воздушной массы формируются Сb, сопровождающихся кратковременным увеличением интенсивности осадков;
- холодные быстродвижущиеся фронты характеризуются облачной системой As-Ac-Cb, а медленно движущиеся фронты – облачной системой Ns-As-Cb [9];
- фронты окклюзии характеризуются сложным сочетанием холодных и теплых фронтов, которые, в зависимости от соотношения их масс и направления перемещения, развиваются по типу холодного и/или теплого фронтов [9]. Длина облачных систем фронтального происхождения составляет тысячи и более километров, а ширина – сотни километров [9]. В переходные периоды из Ns–As выпадают обложные осадки слабой и умеренной интенсивности. Иногда внутри них, в виде «затопленных» конвективных образований, отмечаются облака вертикального развития сравнительно малой мощности (Cu, Cu-Cong), которые играют важную роль в формировании как естественных, так и искусственных осадков. При воздействии происходит перерастание Cu-Cong в Сb, а, следовательно, увеличение из них искусственных осадков.

Table 1. The values of the parameters of clouds and cloud systems fields (CCSF) according to meteorological earth station (MES) and airplane data

3. Особенности генетико-морфологической классификации ПООС по данным дистанционных методов наблюдений

Радиолокационные методы исследования способствовали созданию новой радиолокационной классификации ПООС, связанной с общепринятой генетико-морфологической классификацией. Она основана на качественных признаках вертикального и горизонтального распределения радиоэха облачности и ее количественных характеристиках, включающих в себя:

- высоты нижней и верхней границы, горизонтальные площади и вертикальные мощности радиоэха ПООС, соответственно, H_n (км) и H_b (км), S (км²) и ΔH (км); удельную площадь обратного рассеяния – η_k (см⁻¹);
- радиолокационные отражаемости ПООС, выраженные в различных единицах измерений: Z_d и Z_r (мм⁶/м³), LgZ_d и LgZ_r , Z'_d (dBZ) = Z_d (мм⁶/м³) / Z_0 (мм⁶/м³), а Z'_r (dBZ) = Z_r (мм⁶/м³) / Z_0 (мм⁶/м³) [8], (d и r – диаметры и радиусы рассеивающихся частиц).

Перечисленные выше параметры, с различными размерностями, часто используются в литературных источниках и научных отчетах различных регионов мира для оценки: физической и экономической эффективности работ по ПГЗ и ИУО; градоопасности ЗТ и прилегающих территории (ПТ). Однако их сравнительная оценка между собой часто затруднена. В связи с этим получена таблица 2, связывающая между собой выше перечисленные параметры с различными размерностями и позволяющая переводить значения η_{ki} в значения LgZ и Z' и обратно [8].

Таблица 2. Соотношения между значениями η_{ki} (СМ⁻¹), LgZ И Z' (dBZ) [8]
Table 2. The correlations between the values of η_{ki} (СМ⁻¹), LgZ AND Z' (dBZ) [8]

1	2	3	4	5	6	7	8
$\eta_{3.2}, \text{СМ}^{-1}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{-8}$
$\eta_{5.6}, \text{СМ}^{-1}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{-9}$
$\eta_{10}, \text{СМ}^{-1}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{-10}$
LgZ_d	0.5	1.2	1.5	2.2	2.5	3.2	3.5
LgZ_r	-1.3	-0.6	-0.3	0.4	0.7	1.4	1.7
Z'_d (dBZ)	5	12	15	22	25	32	35
Z'_r (dBZ)	-13	-6	-3	4	7	14	17

1	9	10	11	12	13	14	15
$\eta_{3.2}, \text{СМ}^{-1}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
$\eta_{3.2}, \text{СМ}^{-1}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
$\eta_{5.6}, \text{СМ}^{-1}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$
LgZ_d	4.2	4.5	5.2	5.5	6.2	6.5	7.2
LgZ_r	2.4	2.7	3.4	3.7	4.4	4.7	5.4
Z'_d (dBZ)	42	45	52	55	62	65	72
Z'_r (dBZ)	24	27	34	37	44	47	54

Радиоэхо облачности нижнего яруса (St , Sc)

На индикаторе дальность-высота (ИДВ) МРЛ она характеризуется однородной по вертикали микроструктурой, так как не содержат мелкие частицы и фазовый состав сравнительно однороден (табл. 3), а на индикаторе кругового обзора (ИКО) МРЛ – в виде сплошной полосы, которая для Sc по мере удаления от МРЛ приобретает ячеистую структуру. Для St и Sc диапазоны вероятных значений высот нижней (H_n) и верхней (H_b) границы радиоэха ПООС и их отражаемости (Z') изменяются соответственно от 0,1 до 1,5 км, от 0,8 до 2,3 км и < 18 dBZ.

Радиоэхо слоисто-дождевой облачности нижнего яруса (Ns)

На ИДВ МРЛ она характеризуется четко выраженным максимумом отражаемости (яркой полосой) в области изотермы 0 °С, формирующейся за счет различия радиолокационной отражаемости воды и льда, а также концентрации частиц ниже и выше уровня изотермы 0 °С (табл. 3). На ИКО МРЛ она занимает большие площади и имеет более или менее однородную структуру отражаемости.

Радиоэхо облачности среднего яруса (As , Ac)

На ИДВ МРЛ она характеризуется некоторым увеличением отражаемости в ее средней части, обусловленной наличием крупных частиц (табл. 3). На ИКО МРЛ радиоэхо этой облачности просматривается в виде сплошной полосы, которое для Ac по мере удаления от МРЛ приобретает ячеистую структуру с параметрами $H_n = 2.5 - 5.0$ км, $H_b = 3.5 - 7.0$ км, $Z' = 12 - 30$ dBZ.

Радиоэхо облачности верхнего яруса (Ci, Cs)

Она характеризуются следующими значениями:

$$H_{\text{н}} = 5 - 7 \text{ км};$$

$$H_{\text{в}} = 6 - 10 \text{ км и}$$

$$Z' = 12 - 18 \text{ dBZ (табл. 3).}$$

В ближней зоне радиолокационная классификация отдельных типов облаков осуществляется [14] детерминированным описанием их радиолокационных характеристик, а дальней зоне – особенностями их распределения в пространстве. Существование связей между геометрическими размерами облаков и размерами их радиоэха на ИКО, а также между микроструктурой облаков и интенсивностью радиоэха дает основание использовать особенности пространственного распределения радиолокационных характеристик для определения класса ПООС. Они предусматривают распределение радиоэха по площади, наблюдаемое на ИКО МРЛ; пространственное распределение высоты верхней границы радиоэха и отражаемости на наиболее характерном уровне, расположенном на 2 км выше нулевой изотермы, представленные в виде карты. Радиолокационные наблюдения за ПООС позволили классифицировать основные типы облачных систем по указанным радиолокационным признакам.

Радиоэхо облачности вертикального развития

На ИДВ МРЛ радиоэхо облачности Cu-Cong и Cb характеризуется следующими особенностями (рис. 1, рис. 2, табл. 3): имеет выраженный максимум радиолокационной отражаемости (Z'_m) и высота расположения Z'_m зависит от стадии ее развития. Рассмотренные особенности радиоэха

Рис. 1.
Радиоэхо
облачной
системы типа
Cu-Cong.

Fig. 1. Radio echo of the Cu-Cong type cloud system.

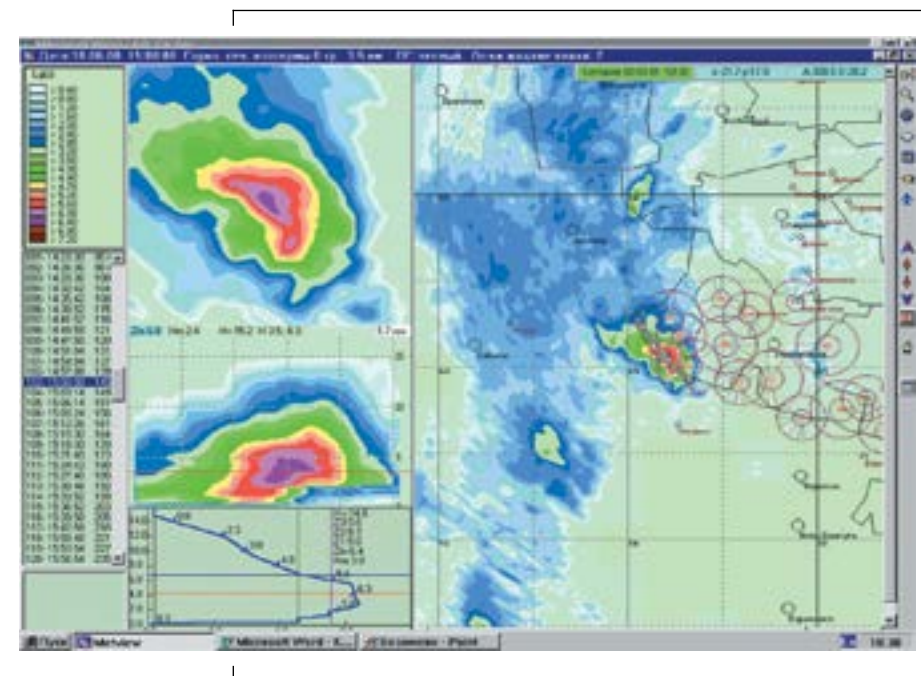
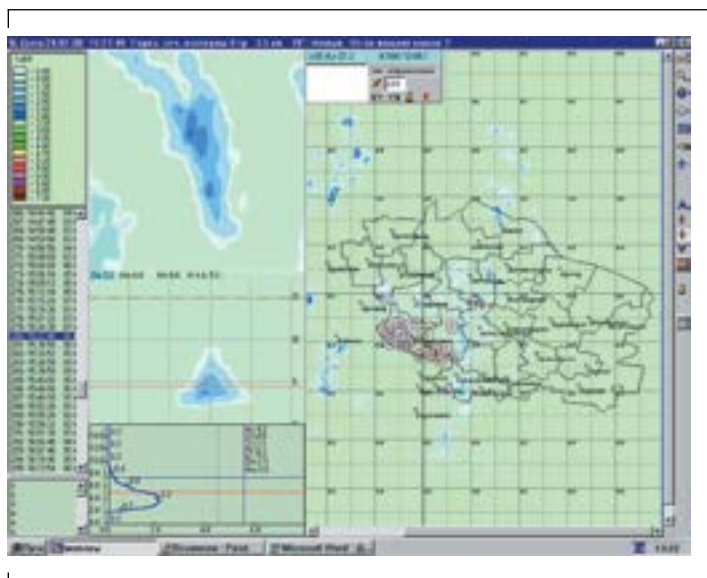


Рис. 2.

Радиоэхо облачной системы типа Cb.

Fig. 2. Radio echo of the Cb type cloud system.

ПООС, характер их распределения на ИКО и ИДВ (табл. 3, рис. 1, рис. 2) хорошо просматриваются на мониторе ЭВМ МРЛ.

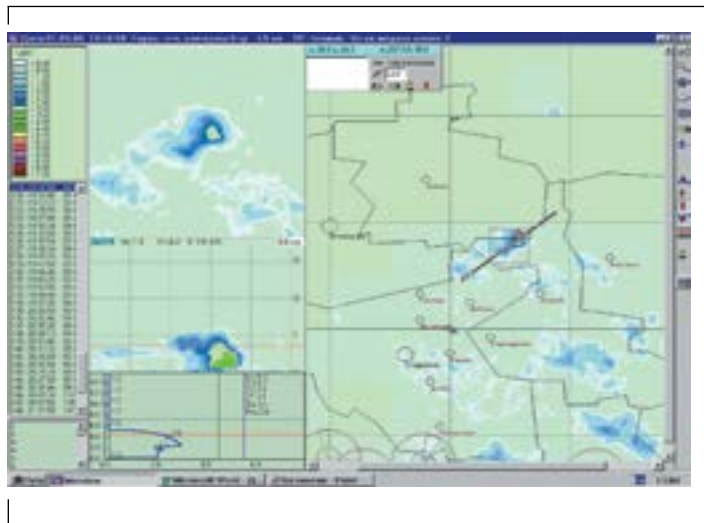
Методика индикации Cu-Cong и Cb основана на определении вероятности принадлежности конвективной облачности к классу мощно-кучевых или кучево-дождевых облаков.

Радиоэхо слоисто-кучево-дождевой облачности (As-Ac-Cb)

На ИКО МРЛ радиоэхо имеет вид полосы или нескольких полос (рис. 3, табл. 3). В теплый период года система связана с быстро движущимися атмосферными фронтами и представляет собой грядку кучево-дождевых облаков, сопровождаемую облаками среднего яруса As и Ac. Конвективные облака, наблюдаемые в облачной системе, находятся в различных стадиях развития, что способствует неоднородному характеру распределения на ИКО и ИДВ МРЛ высот верхней границы радиоэха облачности ($H_{\text{в}} = 5 - 13 \text{ км}$) и ее радиолокационной отражаемости ($Z' = 28 - 68 \text{ dBZ}$); а, следовательно, выпадению осадков различной интенсивности: умеренных ($3.0 - 25.0 \text{ мм/ч}$) при $Z' = 30 - 45 \text{ dBZ}$; сильных ($25.1 - 140.0 \text{ мм/ч}$) при $Z' = 46 - 57 \text{ dBZ}$; очень сильных ($> 140 \text{ мм/ч}$) при $Z' > 57 \text{ dBZ}$.

Рис. 3. Радиозэх облачной системы типа As-Ac-Cb.

Fig. 3. Radio echo of the As-Ac-Cb type cloud system.



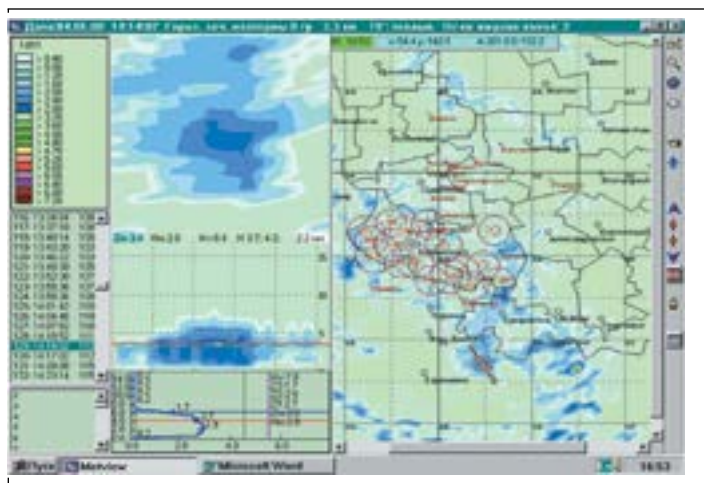
Радиозэх слоисто-кучево-дождевой облачности (As-Ns-Cb)

На ИКО МРЛ радиозэх представляет собой сплошную область без резко очерченных границ, которое по мере увеличения расстояния от МРЛ переходит в отдельные полосы или ячейки (рис. 4, табл. 3).

Распределение высот верхней границы радиозэха Сб в целом определяется интенсивностью конвекции. При слабой конвекции верхняя граница Сб располагается на одинаковой высоте с облачной системой (затопленные конвективные образования), а по мере увеличения расстояния от МРЛ монотонно уменьшается. При формировании кучево-дождевой облачности в области отрицательных температур на одинаковых расстояниях от МРЛ наблюдается неоднородное поле высоты верхней границы радиозэха и отражаемости.

Рис. 4. Радиозэх облачной системы типа As-Ns-Cb.

Fig. 4. Radio echo of the As-Ns-Cb type cloud system.



При слабой конвекции система As-Ns-Cb проявляет особенности облачной системы As-Ns, а при сильной конвекции – особенности облачной системы Сb-Ас.

Облачная система слоистых форм (As-Ns)

На ИКО МРЛ она представляет собой сплошное радиозэх слоистообразной облачности без резко очерченных границ (рис. 5, табл. 3). Она связана с атмосферными фронтами и простирается до нескольких сот километров. На ИДВ МРЛ высоты верхней границы радиозэха этой системы на одинаковых расстояниях от МРЛ практически одинаковы, а с удалением монотонно уменьшаются.

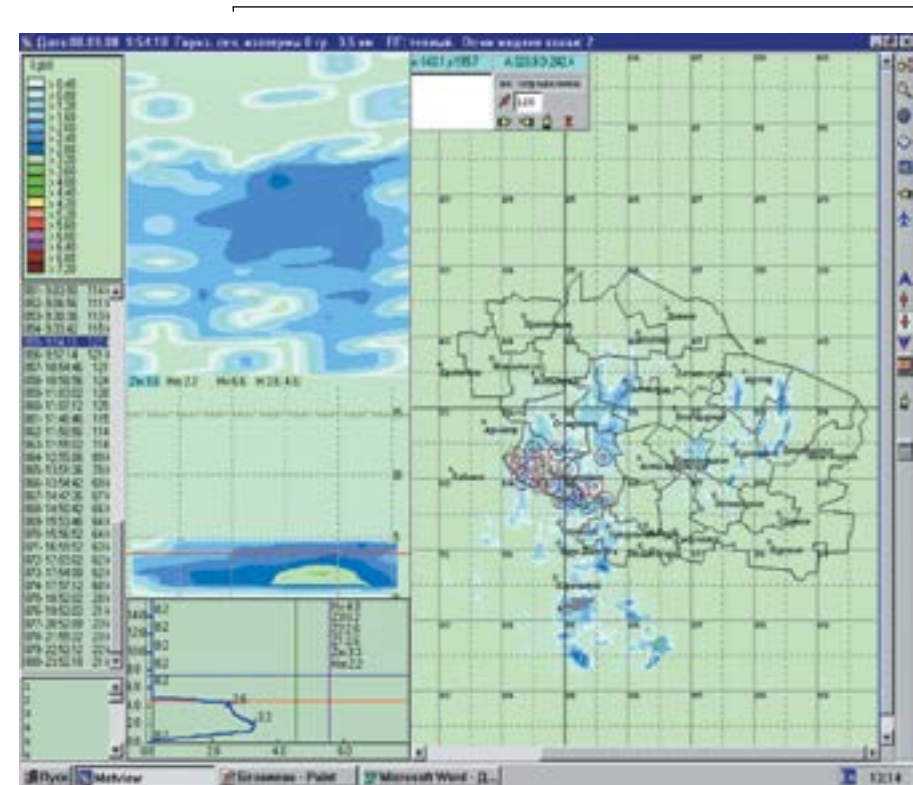


Рис. 5. Радиозэх облачной системы типа As-Ns.

Fig. 5. Radio echo of the As-Ns type cloud system.

Развитие системы сопровождается выпадением обложных осадков слабой интенсивности $I = 0.5 - 2.8$ мм/ч, которым соответствуют значения

$$H_b = 3 - 9 \text{ км и } Z' = 18 - 20 \text{ dBZ.}$$

Таблица 3. ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПООС ПО ДАННЫМ МРЛ
Table 3. The values of the ccsf parametes according to meteorological radar (MR) data

Параметры облака	Классы ПООС			
	2	3	4	5
1	St, Sc	Ns	As, Ac	Ci, Cs, Cc
$H_{нп}$, км	0.1 ÷ 1.5	0.1 ÷ 1.0	2.5 ÷ 5.0	5.0 ÷ 7.0
$H_{в}$, км	0.8 ÷ -2.3	0.6 ÷ 2.8	3.5 ÷ 7.0	6.0 ÷ 10.0
ΔH , км	0.7 ÷ -0.8	2.0 ÷ 5.0	1.0 ÷ 2.0	1.0 ÷ 3.0
$t_{нп}$, °C	10 ÷ -4	10 ÷ -8	3 ÷ -20	-12 ÷ -70
$t_{в}$, °C	6 ÷ -8	8 ÷ -11	-1 ÷ -26	-25 ÷ -75
Фазовое состояние	Капельное	Смешанное	Смешанное	Кристаллическое
Характер распределения радиозха по площади	Однородное поле, с удалением от МРЛ Sc принимают ячеистую структуру	Однородное поле	На ИДВ увеличение Z' в средней части за счет крупных частиц	Радиозхо в виде сплошной полосы
Характер распределения высоты радиозха	Незначительные изменения с высотой	Яркая полоса в области изотермы 0°C	Ac с удаления от МРЛ принимают ячеистую структуру	Полоса с игольчатой структурой
Диапазон значений Z' dBZ, явление	< 18, без осадков	12-33	12-32	12-18

1	6	7	8	9	10
	Cu-Cong	Cb	As-Ac-Cb	As-Ns-Cb	As-Ns
$H_{нп}$, км	1.0 ÷ 1.5	1.5 ÷ 2.0	1.0 ÷ 2.0	0.1 ÷ 1.0	От земли
$H_{в}$, км	1.2 ÷ 6.0	5.0 ÷ 15.0	5.0 ÷ 13	5.0 ÷ 13.0	3.0 ÷ 9.0
ΔH , км	0.6 ÷ 5.5	3.0 ÷ 5.7	2.0 ÷ 5.0	4.9 ÷ 12.0	2.0 ÷ 5.0
$t_{нп}$, °C	19 ÷ 1	15 ÷ 6	20 ÷ 10	15 ÷ 10	26 ÷ 8
$t_{в}$, °C	-4 ÷ -20	-5 ÷ -25	-1 ÷ -26	-10 ÷ -75	-18
Фазовое состояние	Смешанное	Смешанное	Смешанное	Смешанное	Смешанное
Характер распределения радиозха по площади	Хаотически разбросанные ячейки	Хаотически разбросанные ячейки	Полосы или несколько полос	Неоднородное поле с отдельными полосами	Однородное поле
Характер распределения высоты радиозха	Неоднородное поле	Неоднородное поле	Неоднородное поле на одинаковых расстояниях	Неоднородное поле	С увеличением расстояния Нв уменьшается
Диапазон значений Z' dBZ, явление	4-36, без осадков	19-68, ливень, град, шквал	28-68, ливень, град, шквал	28-68, ливень, град, шквал	8-28, слабые осадки

4. Типы градовых процессов в ПООС

Значения характеристик параметров ПООС и характер их распределения в атмосфере, полученные по данным МРЛ и аэросиноптических материалов, позволили в реальном масштабе времени выявить наблюдаемые типы градовых процессов (ГП). Они, в зависимости от структуры и динамики развития, направления и скорости перемещения воздушных масс по высотам, были разделены на: одноячейковые, многоячейковые (упорядоченные, неупорядоченные, и слабоорганизованные) и суперячейковые процессы. Физические условия формирования типов градовых процессов изложены в работах [1, 20].

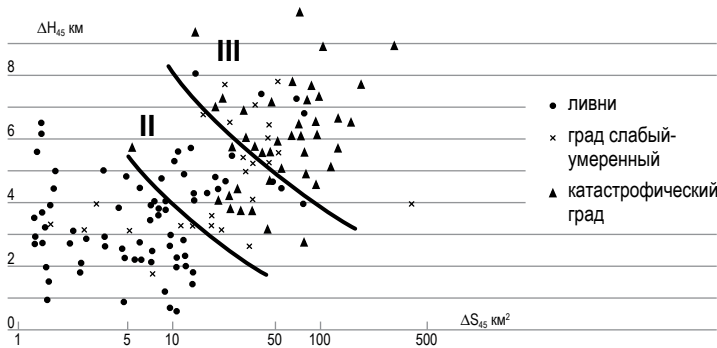
5. Критерии засева ОВ 1–4-й категории в ПООС

Радиолокационный метод оценки интенсивности развития ОВ 1–2-й и 3–4-й категорий основан на использовании комплекса радиолокационных и физических параметров ПООС, включающего в себя мощности (ΔH_{45} , км) и площади горизонтального сечения переохлажденной части конвективной ячейки – КЯ (ΔS_{45} , км²) ограниченных изоконтурными радиолокационной отражаемости $Z'_d = 45$ dBZ. Сопоставление значений указанных параметров с видом выпавших осадков позволило построить график (рис. 6), на котором с вероятностью 90% были выделены области: с ливнями (I); слабыми и умеренными градобитиями (II); катастрофическими градобитиями (III).

Проверка полученного графика на независимом материале региона Центрального Кавказа, включающего в себя: Северо-Кавказскую ВС (Сев-Кав. ВС), ВС Краснодарского края и Грузинского УГМ показала высокую его оправдываемость.

Критерии засева ОВ 1–4-й категорий представлены в табл. 4, где:
 ΔH_{Z_m} , (км) – высота первого радиозха в области отрицательных температур; Z'_m (dBZ) – максимальная радиолокационная отражаемость; ΔH_{35} и ΔH_{45} (км) – мощности зоны повышенной радиолокационной отражаемости в области отрицательных температур, соответственно ограниченные изоконтурными радиолокационной отражаемости $Z'_m = 35$ и $Z'_m = 45$ dBZ.

Рис. 6. Связь интенсивности градового процесса с параметрами ΔS_{45} и ΔH_{45} .
Fig. 6. The connection of hailing rate with ΔS_{45} and ΔH_{45} data.



Недостатком действующих критериев засева ОБ 1–4-й категории является то, что при выявлении развивающихся ОБ 2-й категорий, характеризующихся параметрами $35 < Z'_m < 55$ dBZ и $\Delta H_{35} < 2.5$ км [1], не привлекался такой информативный параметр, как превышение высоты максимальной радиолокационной отражаемости (ΔH_{Z_m} , км) над уровнем изотермы 0 °C (H_0 , км) однозначно характеризующий их фазовую структуру [6]:

$$\Delta H_{Z_m} = H_{Z_m} - H_0$$

(1)

Если значения Z_m в ОБ 2-й категорий фиксируются в теплой их части ($\Delta H_{Z_m} < 0$), то они являются неградоопасными и воздействие на них не проводится; переохлажденной их части ($\Delta H_{Z_m} \geq 0$), то они, при естественном развитии с высокой вероятностью, могут перейти в ОБ 3–4-й категорий и подлежат немедленному воздействию [6].

Таблица 4.

КРИТЕРИИ ЗАСЕВА ОБ 1–4-й КАТЕГОРИИ В ПООС [1]
Table 4. Seeding criteria of the object of effect of the 1st–4th category in CCSF [1]

Параметры ООС	Категория ОБ			
	1	2	3	4
Z'_m (dBZ)	$15 < Z_m < 35$	$35 \leq Z_m \leq 55$	$Z_m < 55$	$Z_m < 65$
ΔH_n (км)	$1 < \Delta H_{Z_m} < 4$	$\Delta H_{35} > 2.5$	$\Delta H_{45} > 3$	$\Delta H_{45} > 4$

Параметр ΔH_{Z_m} дополнительно уточнялся и в зависимости от высоты расположения изотермы 0 °C над уровнем моря (H_0). Воздействию подвергались все объекты 2-й категории, если:

- при $H_0 < 2.5$ км значение $\Delta H_{Z_m} > 0$ км;
- при $H_0 = 2.5 \div 3.5$ км значение $\Delta H_{Z_m} > 1$ км;
- при $H_0 > 3.5$ км значение $\Delta H_{Z_m} > 2$ км.

Совершенствованный критерий засева ОБ 2-й категорий может существенно повлиять на уменьшение количества: обработанных ячеек, израсходованных в них ПГР и затрат на их приобретение. Он в 2006–2007 гг. прошел апробацию на ЗТ ВС Ставропольского края [6].

Анализ материалов испытаний критериев засева ОБ 2-й категории в ПООС выявил, что в 2006 и 2007 г.:

- воздействию подверглись 258 ОБ 2-й категорий с $\Delta H_{Z_m} \geq 0$ и не подвергались воздействию 869 ОБ 2-й категорий со значениями параметра $\Delta H_{Z_m} < 0$; на обработку одного ОБ 2-й категории в среднем расходовалось 8 шт. ПГР «Алазань-6», стоимость одной из которой составляла 8 тыс. руб. по ценам 2006 и 2007 г.

- на обработку 869 шт. ОБ 2-й категории с $\Delta H_{Z_m} < 0$ потребовалось бы дополнительно израсходовать еще 6952 шт. «Алазань-6», что в денежном выражении составило 55 млн руб.

Таким образом, в Ставропольском крае средняя экономическая эффективность ПГЗ, достигающая в 2003–2007 гг. 360,1 млн рублей, была дополнительно увеличена еще на 55,6 млн руб. Совершенствованный критерий засева ОБ 2-й категории успешно внедрен в ПГЗ ВС Ставропольского края. Получен патент РФ на изобретение [4].

Радиолокационные параметры ПООС привлекались и для оценки нормы расхода количества ПГР «Алазань» и интенсивности стрельбы в объемах зон роста града и будущего градообразования градовых облаков. Оценка проводилась с помощью следующих уравнений [6]:

$$n_i \approx 0.4 \Delta V_{45},$$

(2)

$$I_i = n_i / \Delta t_{\Phi} \approx 0.04 \Delta V_{45},$$

(3)

- где n_i – количество противоградовых ракет (ПГР) «А-6» шт., израсходованных на один ОБ;
- ΔV_{45} – объем зоны повышенного радиоэха, ограниченный изосферой радиолокационной отражаемости $Z'_m = 45$ dBZ;
- I_i – скорострельность ПГР (шт./мин.);
- Δt_{Φ} – фактическая продолжительность воздействия на один ОБ 3–4-й (мин.), которая не должна превышать время градообразования в пространственно-фиксированном объеме градовых облаков, развивающихся в естественных условиях и при проведении на них активных воздействий.

Анализ полученных результатов, с применением уравнений (2) и (3) также показал увеличение как физической, так и экономической эффективности ПГЗ.

6. Критерии ИУО в ПООС [5, 6]

Радиолокационными критериями ИУО из ПООС являются значения параметров, удовлетворяющим следующим условиям: $\eta_{m3.2} \geq 10^{-11}$ см⁻¹ и/или $LgZ_r \approx 1.3$, $\Delta H_n \geq 1.5$ км, $t_{H_0} < -10$ °C. Они представлены табл. 5, где: $\eta_{m3.2}$ (см⁻¹) – максимальная удельная радиолокационная отражаемость в области отрицательных температур ПООС; ΔH_n (км) и t_{H_0} (°C) – мощность переохлажденной части ПООС и температура на их верхней границе ПООС; r (мм) – радиус рассеивающих частиц при длине волны $\lambda = 3.2$ см.

В литературных источниках в качестве критериев ОВ 1–4-й категорий (табл. 4) и ИУО (табл. 5) часто встречаются радиолокационные параметры отражаемости, имеющие и другие размерности: LgZ_d , Z'_d (dBZ), Z'_r (dBZ). Они все представлены в табл. 2 и позволяют оперативно перейти от одной размерности параметра радиолокационной отражаемости к другой и обратно.

Таблица 5. ПАРАМЕТРЫ КРИТЕРИЕВ ИСКУССТВЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ОСАДКОВ (ИРО) В ПООС
Table 5. The criteria parameters of artificial precipitation control (APC) in CCSF

Параметры ООС	Классы ООС				
	Cu-Cong	Cb	Ns-As-Cb	Ns-As-Ac	Ns-As
Z'_m , dBZ	≥ 15	≥ 15	≥ 15	≥ 15	≥ 15
ΔH_n , км	≥ 2.5	≥ 2.0	≥ 1.0	≥ 3.0	2.0
t_b , °C	< -10	< -10	< -10	< -10	< -10

Метод индикации полей облачности основан на определении вероятности их принадлежности к одному из приведенных в табл. 4 классов.

На рисунке 7 представлен график зависимости вероятности формирования Cu-Cong и Cb от значений радиолокационных и аэрологических параметров: $\eta_{m3.2}$ и LgZ_m , ΔH_n и t_b . На графике кривые вероятности индикации Cu-Cong и Cb строились с учетом нелинейной связи между η_m (LgZ_m) и ΔH_n (t_b) [16].

Если на графике точка с координатами (η_m , ΔH_n) попадает в область I, то с вероятностью $< 50\%$ индицируется Cb, а если в II и III, то с вероятностью более 50% индицируется КЯ типа Cb.

Воздействие в первом случае осуществляется на Cu-Cong с целью стимулирования процесса осадкообразования; во втором случае – на Cb целью интенсификации процесса осадкообразования.

Приведенный на рис. 7 график может быть использован для определения возможности перерастания Cu-Cong в стадию Cb, если со временем точка с координатами (η_m , ΔH_n) будет попадать из области I в область II или III.

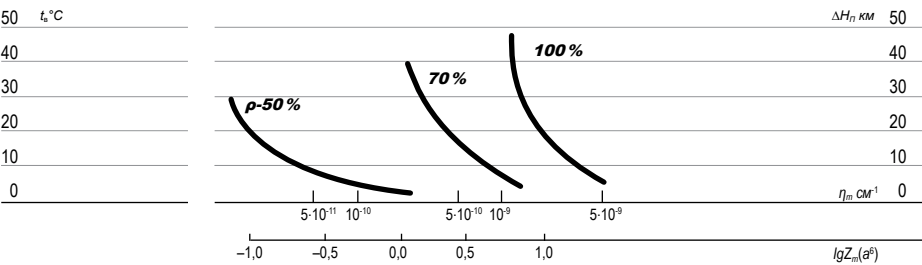


Рис. 7. Индикация Cu-Cong (I) и Cb (II) по данным МРЛ [16].
Fig. 7. The indication of Cu-Cong (I) and Cb (II) according to MR data [16].

Cu-Cong и Cb, подвергшиеся активному воздействию (АВ), могут находиться на опытной территории (ОТ) или вне ее. В последнем случае по скорости и направлению перемещения определяется возможность их попадания на ОТ. Во всех случаях осадки из КЯ, подвергшихся воздействию должны выпасть на опытной территории (ОТ).

Нормы расхода количества противогорадовых ракет «Алазань» в Cu-Cong и Cb, развивающихся в ПООС, рассчитываются в зависимости от значений радиолокационных и аэрологических параметров (рис. 8).

Пусть по данным МРЛ КЯ характеризуется следующими значениями параметров: $\eta_{m3.2} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{-1}$, $LgZ_m (r^6) = 0.7$, $\Delta H_n = 3 \text{ км}$ и $t_b = -15^\circ \text{C}$. Согласно графику (рис. 7) мы попадаем в область, где с вероятностью более 70% отмечается развитие Cb. В этом случае воздействие на Cb будет проводиться с целью интенсификации процесса осадкообразования с применением микрофизического засева [5, 6, 7]. Согласно приведенным радиолокационным данным и графика на рисунке 8 расход ПГР в точках пересечения значений координат этих параметров не превышает 3 шт. «Алазань».

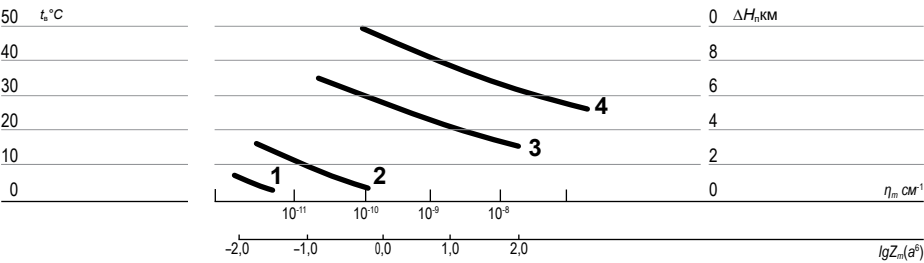


Рис. 8. Нормы расхода ПГР в КЯ в зависимости от значений $\eta_{m3.2}$, LgZ_m , ΔH_n и t_b (1–4 – изолинии количества израсходованных ПГР на одну КЯ) [16].
Fig. 8. The consumption rate of AHR in convection cell (CC) depending on the values of $\eta_{m3.2}$, LgZ_m , ΔH_n and t_b (1–4 – isometric lines of the AHR amount spent on one CC) [16].

7. Критерии шквалов различной силы в ПООС

Радиолокационные методы обнаружения шквалов со скоростью 15–25 м/с и более разрабатывались с участием автора этой статьи. Они представлены в «Методических указаниях по определению шквалов с использованием данных МРЛ» [3] и руководящем документе «Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, и МРЛ-5 [14] и отличаются друг от друга в подходе к использованию аэрологических и синоптических данных в методах обнаружения шквалов. Они предназначены для диагноза и сверхкраткосрочного прогноза скорости порывов ветра при шквале, связанных с развитием Cb в ПООС. Он предусматривает:

- определение мезомасштабной структуры очагов радиоэха с Сб и место локализации шквалов в них;
- выбор наиболее информативных радиолокационных параметров Сб, существенно влияющих на образование шквалов различной силы, в том числе и сильных шквалов ($V > 25$ м/с). К этим параметрам относятся высота радиоэха облака (H_b , км), направление (dd , град.) и скорость и его переноса (V_p , км/ч) а также отражаемость на уровне зоны формирования осадков (ЗФО) (LgZ_3).

По данным МРЛ сильный шквал диагностируется при следующих значениях радиолокационных параметров: $H \geq 10$ км и $V_p \geq 25$ км/ч. Заблаговременность радиолокационного метода диагноза и сверхкраткосрочного прогноза шквалов достигает 60 мин.

Аэросиноптико-радиолокационный метод [3, 14] отличается от радиолокационного метода дополнительным учетом аэрологических и синоптических данных для более надежного диагноза и сверхкраткосрочного прогноза фронтальных шквалов со скоростью более 25 м/с.

Аэрологические данные, включают в себя: скорость восходящих движений в облаке (W , м/с), фазовый состав осадков, высоту тропопаузы (H_t , км), температуру (t_b , °С) на высоте верхней границы радиоэха облака (H , км) и разность этих высот ($H - H_t$, км).

Синоптические данные, включают в себя разности тенденции давления (ΔP , гПа/3ч) и контрасты температур (ΔT , °С) на фронте.

Для диагноза сильных шквалов с $V \geq 25$ м/с построены графики, связывающие между собой параметры V_p и U (рис. 9а), ΔP и ΔT (рис. 9б).

На оси ординат графика (рис. 9а) нанесены значения скорости переноса радиоэха облака (V_p), полученные по данным МРЛ, а на оси абсцисс – значения дискриминантной функции (U), рассчитанные по аэрологическим данным и данным МРЛ с помощью следующего уравнения:

$$U = 0.2 \lg Z_3 + (H - H_t) - 0.1 t_b \quad (4)$$

ΔP рассчитывается, как максимальная разность тенденции падения и роста давления в пределах фронтального раздела длиной 500 км и шириной 300 км по направлению движения воздушных масс (рис. 10):

$$\Delta P = (\Delta P_1 - \Delta P_2), \text{ гПа/3ч} \quad (5)$$

ΔT рассчитывается, как максимальная разность температур в пределах той же полосы (рис. 10):

$$\Delta T = T_1 - T_2, \text{ °С} \quad (6)$$

Пусть в зоне холодного фронта (рис. 10) по данным МРЛ высота радиоэха Сб $H = 14$ км, $\lg Z_3 = 2.4$ и $V_p = 40$ км/ч; по аэрологическим данным высота тропопаузы $H_t = 12$ км, температура на высоте верхней границы радиоэха Сб $H_t = 57$ °С; по синоптическим данным $\Delta P_1 = 1.5$ гПа/3ч и $\Delta P_2 = 3.2$ гПа/3ч; $T_1 = 26$ °С и $T_2 = 20$ °С.

Диагноз сильного шквала выполняется в следующей последовательности.

С помощью уравнения (4) рассчитывается значение дискриминантной функции:

$$U = 0.2 \lg Z_3 + (H - H_t) - 0.1 t_b = 0.2 \cdot 2.4 + (14 - 12) - 0.1 \cdot (-57) \approx 8.2.$$

По рассчитанному значению $U = 8.2$ и измеренному с помощью МРЛ $V_p = 40$ км/ч входим в график (рис. 9а). Если на графике точка с координатами (U , V_p) попадает ниже кривой линии «аа», то ставится диагноз «без сильного шквала», а если на линию «аа» или выше ее, то диагноз шквала уточняется с помощью рисунка 9б. По значениям ΔP и ΔT уточняем диагноз сильного шквала. Если точка на рисунке 9б попадает выше или на линию «ббб», то диагностируется «сильный шквал», а если ниже и левее, то – отсутствие «сильного шквала». В заштрихованной зоне «сбб» шквал диагностируется при наличии грядовой структуры радиоэха облаков [3].

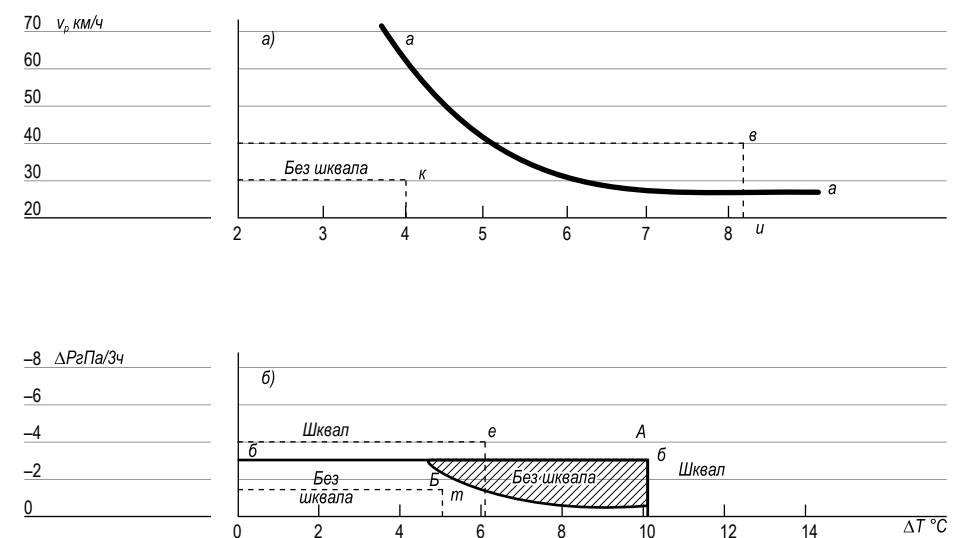


Рис. 9.

Графики определения ситуации шквалов различной силы.

Fig. 9. The graphs of defining the situation of different strength squalls [4].

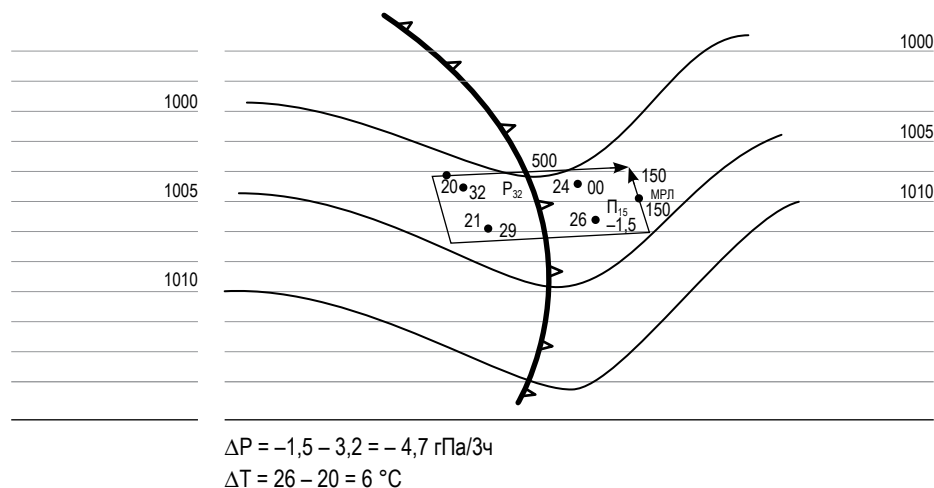


Рис. 10. Расчет значений ΔP и ΔT в зоне фронта [4].

Fig. 10. The calculation of ΔP and ΔT values in the front zone [4].

В условиях, когда по данным МРЛ диагностируется шквал с $V > 25$ м/с, возможно появление смерча, если $H_b \geq 11$ км, $\lg Z_3 \geq 3$, $Z'_{dm} = 25$ dBZ и $(H - H_T) \geq 1$; очаги радиозха расположены грядами, которые быстро сближаются друг с другом.

Выводы

В результате анализа многолетних аэросиноптических материалов и материалов радиолокационных наблюдений, полученных в регионе Центрального Кавказа с помощью визуальных наблюдений и дистанционных методов зондирования атмосферы, выявлено 5 типов ПООС. К ним относятся: Cu-Cong, Cb, Ns-As, Ns-As-Cb, Ns-As-As.

Значения параметров ПООС и характер их распределения в атмосфере и на поверхности Земли представлены в таблицах 1–3, на рисунках 1–5 и успешно используются в методах диагноза и сверхкраткосрочного прогноза опасных явлений погоды, работах по ПГЗ и ИУО.

Они позволяют с высокой вероятностью:

- уточнить классы ПООС для диагноза и сверхкраткосрочного прогноза опасных явлений погоды (ливни, грозы, град, шквалы более 25 м/с);
- оценить наблюдаемые в реальном масштабе времени типы градовых процессов, с целью выбора оптимальных площадок засева ПГР ОВ 1–4-й категорий [1, 5, 6, 20];

- разработать критерий объектов воздействия (ОВ) 1–4-й и уточнить нормы расхода льдообразующих реагентов в них в зависимости от геометрических и физических параметров ОВ 1–4-й категорий [6];
- разработать критерии пригодности ПООС для активных воздействий в работах по искусственному увеличению осадков и уточнить нормы расхода льдообразующих реагентов в них в зависимости от значений геометрических и физических параметров [5, 6].

Многие из вышеперечисленных проблем практически решены в работах автора [3–8, 14]. Они защищены патентом [4], одобрены Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим прогнозам Госкомгидромета [3], внедрены на сети Госкомгидромета [14] и успешно применяются в работах по ПГЗ и ИУО [3–8, 16].

Библиографический список

1. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М., Барекова М.В. Руководство по организации и проведению противорадовых работ. Нальчик: Печатный двор, 2014. 500 с.
2. Бартишвили Я.Т., Надибайдзе Г.А. Бегалишвили Н.А., Гудушари Ш.Л. К физическим основам метода ЗакНИГМИ борьбы с градом // Труды ЗакНИГМИ. 1978. Вып. 67(73). С. 73–82.
3. Бочарников Н.В., Брылев Г.Б., Песков Б.Е., Ватиашвили М.Р., Хохлов Г.В. Методические указания по определению шквалов с использованием данных МРЛ. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 23 с.
4. Ватиашвили М.Р., Джангуразов Х.Х., Кассиров В.П. Способ активных воздействий на градовые процессы. Патент РФ на изобретение №2321871, заявка № 2006 121792, а 01 G 15.10.2007.
5. Ватиашвили М.Р. Метод прерывания града на подступах защищаемой территории со стороны вторжения градовых облаков // Наука. Инновации. Технологии. 2016. №4. С. 7–24.
6. Ватиашвили М.Р. Метод прерывания града на защищаемых территориях региона Центрального Кавказа // Наука. Инновации. Технологии. 2018. №1. С. 7–22.
7. Ватиашвили М.Р. Обзор методов противорадовой защиты в регионе Центрального Кавказа // Наука. Инновации. Технологии. 2018. №3. С. 48–65.
8. Ватиашвили М.Р. Радиолокационная отражаемость облаков и осадков на различных длинах волн // Наука. Инновации. Технологии. 2017. №4. С. 105–118.

9. Зверев А.С. Синоптическая метеорология и основы предвычисления погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 711 с.
10. Карцивадзе А.И., Салуквадзе Т.Г., Лапинская В.А. Некоторые вопросы методики воздействия на градовые процессы с использованием противорадовой системы «Алазани» // Труды института геофизики АН Грузии. 1975. Т. 26. С. 13–27.
11. Мазин И.П. О классификации облаков по их фазовому строению. Индекс фазового строения облаков // Метеорология и гидрология. 2001. №11. С. 5–11.
12. Матвеев Л.Т. Общая метеорология. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 639 с.
13. Облака и облачная атмосфера. Справочник / под ред. И.П. Мазина и А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 647 с.
14. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, и МРЛ-5. РД 52.04.320-91. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 368 с.
15. Рунион Р. Справочник по непараметрической статистике: Современный подход / перевод с английского языка Е.З. Демиденко. М.: Финансы и кредит, 1982. 198 с.
16. Сванидзе Г.Г., Бегалишвили Н.А., Ватян М.Р., Карцивадзе А.И., Гудушаури Ш.Л. Методические указания по организации и проведению работ по искусственному увеличению осадков из конвективных облаков с помощью противорадовой техники. М.: Гидрометеиздат, 1986. 25 с.
17. Сулаквелидзе Г.К. Ливневые осадки и град. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 421 с.
18. Физика облаков / Под ред. А.Х. Хргиана и др. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 647 с.
19. Хргиан А.Х., Новожилова Н.И. Атлас облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 268 с.
20. Chisholm A.J., Renik J.H. Supercell and multicell Alberta hailstorms // Proc. Inter Cloud Physic Conf., 1972. London. P. 62–68.

References

1. Abshaev M.T., Abshaev A.M., Malkarova A.M., Barekova M.V. Rukovodstvo po organizatsii i provedeniyu protivogradovykh rabot (The Manual on organizing and executing of anti-hail works). Nalchik: OOO «Pechatnyi dvor», 2014. 500 p.
2. Bartishvili Ya.T., Nadibaidze G.A., Begalishvili N.A., Gudushauri Sh.L. K fizicheskim osnovam metoda ZakNIGMI bor'by s gradom. (To the physical foundations of the ZakNIGMI method of hail control) // Trudy ZakNIGMI, Is. 67 (73), 1978. P. 73-82.
3. Bocharnikov N.V., Brylev G.B., Peskov B.E., Vatiashvili M.R., Khokhlov G.V. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu shkvalov s ispolzovaniem dannykh MRL (Study guide on measuring squalls using MRL data). L.: Gidrometeoizdat, 1988. 23 p.

4. Vatiashvili M.R., Dzhangurazov Kh.Kh., Kassirov V.P. Sposob aktivnykh vozdeystviy na gradovye protsessy (The way of active influences on hail processes) // Patent RF na izobreteniyе №2321871, zayavka № 2006 121792, a 01 G 15/10/ 2007 (Patent of the Russian Federation for invention №2321871, application № 2006 121792, a 01 G 15/10/ 2007).
5. Vatiashvili M.R. Metod preryvaniya grada na podstupakh zashchishchaemoy territorii so storony vtorzheniya gradovykh oblakov (Method of interrupting hail at the approach lanes of the protected area from the direction of hail clouds invasion) // Nauka. Innovatsii. Tekhnologii (Science. Innovation. Technologies). 2016. №4. P. 7–24.
6. Vatiashvili M.R. Metod preryvaniya grada na zashchishchaemykh territoriyakh regiona Tsentralnogo Kavkaza (The method of hail breaking on the protected areas of the Central Caucasus region) // Nauka. Innovatsii. Tekhnologii (Science. Innovation. Technologies). 2018. №1. P. 7-22.
7. Vatiashvili M.R. Obzor metodov protivogradovoy zashchity v regione Tsentralnogo Kavkaza (The review of methods of anti-hail protection in the Central Caucasus region) // Nauka. Innovatsii. Tekhnologii (Science. Innovation. Technologies). 2018. №3. P. 48-65.
8. Vatiashvili M.R. Radiolokatsionnaya otrazhaemost' oblakov i osadkov na razlichnykh dlinakh voln (Radar reflection of clouds and precipitations at different wave lengths) // Nauka. Innovatsii. Tekhnologii (Science. Innovation. Technologies). 2017. №4. P. 105-118.
9. Zverev A.S. Sinopticheskaya meteorologiya i osnovy predvychneniya pogody (Synoptic meteorology and foundations of weather predictions). L.: Gidrometeoizdat, 1968. 711 p.
10. Kartivadze A.I., Salukvadze T.G., Lapinskas V.A. Nekotorye voprosy metodiki vozdeystviya na gradovye protsessy s ispolzovaniem protivogradovoi sistemy «Alazani» (Some issues of method of affecting hail processes with anti-hail system «Alazani») // Trudy instituta geofiziki AN Gruzii. 1975. Is. 26. P. 13-27.
11. Mazin I.P. O klassifikatsii oblakov po ikh fazovomu stroeniyu. Indeks fazovogo stroeniya oblakov (About clouds classification on their phase composition. The index of clouds phase composition) // Meteorology and Hydrology. 2001. №11. P. 5-11.
12. Matveev L.T. Obshchaya meteorologiya. Fizika atmosfery. (General Meteorology. Aerophysics). L.: Gidrometeoizdat, 1976. 639 p.
13. Oblaka i oblachnaya atmosfera. Spravochnik (Clouds and cloud atmosphere. Reference book) / Pod red. I.P. Mazinga and A.Kh. Khgiana. L.: Gidrometeoizdat, 1989. 647 p.
14. Rukovodstvo po proizvodstvu nablyudenii i primeneniyu informatsii s neavtomatizirovannykh radiolokatorov MRL-1, MRL-2 and MRL-5 (Manual on making observations and using information from non-computerized radars MRL-1, MRL-2 and MRL-5). RD 52. 04. 320-91. SPb.: Gidrometeoizdat, 1993. 368 p.

15. Runion R. Spravochnik po neparametricheskoy statistike: Sovremennyy podkhod (Handbook on Nonparametric Statistics: A Modern Approach) / perevod s angliyskogo yazyka Demidenko Ye.Z. (Translation from English Demidenko Ye.Z.). M.: Finansy i kredit, 1982. 198 p.
16. Svanidze G.G., Begalishvili N.A., Vatian M.R., Kartsivadze A.I., Gudushauri Sh.L. / Metodicheskie ukazaniya po organizatsii i provedeniyu rabot po iskusstvennomu uvelicheniyu osadkov iz konvektivnykh oblakov s pomosh'yu protigradovoy tekhniki. (Study guide on arranging and carrying out activities on artificial increasing of weather precipitations from convective clouds by means of anti-hail equipment) // M.: Gidrometeoizdat, 1986. 25 p.
17. Sulakvelidze G.K. / Livnevye osadki i grad (Cloud bursts and hailing). L.: Gidrometeoizdat, 1967. 421 p.
18. Fizika oblakov (The Physics of clouds) / Pod. Red. A.Kh. Khrgiana i dr. L.: Gidrometeoizdat, 1969. 647 p.
19. Khrgian A.Kh., Novozhilova N.I. Atlas oblakov (The Clouds Atlas). L.: Gidrometeoizdat, 1978. 268 p.
20. Chisholm A.J., Renik J.H. Supercell and multicell Alberta hailstorms // Proc. Inter Cloud Physic Conf., 1972. London. P. 62–68.

Рукопись поступила в редакцию 13.12.2018 г.

Принята к публикации 25.02.2019 г.

Сведения об авторе

Ватиашвили Михаил Рубенович. Кандидат географических наук, Доцент, Грузинский государственный научно-технический центр «Дельта» министерства обороны Грузии.
Грузия, г. Тбилиси, ул. Габриеля Салоса, 191.
Научный консультант по проектам.

About the author

Vatiashvili Mikhail Rubenovich Candidate of geographical sciences The senior lecturer Georgian state scientific and technological center "Delta" Ministries of Defence of Georgia Scientific consultant for projects +995 598-341-451.
Mivv123@mail.ru 191 Monk Gabriel Salos Ave. 0144

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ», № 1, 2019

25.00.30
УДК 551.513.22

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ И АГРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

**Рыжков Р.Д.,
Аванесян К.С.,
Смирнова Л.Н.,
Закинян Р.Г.**

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

ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОЙ КОНВЕКЦИИ СУХОГО ВОЗДУХА В АТМОСФЕРЕ

Введение:

Свободная конвекция – очень сложный и далеко еще не изученный до конца процесс. Очень сложен он в атмосфере, гидросфере, мантии и ядре Земли.

Это связано с огромными их размерами, что приводит к неоднородному распределению полей температуры, плотности и давления. Кроме того, на это накладывается вращение Земли, что делает еще более сложной задачу определения полей температуры, давления и скорости.

Она является, по существу, первопричиной почти всех движений в атмосфере.

Энергия большинства движений в океане на 80–90% обусловлена и индуцирована конвективными движениями атмосферы и на 10–20% свободной конвекцией, возникающей в самом океане.

Материалы и методы: Для определения условий возникновения конвекции сухого воздуха в рамках двумерной модели конвекции рассмотрим уравнение движения идеальной жидкости в плоскости $x - z$ в форме Эйлера в инерциальной системе отсчета, без учета вращения Земли [2, 4]:

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

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) - g.$$

Результаты
исследования:

Ячейки носят характер валов. Такой тип конвекции наиболее часто встречается в атмосфере.

Обсуждение и
заключение:

Таким образом, нами найдено аналитическое решение двумерной модели тепловой рэлееской конвекции сухого воздуха в атмосфере. Аналитическое решение получено для стационарного случая. Это значит, что для данного типа движения имеет место устойчивое состояние типа аттрактора.

Ключевые слова:

рэлееская конвекция, аналитическое решение, двумерная модель, вертикальный градиент температуры, уравнение движения, уравнение неразрывности, уравнение теплопроводности, функция тока.

Ryzhkov R.D.,
Avanesyan K.S.,
Smirnova L.N.,
Zakinyan R.G.

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

To the two-dimensional model of heat convection of dry air in the atmosphere

- Introduction:** Free convection is a very complex and far from studied process. It is very complex in the atmosphere, hydrosphere, mantle and core of the Earth. This is due to their huge size, which leads to an inhomogeneous distribution of temperature, density and pressure fields. In addition, the rotation of the Earth is superimposed on it, which makes it even more difficult to determine the temperature, pressure and velocity fields. It is essentially the root cause of almost all movements in the atmosphere. The energy of most movements in the ocean is 80–90% caused by the convective movements of the atmosphere and 10–20% by free convection that occurs in the ocean itself.
- Materials and methods:** To determine the conditions for the occurrence of dry air convection within the two-dimensional model of convection, consider the equation of motion of an ideal fluid in the Euler-shaped plane in an inertial frame of reference, without taking into account the Earth's rotation [2, 4]:
- $$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right),$$
- $$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) - g.$$
- Results of the study:** Cells are in the nature of shafts. This type of convection is most common in the atmosphere.
- Discussion and conclusion:** Thus, we have found an analytical solution of the two-dimensional model of Rayleigh thermal convection of dry air in the atmosphere. Analytical solution is obtained for the stationary case. This means that for this type of motion there is a steady state like an attractor.
- Keywords:** Rayleigh convection, analytical solution, two-dimensional model, vertical temperature gradient, equation of motion, continuity equation, heat equation, flow function.

Введение

Свободная конвекция – очень сложный и далеко еще не изученный до конца процесс. Очень сложен он в атмосфере, гидросфере, мантии и ядре Земли. Это связано с огромными их размерами, что приводит к неоднородному распределению полей температуры, плотности и давления. Кроме того, на это накладывается вращение Земли, что делает еще более сложным задачу определения полей температуры, давления и скорости.

Свободная конвекция является, по существу, первопричиной почти всех движений в атмосфере. Энергия большинства движений в океане на 80–90 % обусловлена и индуцирована конвективными движениями атмосферы и на 10–20% свободной конвекцией, возникающей в самом океане[1].

В настоящее время также почти неоспоримо, что в ходе длительного времени мантия Земли течет, участвуя в конвективном движении, возможна конвекция и в ядре планеты.

Свободная конвекция подразделяется на два основных типа: рэлеевская, обусловленная сверхadiaбатическим вертикальным градиентом температуры при однородности температуры и плотности по горизонтали, и боковая, вызванная неоднородностью этих условий по горизонтали [2].

Примерами боковой конвекции в атмосфере Земли являются:

- междуширотная циркуляция воздуха, вызванная неоднородным тепловым режимом на различных широтах;
- циркуляция муссонного типа, связанная с постоянным или сезонным различием теплового режима на поверхности материков и океанов;
- бризовая циркуляция, возникающая в результате неодинакового нагрева поверхности моря и материка или различных областей суши в суточном ходе изменения их теплового режима.

Примером вертикальной классической рэлеевской конвекции в атмосфере является конвекция, приводящая к образованию над большими пространствами небольших облаков, расположенных в порядке пчелиных сот [5].

К такому же типу относится конвекция, приводящая к развитию грозового облака. Особое место занимает вертикальная конвекция, возникающая в тропических ураганах, связанная с вертикальным температурным градиентом, обусловленным фазовыми переходами вода-пар и пар-вода. Аналогом междуширотной атмосферной циркуляции в океане является меридиональная циркуляция на средних широтах, вызванная боковой конвекцией, обусловленной опусканием поверхностных океанических вод в некоторых полярных областях Мирового океана. Боковая конвекция, по масштабам равная муссонной конвекции, в Мировом океане не типична. Она в среднем может развиваться лишь в водах вокруг Антарктики. Примеры боковой конвекции среднего масштаба в Мировом океане многочисленны. Она наблюдается в проливах, соединяющих моря, вода которых различна по температуре и солености, при сближении различной температуры и солености, что особенно часто наблюдается вблизи берегов, где воды опресняются стоком.

Вертикальная конвекция в океане в основном связана с охлаждением поверхности, осолонением в результате испарения и погружением поверхностных вод. Это происходит в результате суточного изменения температуры воздуха у поверхности воды, эпизодических изменений этой температуры, осенне-зимнего охлаждения и, наконец, постоянного охлаждения в полярных областях. Соответственно эта конвекция охватывает все более и более глу-

бокие слои океана. Локальные горизонтальные неоднородности охлаждения малого по протяженности масштаба приводят к локальным маломасштабным боковым конвенциям, с которыми связывают формирование тонкой термохалинной вертикальной структуры вод в пределах сезонного термоклина.

Как видим, если для атмосферы вообще более типична восходящая конвекция, то для океана – нисходящая.

Вертикальная конвекция в мантии Земли приводила и может приводить к дифференциации вещества Земли, например к выплавлению железа и опусканию его в ядро. Конвекцией в мантии некоторые исследователи пытаются объяснить разрастание дна океанов и формирование глубоководных желобов и вообще тектонику литосферных плит.

Естественно, конвекция не является монополией только геофизических явлений. С одной стороны, существует большое число примеров конвекции в технических задачах, с другой – конвекция возникает в атмосферах других планет, на Солнце, в недрах звезд. Несмотря на большой диапазон изменений вязкости, теплопроводности и других параметров различных сред, в которых возникает конвекция, она обладает рядом общих свойств, что позволяет рассмотреть различные случаи ее с единой точки зрения.

Несмотря на то, что вопросам конвекции в настоящее время посвящено уже много работ, в настоящее время нет адекватного решения двумерной модели конвекции сухого воздуха. Поэтому целью настоящей работы является получить аналитическое решение двумерной модели конвекции в случае ее стационарности.

Устойчивость того или иного стационарного течения, допускаемого уравнениями, имеет прямое отношение к его реализуемости. Более того, она часто рассматривается как основной критерий реализуемости: «Осуществляющиеся в природе течения должны не только удовлетворять гидродинамическим уравнениям, но должны еще быть устойчивыми: малые возмущения, раз возникнув, должны затухать со временем» [4]. Однако это необходимое условие не является достаточным. Класс устойчивых стационарных решений уравнений гидродинамики, вообще говоря, гораздо шире, чем класс течений, спонтанно возникающих в соответствующих условиях [2]. По мере накопления материала исследований становится все яснее, что на тезис «Реализуется то, что устойчиво» можно возразить: «Не всегда и не все то, что устойчиво, реализуется» [2].

Для выхода на некоторое устойчивое состояние могут потребоваться весьма специальные начальные условия, а может таковых и не найтись вообще. Конвекция Рэлея–Бенара является прекрасной иллюстрацией к сказанному.

Заметим, что в теории конвекции проблема реализуемости устойчивых течений является ключевой по отношению ко многим другим, в частности – выдвигаемым практикой.

Материалы и методы исследования

Для определения условий возникновения конвекции сухого воздуха в рамках двумерной модели конвекции рассмотрим уравнение движения идеальной жидкости в плоскости $x - z$ в форме Эйлера в инерциальной системе отсчета, без учета вращения Земли [2, 4]:

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

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) - g. \quad (2)$$

В состоянии равновесия (статики) [2]:

$$\mathbf{v} = 0, \quad \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = 0, \quad -\frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \right) - g = 0. \quad (3)$$

Здесь ρ – плотность воздушной частицы, участвующей в движении;
 ρ_e – плотность воздуха в состоянии статики атмосферы.
 Параметры атмосферы в состоянии статики мы рассматриваем как невозмущенное состояние. Поэтому давление представляем в виде [3]:

$$p = \bar{p} + p', \quad (4)$$

где p' – возмущение давления относительно состояния статики;

$$\rho_e(z) = \rho_{e0} e^{-\alpha(\gamma_A - \gamma)z} \quad (5)$$

– распределение плотности воздуха с высотой в состоянии статики атмосферы;
 γ_A – так называемый, градиент автоконвекции, он совпадает с градиентом температуры однородной по плотности атмосферы.

Будем считать, что температура атмосферы в состоянии статики изменяется по линейному закону:

$$T_e(z) = T_{e0} - \gamma z, \quad (6)$$

где γ – градиент температуры окружающего воздуха;

$T_{\text{с0}}$ – температура окружающего воздуха вблизи поверхности земли.

Будем считать, что температуру возмущенной атмосферы можно представить в виде:

$$T = T_{\text{е}}(z) + \theta(x, z), \quad (7)$$

где $\theta(x, z)$ – возмущение температуры, неизвестная функция.

Для плотности

$$\rho = \rho_{\text{е}} + \rho', \quad (8)$$

Запишем уравнение неразрывности в декартовой системе координат

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + u \frac{\partial \rho'}{\partial x} + w \frac{\partial \rho'}{\partial z} + \rho_{\text{е}} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0. \quad (9)$$

В стационарном случае, когда

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} = 0, \quad (10)$$

уравнение неразрывности запишется в виде

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = -w \frac{\partial \ln \rho_{\text{е}}}{\partial z} + \frac{1}{\rho_{\text{е}}} \left(u \frac{\partial \rho'}{\partial x} + w \frac{\partial \rho'}{\partial z} \right). \quad (11)$$

$$\text{Так как} \quad \frac{\partial \ln \rho_{\text{е}}}{\partial z} \approx -\alpha(\gamma_{\text{А}} - \gamma), \quad (12)$$

и пренебрегая нелинейными слагаемыми в правой части уравнения (11), то получим

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = \alpha(\gamma_{\text{А}} - \gamma) w. \quad (13)$$

Заметим, что равенство нулю дивергенции скорости равносильно, как видно из выражения (12), $\gamma \rightarrow \gamma_{\text{А}}$.

Таким образом, свободная тепловая конвекция в атмосфере с ненулевой дивергенцией скорости движения воздуха описывается системой уравнений:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{\text{е}}} \frac{\partial p'}{\partial x}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{\text{е}}} \frac{\partial p'}{\partial z} - g\rho', \quad (15)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = \alpha(\gamma_{\text{А}} - \gamma) w. \quad (16)$$

Уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla) T = \kappa \nabla^2 T, \quad (17)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \left(u \frac{\partial}{\partial x} + w \frac{\partial}{\partial z} \right) \theta = \gamma \cdot w + \kappa \nabla^2 \theta, \quad (18)$$

где κ – коэффициент температуропроводности.

В стационарном случае уравнение теплопроводности запишется в виде:

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \gamma \cdot w + \kappa \nabla^2 \theta. \quad (19)$$

Если принять $\kappa = 0$, что представляется разумным, так как в модели конвекции мы рассматриваем движение невязкого воздуха (идеальная жидкость) с коэффициентом вязкости равным нулю ($\nu = 0$), то получим

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \gamma \cdot w. \quad (20)$$

Таким образом, задача свелась к решению системы уравнений (14) – (16), (20).

Добавим уравнение состояния:

$$p = \rho RT, \quad p' = \rho_{\text{е}} R \theta + RT_{\text{е}} \rho'. \quad (21)$$

Тогда уравнения движения запишутся в виде:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -R \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{RT_{\text{е}}}{\rho_{\text{е}}} \frac{\partial \rho'}{\partial x}, \quad (22)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = R \alpha(\gamma_{\text{А}} - \gamma) \theta - R \frac{\partial \theta}{\partial z} - \left(g - \frac{R}{\rho_{\text{е}}} \gamma \right) \rho' - \frac{RT_{\text{е}}}{\rho_{\text{е}}} \frac{\partial \rho'}{\partial z}. \quad (23)$$

Таким образом, получаем систему уравнений:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -R \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{RT_{\text{е}}}{\rho_{\text{е}}} \frac{\partial \rho'}{\partial x}, \quad (24)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = R\alpha(\gamma_A - \gamma)\theta - R \frac{\partial \theta}{\partial z} - \left(g - \frac{R}{\rho_e} \gamma\right) \rho' - \frac{RT_e}{\rho_e} \frac{\partial \rho'}{\partial z}, \quad (25)$$

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \gamma \cdot w, \quad (26)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = \alpha(\gamma_A - \gamma)w. \quad (27)$$

Здесь у нас 4 уравнения и 4 неизвестные функции.
Введем новые функции:

$$u = \tilde{u} e^{\alpha(\gamma_A - \gamma)z}, \quad w = \tilde{w} e^{\alpha(\gamma_A - \gamma)z}. \quad (28)$$

Тогда уравнение неразрывности (27) примет вид:

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial z} = 0. \quad (29)$$

Из уравнения (29) следует, что можно ввести «функцию тока»

$$\tilde{u} = \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad \tilde{w} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (30)$$

$$\text{Отсюда} \quad u = e^{\alpha(\gamma_A - \gamma)z} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad w = -e^{\alpha(\gamma_A - \gamma)z} \frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (31)$$

Уравнения (24) и (25) запишутся в виде:

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = e^{-2\alpha(\gamma_A - \gamma)z} \left(-R \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{RT_e}{\rho_e} \frac{\partial \rho'}{\partial x} \right), \quad (32)$$

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial x} + \alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = \\ & = e^{-2\alpha(\gamma_A - \gamma)z} \left[R\alpha(\gamma_A - \gamma)\theta - R \frac{\partial \theta}{\partial z} - \left(g - \frac{R}{\rho_e} \gamma\right) \rho' - \frac{RT_e}{\rho_e} \frac{\partial \rho'}{\partial z} \right], \end{aligned} \quad (33)$$

Введем новые функции:

$$\tilde{\theta} = e^{-2\alpha(\gamma_A - \gamma)z} \theta, \quad \tilde{\rho} = \rho' e^{-2\alpha(\gamma_A - \gamma)z}, \quad \tilde{\theta} = \tilde{\theta} e^{2\alpha(\gamma_A - \gamma)z}, \quad \rho' = \tilde{\rho} e^{2\alpha(\gamma_A - \gamma)z}. \quad (34)$$

Тогда уравнения (32) и (33) запишутся в виде:

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = -R \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x} - \frac{RT_e}{\rho_e} \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial x}, \quad (35)$$

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial x} + \alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = \\ & = -\alpha R(\gamma_A - \gamma) \tilde{\theta} - R \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial z} - \left(g - \frac{R}{\rho_e} \gamma + 2\alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{RT_e}{\rho_e}\right) \tilde{\rho} - \frac{RT_e}{\rho_e} \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial z}. \end{aligned} \quad (36)$$

Таким образом, надо решить систему уравнений:

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = -R \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x} - \frac{RT_e}{\rho_e} \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial x}, \quad (37)$$

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial x} + \alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) = \\ & = -\alpha R(\gamma_A - \gamma) \tilde{\theta} - R \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial z} - \left(g - \frac{R}{\rho_e} \gamma + 2\alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{RT_e}{\rho_e}\right) \tilde{\rho} - \frac{RT_e}{\rho_e} \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial z}, \end{aligned} \quad (38)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial z} - 2\alpha(\gamma_A - \gamma) \tilde{\theta} \frac{\partial \psi}{\partial x} = -\gamma e^{-2\alpha(\gamma_A - \gamma)z} \frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (39)$$

Здесь у нас 3 уравнения и 3 неизвестные функции. Найдем уравнение совместности двух уравнений (37) и (38). Для чего возьмем производную по переменной z от (37) и по переменной x от (38) и вычтем полученные уравнения друг из друга:

$$\begin{aligned} & \psi_z(\psi_{xx} + \psi_{zz})_x - \psi_x(\psi_{xx} + \psi_{zz})_z - \alpha(\gamma_A - \gamma)(\psi_{xz}\psi_z + \psi_x\psi_{xx} + \psi_x(\psi_{xx} + \psi_{zz})) = \\ & = \left[g + \alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{RT_e}{\rho_e} \right] \tilde{\rho}_x + \alpha R(\gamma_A - \gamma) \tilde{\theta}_x. \end{aligned} \quad (40)$$

Введем обозначение:

$$\psi_{xx} + \psi_{zz} = \Omega \quad (41)$$

– «вихрь скорости». Тогда получим

$$\begin{aligned} & \psi_z \Omega_x - \psi_x \Omega_z - \alpha(\gamma_A - \gamma)(\psi_{xz}\psi_z + \psi_x\psi_{xx} + \psi_x\Omega) = \\ & = \left[g + \alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{RT_e}{\rho_e} \right] \tilde{\rho}_x + \alpha R(\gamma_A - \gamma) \tilde{\theta}_x. \end{aligned} \quad (42)$$

Частное решение можно искать в виде:

$$\psi_z \Omega_x - \psi_x \Omega_z - \alpha(\gamma_A - \gamma) \psi_x \Omega = \left[g + \alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{RT_e}{\rho_e} \right] \tilde{\rho}_x, \quad (43)$$

$$\psi_{xz}\psi_z + \psi_x\psi_{xx} = -R\tilde{\theta}_x. \quad (44)$$

Уравнение (44) можно записать в виде:

$$\frac{1}{2}(\psi_z^2 + \psi_x^2)_x = -R\tilde{\theta}_x.$$

Решение ищем при условии:

$$\psi_{xx} + \psi_{zz} = \Omega, \quad \Omega = F(\psi), \quad (45)$$

$$\psi_z f' \psi_x - \psi_x f' \psi_z - \alpha(\gamma_A - \gamma) \psi_x \Omega = \left[g + \alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{RT_e}{\rho_e} \right] \tilde{\rho}_x.$$

Тогда уравнения (43) и (44) примут вид:

$$-\alpha(\gamma_A - \gamma) F(\psi) \psi_x = \left[g + \alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{RT_e}{\rho_e} \right] \tilde{\rho}_x, \quad (46)$$

$$\frac{1}{2}(\psi_z^2 + \psi_x^2) + f(z) = -R\tilde{\theta}, \quad (47)$$

где $F(z)$ – произвольная функция. Уравнение (46) можно представить в виде:

$$-\alpha(\gamma_A - \gamma) F_1(\psi) + F_2(z) = \int \left[g + \alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{RT_e}{\rho_e} \right] \tilde{\rho}_x dx,$$

где $F_2(z)$ – произвольная функция.

Решение уравнения Клейна–Гордона (45) ищем в виде [3]:

$$\psi = \ln \Phi, \quad \Phi(\eta, \bar{\eta}) = \frac{1}{|w(\eta)|} \sum_{i,j=1}^n h_{ij} \varphi_i(\eta) \varphi_j(\bar{\eta}), \quad (48)$$

$$w(\eta) = \varphi_1(\eta) \frac{\partial \varphi_2}{\partial \eta} - \varphi_2(\eta) \frac{\partial \varphi_1}{\partial \eta} = \begin{vmatrix} \varphi_1 & \varphi_2 \\ \partial \varphi_1 & \partial \varphi_2 \end{vmatrix},$$

$$w(\bar{\eta}) = \varphi_1(\bar{\eta}) \frac{\partial \varphi_2}{\partial \bar{\eta}} - \varphi_2(\bar{\eta}) \frac{\partial \varphi_1}{\partial \bar{\eta}}.$$

Здесь $\eta = x + iz$, $\bar{\eta} = x - iz$,

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \eta} + \frac{\partial}{\partial \bar{\eta}}, \quad \frac{\partial}{\partial z} = i \frac{\partial}{\partial \eta} - i \frac{\partial}{\partial \bar{\eta}} = i \left(\frac{\partial}{\partial \eta} - \frac{\partial}{\partial \bar{\eta}} \right),$$

$$\frac{\partial}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial \eta} + \frac{\partial}{\partial \bar{\eta}} \right) = \left(\frac{\partial}{\partial \eta} + \frac{\partial}{\partial \bar{\eta}} \right)^2 = \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} + 2 \frac{\partial^2}{\partial \eta \partial \bar{\eta}} + \frac{\partial^2}{\partial \bar{\eta}^2},$$

$$\frac{\partial}{\partial z^2} = - \left(\frac{\partial}{\partial \eta} - \frac{\partial}{\partial \bar{\eta}} \right)^2 = - \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} + 2 \frac{\partial^2}{\partial \eta \partial \bar{\eta}} - \frac{\partial^2}{\partial \bar{\eta}^2},$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = 4 \frac{\partial^2}{\partial \eta \partial \bar{\eta}},$$

$$\nabla^2 \psi = 4 \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta \partial \bar{\eta}}.$$

Пусть, $h_{12} = h_{21} = 0$,

$$\Phi = \frac{1}{w} [h_{11} \varphi_1(\eta) \varphi_1(\bar{\eta}) + h_{22} \varphi_2(\eta) \varphi_2(\bar{\eta})],$$

$$\varphi_1 = \sin k\eta, \quad \varphi_2 = \cos k\eta, \quad |w(\eta)| = k.$$

Тогда

$$\Phi = \frac{1}{k} (h_{11} \sin^2 kx + h_{22} \cos^2 kx) \operatorname{ch}^2 kz + \frac{1}{k} (h_{11} \cos^2 kx + h_{22} \sin^2 kx) \operatorname{sh}^2 kz$$

$$\psi = \ln \left[\frac{1}{k} (h_{11} \sin^2 kx + h_{22} \cos^2 kx) \operatorname{ch}^2 kz + \frac{1}{k} (h_{11} \cos^2 kx + h_{22} \sin^2 kx) \operatorname{sh}^2 kz \right]. \quad (49)$$

Отсюда

$$u = \frac{2k(h_{11} + h_{22}) e^{\alpha(\gamma_A - \gamma)z} \operatorname{ch} kz \cdot \operatorname{sh} kz}{(h_{11} \sin^2 kx + h_{22} \cos^2 kx) \operatorname{ch}^2 kz + (h_{11} \cos^2 kx + h_{22} \sin^2 kx) \operatorname{sh}^2 kz}, \quad (50)$$

$$w = - \frac{k(h_{11} - h_{22}) e^{\alpha(\gamma_A - \gamma)z} \cdot \sin 2kx}{(h_{11} \sin^2 kx + h_{22} \cos^2 kx) \operatorname{ch}^2 kz + (h_{11} \cos^2 kx + h_{22} \sin^2 kx) \operatorname{sh}^2 kz}. \quad (51)$$

Результаты исследования и их обсуждение

График функции тока в безразмерных единицах качественно представлен на рисунке 1.

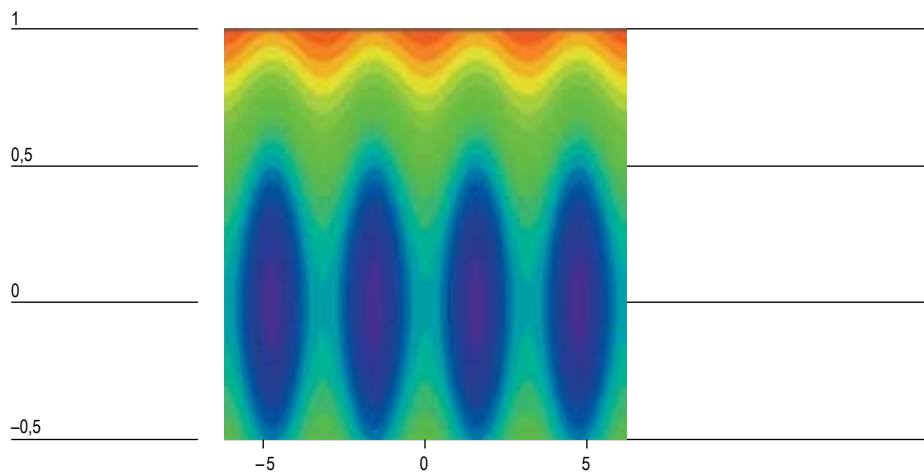


Рис. 1. График функции тока.

Fig. 1. Flow function graph.

Из рисунка видно, ячейки носят характер валов. Такой тип конвекции наиболее часто встречается в атмосфере.

Выводы

Таким образом, нами найдено аналитическое решение двумерной модели тепловой рэлеевской конвекции сухого воздуха в атмосфере. Аналитическое решение получено для стационарного случая. Это значит, что для данного типа движения имеет место устойчивое состояние типа аттрактора. При выводе были сделаны следующие допущения. Предполагалось, что плотность воздуха в состоянии статики атмосферы подчиняется барометрическому закону (5). В общем, это не так, но для рассматриваемой нами подоблачной конвекции это хорошее приближение. Вертикальный градиент температуры считался постоянным во всем слое атмосферы. В действительности в атмосфере и в подоблачном слое часто встречаются инверсионные или задерживающие слои. Но такое допущение позволяет получить аналитическое решение. В выражении для дивергенции скорости (13) мы пренебрегли нелинейными слагаемыми. Это, конечно сильное допущение, но в противном случае уравнение сильно усложняется и не представляется возможным поиск аналитического решения.

Библиографический список

1. Алексеев В.В., Гусев А.М. Свободная конвекция в геофизических процессах // Успехи физических наук. 1983. Т. 141. Вып. 2. С. 311–342.
2. Гетлинг А.В. Конвекция Рэлея–Бенара. Структура и динамика. М.: Эдиаториал УРСС, 1999. 247 с.
3. Журавлев В.М. Нелинейные волны в многокомпонентных системах с дисперсией и диффузией. Точно решаемые модели. Ульяновск: УлГУ, 2001. 200 с.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Гидродинамика. М.: Наука, 1986. Т. 6. 736 с.
5. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 779 с.
6. Emanuel, K.A. Atmospheric Convection; Oxford University Press: New York, 1994.
7. Zakinyan, R.G.; Zakinyan, A.R.; Lukinov, A.A. Two-dimensional analytical model of dry air thermal convection. Meteorol. Atmos. Phys. 2015, 127, 451–455.

References

1. Altkseev V.V., Gusev A.M. Svobodnaya konvekciya v geofizicheskikh processakh. (Free convection in geophysical processes) // Uspekhi fizicheskikh nauk, 1983. T. 141. Vyp. 2. S. 311–342.
2. Getling A.V. Konvekciya Releya–Benara. Struktura i dinamika. (Rayleigh–Benard Convection. Structure and Dynamics). M.: Editorial URSS, 1999. 247 s.
3. Zjuravlyov V.M. Nelineynye volny v mnogokomponentnykh sistemakh s dispersiyey i difuziyey. Tochno reshayemyye modeli (Non-linear waves in multicomponent systems with dispersion and diffusion. Exactly solvable models). Ulyanovsk: UIGU, 2001. 200 s.
4. Landau L.D., Lifshic Ye.M. Teoreticheskaya fizika: Gidrodinamika. (Theoretical Physics: Hydrodynamics) M.: Nauka, 1986. T. 6. 736 s.
5. Matveyev L.T. Fizika atmosfery. (Atmospheric physics) SPb: Gidrometeoizdat 2000. 779 s.
6. Emanuel, K.A. Atmospheric Convection; Oxford University Press: New York, 1994.
7. Zakinyan, R.G., Zakinyan, A.R., Lukinov, A.A. Two-dimensional analytical model of dry air thermal convection. Meteorol. Atmos. Phys. 2015, 127, 451–455.

Рукопись поступила в редакцию 13.01.2018 г. Принята к публикации 25.02.2019 г.

Об авторах

- Рыжков Р.Д., аспирант кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета. Телефон 8-928-372-92-04. E-mail: romandesignllc@gmail.com.
- Аванесян К.С., аспирант кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета.
- Смирнова Л.Н., аспирант кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета. Телефон 8-962-402-15-87.
- Закинян Р.Г., профессор кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета. Телефон 8-918-778-86-75. E-mail: zakinyan@mail.ru.

About the authors

- Ryzhkov R.D., Post-Graduate Student, Department of General and Theoretical Physics, North-Caucasian Federal University. Phone: 8-928-372-92-04. E-mail: romandesignllc@gmail.com.
- Avanesyan K.S., graduate student of the Department of General and Theoretical Physics of the North Caucasus Federal University. E-mail: awan.kristina@yandex.ru.
- Smirnova L., Postgraduate Student, Department of General and Theoretical Physics, North-Caucasian Federal University. Phone: 8-962-402-15-87.
- Zakinyan R.G., Professor of the Department of General and Theoretical Physics of the North Caucasus Federal University. Phone: 8-918-778-86-75. E-mail: zakinyan@mail.ru.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ», № 1, 2019

25.00.30
УДК 551.513.22

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ И АГРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

Набродова Е.Г.,
Шмигельский В.А.,
Сурнева О.Б.,
Яновская О.С.Северо-Кавказский федеральный университет,
Россия,
г. Ставрополь.
shmigelskiy.92777@mail.ru**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ
СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ
ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН
В АТМОСФЕРЕ ОТ ШИРОТЫ**

Введение:

Волны в атмосфере играют важную роль, так как они определяют как интенсивность погодообразующих явлений, так и скорость их перемещения. Правда остается открытым вопрос о причине возбуждения планетарных волн. Они могут возбуждаться процессами, происходящими в нижней атмосфере, а также их причиной могут быть возмущения стратосферы. В любом случае, сформировавшись, планетарная волна будет влиять на процессы, происходящие в тропосфере. Поэтому исследование скорости их распространения является актуальной проблемой в задачах прогнозирования погоды.

Материалы и методы:

Система уравнений, описывающих крупномасштабную динамику атмосферы, является сложной и в общем виде не решается. Поэтому обращаются к процедуре линеаризации уравнений. Насколько это правомерно остается открытым, так как волны могут быть нелинейными и все разнообразие явлений обусловлено именно их нелинейностью. Рассмотрим движение сухого воздуха, описываемого уравнением движения идеальной жидкости в неинерциальной системе отсчета, с учетом вращения Земли:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla) \mathbf{v} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + 2[\mathbf{v} \omega_0]$$

Результаты
исследования:

Получилось сложное уравнение 4-го порядка. Рассмотрим предельные случаи: высокочастотные и низкочастотные колебания. В случае высокочастотных колебаний можно записать:

$$\omega^4 - (2\omega_{0z})^2 R\alpha(\gamma_A - \gamma)\gamma k_z + (2\omega_{0z})^2 R\gamma k_z^2 = 0,$$

$$\omega = (1 \pm i)\sqrt{\omega_{0z}}(R\gamma k_z)^{1/4} = \omega_r \pm i\omega_i, \quad \omega_r = \sqrt{\omega_{0z}}(R\gamma k_z)^{1/4}.$$

Обсуждение
и заключение:

Таким образом, рассмотрев систему уравнений, описывающих динамику внутренних гравитационных волн в атмосфере, после линеаризации мы получили дисперсионное соотношение. Система уравнений решалась в приближении f -плоскости, т.е. параметр Кориолиса считался постоянным. При этом считалось, что плотность воздуха в состоянии статике атмосферы подчиняется барометрическому закону. В пределах тропосферы такое допущение является приемлемым.

Ключевые слова:

Внутренние гравитационные волны, уравнение движения, уравнение неразрывности, уравнение теплопроводности, статика атмосферы, процедура линеаризации, дисперсионное соотношение, линейные волны.

Nabrodova Ye.G.,
Shmigelsky V.A.,
Surneva O.B.,
Yanovskaya O.S.

North-Caucasian Federal University,
Stavropol,
Russia,
shmigelskiy.92777@mail.ru

To the dependence of speed spray distribution of gravitational waves in the atmosphere of latitude

Introduction: Waves in the atmosphere play an important role, as they determine both the intensity of weather-forming phenomena and the speed of their movement. The truth remains the question of the reason for the excitation of planetary waves. They can be excited by processes occurring in the lower atmosphere, as well as their cause may be disturbances of the stratosphere. In any case, having formed, the planetary wave will influence the processes occurring in the troposphere. Therefore, the study of the speed of their distribution is a pressing problem in weather forecasting problems.

Materials and methods:

The system of equations describing the large-scale dynamics of the atmosphere is complex and cannot be solved in general. Therefore, refer to the procedure of linearization of equations. The extent to which it is valid remains open, since the waves can be non-linear and the whole variety of phenomena is determined precisely by their non-linearity.

Consider the movement of dry air, described by the equation of motion of an ideal fluid in a non-inertial reference system, taking into account the rotation of the Earth:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla) \mathbf{v} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + 2[\mathbf{v} \boldsymbol{\omega}_0]$$

Results of the research: The result is a complex equation of the 4th order. Consider the limiting cases: high-frequency and low-frequency oscillations. In the case of high-frequency oscillations, we can write:

$$\begin{aligned} \omega^4 - (2\omega_{0z})^2 R\alpha(\gamma_A - \gamma)\gamma k_z + (2\omega_{0z})^2 R\gamma k_z^2 &= 0, \\ \omega = (1 \pm i)\sqrt{\omega_{0z}}(R\gamma k_z)^{1/4} &= \omega_r \pm i\omega_i, \\ \omega_r = \sqrt{\omega_{0z}}(R\gamma k_z)^{1/4}. \end{aligned}$$

Discussion and conclusion:

Thus, having considered the system of equations describing the dynamics of internal gravity waves in the atmosphere, after linearization we obtained the dispersion relation. The system of equations was solved in the f-plane approximation, i.e. Coriolis parameter was considered constant. At the same time, it was believed that the density of air in the state of static atmosphere obeys the barometric law. Within the troposphere, this assumption is acceptable.

Key words: internal gravity waves, equation of motion, continuity equation, heat equation, atmospheric static, linearization procedure, dispersion relation, linear waves.

ВВЕДЕНИЕ

Волны в атмосфере – это процесс распространения периодических движений, налагающихся на общий перенос воздуха [3]. Кроме упругих продольных звуковых (акустических) волн, в атмосфере существует несколько типов атмосферных волн, различных по происхождению и характеру с большими длинами волн. К таким волнам относятся волны, развивающиеся на границе двух воздушных слоёв, движущихся с разными скоростями и имеющими различные плотности и температуры. При этом в гребнях волн, где имеет место восходящее движение воздуха, происходит охлаждение воздуха, содержащийся в нём водяной пар конденсируется, и образуются облака. В ложбинах волн, где возникают нисходящие течения, воздух нагревается и удаляется от состояния насыщения, и небо между гребнями остается чистым, в результате появляются гряды волнистых облаков [1]. Аналогичный процесс происходит в так называемых горных волнах, возникающих при обтекании гор, возвышенностей и т.п. Колебательные движения продолжаются довольно долго после того, как данный объём воздуха миновал горное препятствие. Волны этого типа – короткие волны – широко распространены. Они влияют на полёт летательных аппаратов, часто порождая, например, болтанку самолётов. Амплитуда и длина волн этого типа тем больше, чем больше разность скоростей движущихся масс и чем меньше разность плотностей и температур. Длина волн – от сотен метров до десятков километров, а амплитуда до 1–2 километров. Скорости восходящих движений, например, в гребнях горных волн могут достигать нескольких метров в секунду, этой их особенностью пользуются планеристы [2].

Кроме коротких волн в атмосфере (когда частицы колеблются в вертикальной плоскости), в атмосфере существуют волны крупного масштаба с длинами в сотни и тысячи километров; колебания в этом случае происходят преимущественно в горизонтальном направлении. Во-первых, это циклонические волны, возникающие на атмосферных фронтах, т.е. на границах между воздушными массами с разной температурой. При потере устойчивости эти волны приводят к образованию циклонов. Существуют также так называемые длинные волны: господствующий в средних широтах земной атмосферы западный поток является волнообразным; длина этих волн порядка нескольких тысяч километров, так что по окружности земного шара обычно укладывается несколько (3–6) длинных волн. Одна из причин их возникновения – различие в температурных условиях континентов и океанов. Циклонические и длинные волны в атмосфере определяют режим погоды над большими территориями; их изучение играет первостепенную роль для прогноза погоды [4].

Существуют и другие типы волн в атмосфере: волны тропопаузы – изменения высоты тропопаузы при перемещении в атмосфере циклонов и антициклонов; приливные волны, обусловленные притяжением Луны и Солнца [5].

В настоящей работе аналитическими методами получено дисперсионное соотношение для планетарных волн в атмосфере в приближении f-плоскости и получено выражение для скорости их распространения в зависимости от широты.

Материалы и методы исследования

Рассмотрим движение сухого воздуха, описываемого уравнением движения идеальной жидкости в неинерциальной системе отсчета, с учетом вращения Земли [1–10]:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla) \mathbf{v} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + 2[\mathbf{v} \boldsymbol{\omega}_0], \quad (1)$$

где $\mathbf{v}$ – скорость движения частицы воздуха;
 ρ – плотность движущейся частицы воздуха;
 p – давление на движущуюся частицу воздуха со стороны окружающей ее воздуха.

Рассмотрим плоскость, касательную к поверхности Земли в данной точке. Ось z направим перпендикулярно поверхности Земли. В состоянии равновесия (статики):

$$\mathbf{v} = 0, \quad \mathbf{g} - \frac{1}{\rho_e} \nabla \bar{p} = 0. \quad (2)$$

Здесь ρ_e – плотность воздуха в состоянии статики;
 g – ускорение свободного падения.

Давление можно представить в виде $p = \bar{p} + p'$. Параметры атмосферы в состоянии статики мы рассматриваем как невозмущенное состояние: $\rho = \rho + \rho'$,

$$\rho_e(z) = \rho_{e0} e^{-\alpha(\gamma_A - \gamma)(z+h)} \quad (3)$$

– распределение плотности воздуха с высотой в состоянии статики атмосферы;
 γ_A – так называемый, *градиент автоконвекции*, он совпадает с градиентом температуры однородной по плотности атмосферы.

Запишем **уравнение неразрывности** в декартовой системе координат

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + u \frac{\partial \rho'}{\partial x} + v \frac{\partial \rho'}{\partial y} + w \frac{\partial \rho'}{\partial z} + w \frac{\partial \rho_e}{\partial z} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0. \quad (4)$$

Будем считать, что температура атмосферы в состоянии статики изменяется по линейному закону: $T_{e0}(z) = T_{e0} - \gamma z$, где γ – градиент температуры воздуха в состоянии статики; T_{e0} – температура воздуха вблизи поверхности земли в состоянии статики.

Будем считать, что температуру возмущенной атмосферы можно представить в виде:

$$T = T_e(z) + \theta(x, y, z), \quad (5)$$

здесь $\theta(x, y, z)$ – ее возмущение, неизвестная функция.

Уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla) \theta = \gamma \cdot w + \kappa \nabla^2 \theta,$$

где κ – коэффициент температуропроводности.

Если принять $\kappa = 0$, что представляется разумным, так как мы рассматриваем движение невязкого воздуха (идеальная жидкость) с коэффициентом вязкости равным нулю ($\nu = 0$), то получим

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \gamma \cdot w. \quad (6)$$

Таким образом, мы имеем систему уравнений

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial p'}{\partial x} \right) + 2\omega_{0z}u - 2\omega_{0y}v, \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial p'}{\partial y} \right) - 2\omega_{0z}u, \quad (8)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial p'}{\partial z} \right) - g\rho' + 2\omega_{0y}u, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + u \frac{\partial \rho'}{\partial x} + v \frac{\partial \rho'}{\partial y} + w \frac{\partial \rho'}{\partial z} + w \frac{\partial \rho_e}{\partial z} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \gamma \cdot w. \quad (11)$$

**Линеаризация уравнений
и дисперсионное соотношение**

Линеаризуем систему уравнений (7) – (11):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial p'}{\partial x} \right) + 2\omega_{0z}u - 2\omega_{0y}v, \quad (12)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial p'}{\partial y} \right) - 2\omega_{0z}u, \quad (13)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial p'}{\partial z} \right) - g\rho' + 2\omega_{0y}u, \quad (14)$$

$$\frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p'}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \alpha(\gamma_A - \gamma)w. \quad (15)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \gamma \cdot w. \quad (16)$$

Добавим уравнение состояния:

$$p = \rho RT, \quad p' = \rho_e R\theta + RT_e \rho'. \quad (17)$$

Тогда система уравнений (12) – (14) запишется в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -R \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{RT_e}{\rho_e} \frac{\partial \rho'}{\partial x} + 2\omega_{0z}u - 2\omega_{0y}v, \quad (18)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -R \frac{\partial \theta}{\partial y} - \frac{RT_e}{\rho_e} \frac{\partial \rho'}{\partial y} - 2\omega_{0z}u, \quad (19)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -R \frac{\partial \theta}{\partial z} + R\alpha(\gamma_A - \gamma)\theta - \frac{RT_e}{\rho_e} \frac{\partial \rho'}{\partial z} - (g - R\gamma) \frac{\rho'}{\rho_e} + 2\omega_{0y}u. \quad (20)$$

Таким образом, мы получаем систему уравнений (12) – (20). Далее поступим также как и в [6], возьмем производную по координате x от (18) и по координате y от (19), производную по переменной z от (20), сложим и получим

$$\begin{aligned} \alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial w}{\partial t} - \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} = R\alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial \theta}{\partial z} - R\nabla^2 \theta - \frac{RT_e}{\rho_e} \nabla^2 \rho' + 2\omega_{0z}\Omega_z + 2\omega_{0y}\Omega_y - \\ - [g + \alpha(\gamma_A - \gamma)RT_e - 2R\gamma] \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial \rho'}{\partial z} - \alpha(\gamma_A - \gamma)(g - R\gamma) \frac{\rho'}{\rho_e}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial^3 \rho'}{\partial t^3} = -R\nabla^2 \theta - \frac{RT_e}{\rho_e} \nabla^2 \frac{\partial \rho'}{\partial t} + 2\omega_{0z} \frac{\partial \Omega_z}{\partial t} + 2\omega_{0y} \frac{\partial \Omega_y}{\partial t} + \\ + R\alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\alpha R\gamma(\gamma_A - \gamma)}{\rho_e} \frac{\partial \rho'}{\partial t} - (g - 2R\gamma + \alpha R(\gamma_A - \gamma)T_e) \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial \rho'}{\partial t}. \quad (21) \end{aligned}$$

Так как

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \gamma \cdot w, \quad \frac{\partial \nabla^2 \theta}{\partial t} = \gamma \cdot \nabla^2 w,$$

то

$$\begin{aligned} \alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial^3 \rho'}{\partial t^3} = R\alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial w}{\partial z} - \gamma R\nabla^2 w - \frac{RT_e}{\rho_e} \nabla^2 \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (2\omega_{0z}\Omega_z + 2\omega_{0y}\Omega_y) - \\ - [g + \alpha(\gamma_A - \gamma)RT_e - 2R\gamma] \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial \rho'}{\partial t} - \alpha(\gamma_A - \gamma)(g - R\gamma) \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial \rho'}{\partial t} \quad (22) \end{aligned}$$

Разделим это уравнение на два равенства:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} = RT_e \nabla^2 \rho' - [g + \alpha(\gamma_A - \gamma)RT_e - 2R\gamma] \frac{\partial \rho'}{\partial z} + \alpha(\gamma_A - \gamma)(g - R\gamma)\rho' \\ \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -\frac{R\gamma}{\alpha(\gamma_A - \gamma)} \nabla^2 w + R\gamma \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{\alpha(\gamma_A - \gamma)} \frac{\partial}{\partial t} (2\omega_{0z}\Omega_z + 2\omega_{0y}\Omega_y), \quad (23) \end{aligned}$$

где

$$\Omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \Omega_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \quad (24)$$

– проекции вихря скорости.

Уравнение переноса вихря получается из уравнений движений (18) и (19) дифференцированием (18) по координате y , а (19) по координате x и вычитанием полученных выражений:

$$\frac{\partial \Omega_z}{\partial t} = -2\omega_{0z} \left[\alpha(\gamma_A - \gamma)w - \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial \rho'}{\partial t} \right] + 2\omega_{0y} \frac{\partial w}{\partial y}. \quad (25)$$

Аналогично,

$$\frac{\partial \Omega_y}{\partial t} = -R\alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial \theta}{\partial x} + [g - \alpha(\gamma_A - \gamma)RT_e] \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial \rho'}{\partial x} + 2\omega_{0z} \frac{\partial v}{\partial z} - 2\omega_{0y} \left[\alpha(\gamma_A - \gamma)w - \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial \rho'}{\partial t} - \frac{\partial v}{\partial y} \right] \quad (26)$$

Аналогично,

$$\frac{\partial \Omega_x}{\partial t} = R\alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial \theta}{\partial y} - [g - \alpha(\gamma_A - \gamma)RT_e] \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial \rho'}{\partial y} + 2\omega_{0y} \frac{\partial u}{\partial y} + 2\omega_{0z} \frac{\partial u}{\partial z}. \quad (27)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial t^2} 2(\omega_{0y}\Omega_y + \omega_{0z}\Omega_z) = \\ = -[2\omega_{0y}^2 + 2\omega_{0z}^2] \left[\alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial w}{\partial t} - \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} \right] + \left(4\omega_{0y} \frac{\partial}{\partial y} + 4\omega_{0z} \frac{\partial}{\partial z} \right) \frac{\partial}{\partial t} (\omega_{0y}v + \omega_{0z}w) + \\ - 2\omega_{0y} R\alpha\gamma(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial w}{\partial x} + 2\omega_{0y} [g - \alpha(\gamma_A - \gamma)RT_e] \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial t}. \end{aligned} \quad (28)$$

Из уравнений (18) – (20) найдем

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\omega_{0y}v + \omega_{0z}w) = \omega_{0z} R\alpha(\gamma_A - \gamma)\gamma w - R\gamma \left(\omega_{0y} \frac{\partial}{\partial y} + \omega_{0z} \frac{\partial}{\partial z} \right) w - \\ - \frac{RT_e}{\rho_e} \left(\omega_{0y} \frac{\partial}{\partial y} + \omega_{0z} \frac{\partial}{\partial z} \right) \frac{\partial \rho'}{\partial t} - \omega_{0z} (g - R\gamma) \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial \rho'}{\partial t}. \end{aligned} \quad (29)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3}{\partial t^3} 2(\omega_{0y}\Omega_y + \omega_{0z}\Omega_z) = -[2\omega_{0y}^2 + 2\omega_{0z}^2] \left[\alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial^3 \rho'}{\partial t^3} \right] - \\ - 2\omega_{0y} R\alpha\gamma(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial t} + 2\omega_{0y} [g - \alpha(\gamma_A - \gamma)RT_e] \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} + \\ + \left(4\omega_{0y} \frac{\partial}{\partial y} + 4\omega_{0z} \frac{\partial}{\partial z} \right) \left\{ \omega_{0z} R\alpha(\gamma_A - \gamma)\gamma w - R\gamma \left(\omega_{0y} \frac{\partial}{\partial y} + \omega_{0z} \frac{\partial}{\partial z} \right) w - \right. \\ \left. - \frac{RT_e}{\rho_e} \left(\omega_{0y} \frac{\partial}{\partial y} + \omega_{0z} \frac{\partial}{\partial z} \right) \frac{\partial \rho'}{\partial t} - \omega_{0z} (g - R\gamma) \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial \rho'}{\partial t} \right\}. \end{aligned} \quad (30)$$

Таким образом, получаем систему уравнений

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -\frac{R\gamma}{\alpha(\gamma_A - \gamma)} \nabla^2 w + R\gamma \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{\alpha(\gamma_A - \gamma)} \frac{\partial}{\partial t} 2(\omega_{0z}\Omega_z + \omega_{0y}\Omega_y), \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3}{\partial t^3} 2(\omega_{0y}\Omega_y + \omega_{0z}\Omega_z) = -[2\omega_{0y}^2 + 2\omega_{0z}^2] \left[\alpha(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial^3 \rho'}{\partial t^3} \right] - \\ - 2\omega_{0y} R\alpha\gamma(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial t} + 2\omega_{0y} [g - \alpha(\gamma_A - \gamma)RT_e] \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} + \\ + \left(4\omega_{0y} \frac{\partial}{\partial y} + 4\omega_{0z} \frac{\partial}{\partial z} \right) \left\{ \omega_{0z} R\alpha(\gamma_A - \gamma)\gamma w - R\gamma \left(\omega_{0y} \frac{\partial}{\partial y} + \omega_{0z} \frac{\partial}{\partial z} \right) w - \right. \\ \left. - \frac{RT_e}{\rho_e} \left(\omega_{0y} \frac{\partial}{\partial y} + \omega_{0z} \frac{\partial}{\partial z} \right) \frac{\partial \rho'}{\partial t} - \omega_{0z} (g - R\gamma) \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial \rho'}{\partial t} \right\}. \end{aligned} \quad (32)$$

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} = RT_e \nabla^2 \rho' - \alpha R\gamma(\gamma_A - \gamma)\rho' + [\rho_e g - 2R\gamma + \alpha R(\gamma_A - \gamma)T_e] \frac{\partial \rho'}{\partial z}. \quad (33)$$

Будем искать решение полученной системы в виде:

$$2(\omega_{0y}\Omega_y + \omega_{0z}\Omega_z) = \Omega_0^2 e^{-i\omega t}, \quad w = W e^{-i\omega t}, \quad \rho' = D e^{-i\omega t}. \quad (34)$$

Из уравнений получим

$$-\omega^2 W + \frac{i\omega}{\alpha(\gamma_A - \gamma)} \Omega_0^2 = -\frac{R\gamma}{\alpha(\gamma_A - \gamma)} \nabla^2 W + R\gamma \frac{\partial W}{\partial z}, \quad (35)$$

$$-\omega^2 D = RT_e \nabla^2 D - \alpha R\gamma(\gamma_A - \gamma)D + [\rho_e g - 2R\gamma + \alpha R(\gamma_A - \gamma)T_e] \frac{\partial D}{\partial z}, \quad (36)$$

$$\begin{aligned} i\omega^3 \Omega_0^2 - [2\omega_{0y}^2 + 2\omega_{0z}^2] \alpha(\gamma_A - \gamma)\omega^2 W - \frac{1}{\rho_e} [2\omega_{0y}^2 + 2\omega_{0z}^2] i\omega^3 D = \\ = 2i\omega \cdot \omega_{0y} R\alpha\gamma(\gamma_A - \gamma) \frac{\partial W}{\partial x} - 2\omega^2 \cdot \omega_{0y} [g - \alpha(\gamma_A - \gamma)RT_e] \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial D}{\partial x} + \\ + 4\omega_{0z} R\alpha(\gamma_A - \gamma)\gamma \left(\omega_{0y} \frac{\partial}{\partial y} + \omega_{0z} \frac{\partial}{\partial z} \right) W - 4R\gamma \left(\omega_{0y} \frac{\partial}{\partial y} + \omega_{0z} \frac{\partial}{\partial z} \right)^2 W - \\ - 4i\omega \cdot \frac{RT_e}{\rho_e} \left(\omega_{0y} \frac{\partial}{\partial y} + \omega_{0z} \frac{\partial}{\partial z} \right)^2 D + 4i\omega \cdot \omega_{0z} \frac{g - R\gamma}{\rho_e} \left(\omega_{0y} \frac{\partial}{\partial y} + \omega_{0z} \frac{\partial}{\partial z} \right) D \end{aligned} \quad (37)$$

Найдем решение уравнения (36):

$$\nabla^2 D + \frac{g - 2R\gamma + \alpha(\gamma_A - \gamma)RT_e}{RT_e} \frac{\partial D}{\partial z} + \frac{\omega^2 - \alpha R\gamma(\gamma_A - \gamma)}{RT_e} D = 0.$$

Решение ищем в виде:

$$D = D_0(z) e^{i(k_1 x + k_2 y)}, \quad 2(\omega_{0y} \Omega_y + \omega_{0z} \Omega_z) = \tilde{\Omega}_0^2(z) e^{i(k_1 x + k_2 y - \omega t)},$$

$$w = W_0(z) e^{i(k_1 x + k_2 y - \omega t)}. \quad (38)$$

Введем обозначение

$$b = g - 2R\gamma + \alpha R(\gamma_A - \gamma) T_e, \quad \tilde{\omega} = \alpha R\gamma(\gamma_A - \gamma). \quad (39)$$

Тогда

$$\frac{\partial^2 D_0(z)}{\partial z^2} + \frac{b}{RT_e} \frac{\partial D_0(z)}{\partial z} + \left(\frac{\omega^2 - \tilde{\omega}^2}{RT_e} + k^2 \right) D_0(z) = 0. \quad (40)$$

Перейдем к новой функции

$$D_0 = e^{\int \tilde{D}_0 dz}, \quad \frac{\partial D_0}{\partial z} = \tilde{D}_0 e^{\int \tilde{D}_0 dz}, \quad \frac{\partial^2 D_0}{\partial z^2} = \tilde{D}_0^2 e^{\int \tilde{D}_0 dz} + \frac{\partial \tilde{D}_0}{\partial z} e^{\int \tilde{D}_0 dz}.$$

Тогда

$$\frac{\partial \tilde{D}_0}{\partial z} + \tilde{D}_0^2 + \frac{b}{RT_e} \tilde{D}_0 + \left(\frac{\omega^2 - \tilde{\omega}^2}{RT_e} + k^2 \right) = 0. \quad (41)$$

Отсюда

$$-\frac{\partial \tilde{D}_0}{\partial z} = (\tilde{D}_0 - \tilde{D}_1(z))(\tilde{D}_0 - \tilde{D}_2(z)). \quad (42)$$

$$\int \frac{\partial \tilde{D}_0}{(\tilde{D}_0 - \tilde{D}_1(z))(\tilde{D}_0 - \tilde{D}_2(z))} = -z + \text{const}. \quad (43)$$

Будем считать, что мы нашли решение этого уравнения и функция $\tilde{D}_0 = \tilde{D}_0(z)$ нам известна. Тогда

$$D = D_0(z) e^{k_1 x + k_2 y}.$$

Из (35) найдем:

$$i\omega \Omega_0^2 = \omega^2 W - R\gamma \cdot \nabla^2 W + \alpha(\gamma_A - \gamma) R\gamma \frac{\partial W}{\partial z}. \quad (44)$$

Подставим полученное выражение в (36):

$$\omega^4 W_0 - \omega^2 R\gamma \cdot \frac{\partial^2 W_0}{\partial z^2} + \omega^2 \alpha(\gamma_A - \gamma) R\gamma \frac{\partial W_0}{\partial z} - \omega^2 \left[(2\omega_{0y})^2 + (2\omega_{0z})^2 \right] \alpha(\gamma_A - \gamma) W_0 -$$

$$- 4\omega_{0z} R\alpha(\gamma_A - \gamma) \gamma \left(ik_2 \omega_{0y} W_0 + \omega_{0z} \frac{\partial W_0}{\partial z} \right) + 4R\gamma \left(ik_2 \omega_{0y} W_0 + \omega_{0z} \frac{\partial W_0}{\partial z} \right)^2 +$$

$$+ 2k_1 \omega \cdot \omega_{0y} R\alpha\gamma(\gamma_A - \gamma) W_0 = \quad (45)$$

$$= \frac{1}{\rho_e} \left[(2\omega_{0y})^2 + (2\omega_{0z})^2 \right] i\omega^3 D_0 - 2\omega^2 \cdot \omega_{0y} \left[g - \frac{\alpha R(\gamma_A - \gamma) T_e}{\rho_e} \right] ik_1 D_0 +$$

$$+ 4i\omega \cdot \frac{RT_e}{\rho_e} \left(ik_2 \omega_{0y} D_0 + \omega_{0z} \frac{\partial D_0}{\partial z} \right)^2 + 4i\omega \cdot \omega_{0z} \left(g - \frac{R\gamma}{\rho_e} \right) \left(ik_2 \omega_{0y} D_0 + \omega_{0z} \frac{\partial D_0}{\partial z} \right)$$

Найдем решение при условии $D_0 = 0$ и $k_2 = 0$. Получим

$$\omega^4 W_0 - \omega^2 R\gamma \cdot \frac{\partial^2 W_0}{\partial z^2} + \omega^2 \alpha(\gamma_A - \gamma) R\gamma \frac{\partial W_0}{\partial z} - \omega^2 \left[(2\omega_{0y})^2 + (2\omega_{0z})^2 \right] \alpha(\gamma_A - \gamma) W_0 -$$

$$- (2\omega_{0z})^2 R\alpha(\gamma_A - \gamma) \gamma \frac{\partial W_0}{\partial z} + (2\omega_{0z})^2 R\gamma \left(\frac{\partial W_0}{\partial z} \right)^2 + 2k_1 \omega \cdot \omega_{0y} R\alpha\gamma(\gamma_A - \gamma) W_0 = 0 \quad (46)$$

Решение ищем в виде $W_0 = W_{00} e^{kz}$. Тогда получим *дисперсионное соотношение* в виде:

$$\omega^4 - \left\{ R\gamma k_z^2 - \alpha(\gamma_A - \gamma) R\gamma k_z + \left[(2\omega_{0y})^2 + (2\omega_{0z})^2 \right] \alpha(\gamma_A - \gamma) \right\} \omega^2 +$$

$$+ 2\omega_{0y} R\alpha\gamma(\gamma_A - \gamma) \cdot k_1 \omega - (2\omega_{0z})^2 R\alpha(\gamma_A - \gamma) \gamma k_z + (2\omega_{0z})^2 R\gamma k_z^2 = 0. \quad (47)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Получилось сложное уравнение 4-го порядка. Рассмотрим предельные случаи: высокочастотные и низкочастотные колебания. В случае высокочастотных колебаний можно записать:

$$\omega^4 - (2\omega_{0z})^2 R\alpha(\gamma_A - \gamma) \gamma k_z + (2\omega_{0z})^2 R\gamma k_z^2 = 0, \quad (48)$$

$$\omega = (1 \pm i) \sqrt{\omega_{0z}} (R\gamma k_z)^{1/4} = \omega_r \pm i\omega_i,$$

$$\omega_r = \sqrt{\omega_{0z}} (R\gamma k_z)^{1/4}. \quad (49)$$

Для низкочастотных колебаний получим:

$$-\left\{R\gamma k_z^2 - \alpha(\gamma_A - \gamma)R\gamma k_z + \left[(2\omega_{0y})^2 + (2\omega_{0z})^2\right]\alpha(\gamma_A - \gamma)\right\}\omega^2 + 2\omega_{0y}R\alpha\gamma(\gamma_A - \gamma) \cdot k_1\omega = 0,$$

$$\omega = \frac{2\omega_{0y}R\gamma \cdot k_1}{R\gamma k_z \left[\frac{k_z}{\alpha(\gamma_A - \gamma)} - 1 \right] + (2\omega_{0y})^2 + (2\omega_{0z})^2}. \quad (50)$$

Из формулы (50) видно, что чем больше длина волны, тем меньше частота колебаний волны.

Для фазовой скорости волны получим выражение:

$$c_1 = \frac{\omega}{k_1} = \frac{2\omega_{0y}R\gamma}{R\gamma k_z \left[\frac{k_z}{\alpha(\gamma_A - \gamma)} - 1 \right] + (2\omega_{0y})^2 + (2\omega_{0z})^2}. \quad (51)$$

Из формулы (51) видно, что чем ближе к полюсу, тем скорость волны меньше.

Выводы

Таким образом, рассмотрев систему уравнений, описывающих динамику внутренних гравитационных волн в атмосфере, после линеаризации мы получили дисперсионное соотношение. Система уравнений решалась в приближении f-плоскости, т.е. параметр Кориолиса считался постоянным. При этом считалось, что плотность воздуха в состоянии статики атмосферы подчиняется барометрическому закону. В пределах тропосферы такое допущение является приемлемым. Кроме того, вертикальный градиент температуры в состоянии статики атмосферы (невозмущенное состояние) также считается постоянным. Аналитическое решение было получено для случая невязкого и нетеплопроводного воздуха. Мы не рассматривали проблему допустимости процедуры линеаризации для волн планетарного масштаба. Предполагалось, что для указанных волн данная процедура имеет место.

При сделанных выше допущениях было получено выражение для скорости планетарной волны, из которой следует, что при приближении к полюсу, т.е. с увеличением широты, скорость распространения волны уменьшается.

Работа выполнена под научным руководством профессора
Р.Г. Закиняна.

Библиографический список

1. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. М.: Мир, 1986, Т. 1, 399 с.; Т. 2, 416 с.
2. Матвеев Л.Т. Теория общей циркуляции атмосферы и климата Земли. Л.: Гидрометеоиздат, 1991, 295 с.
3. Шакина Н.П. Лекции по динамической метеорологии. М.: ТРИАДА ЛТД, 2013. 160 с.
4. Andrews D.G. An Introduction to Atmospheric Physics. Second edition. Cambridge University Press, 2010, p. 237.
5. Cushman-Roisin B., Beckers J-M. Introduction to Geophysical Fluid Dynamics. Second edition. International geophysics series, vol. 101. Elsevier, 2011, p. 828.
6. Holton J.R. An Introduction to Dynamic Meteorology. Forth edition. Elsevier, 2004, p. 540.
7. Marshall J., Plumb R.A. Atmosphere, Ocean, and Climate Dynamics. International geophysics series, vol. 93. Elsevier, 2008, p. 324.
8. Nappo C.J. An Introduction to Atmospheric Gravity Waves. International geophysics series, vol. 85. Elsevier, 2002, p. 279.
9. Pedlosky J. Waves in the Ocean and Atmosphere. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003, p. 260.
10. Zdunkowski W., Bott A. Dynamics of the Atmosphere. Cambridge University Press, 2003, p. 719.

References

1. Gill A. Dynamics of the atmosphere and the ocean. M.: Mir, 1986, T. 1, 399 p.; T. 2, 416 s.
2. Matveyev L.T. The theory of the general circulation of the atmosphere and climate of the Earth. L.: Hydrometeoizdat, 1991, 295 p.
3. Shakina N.P. Lectures on dynamic meteorology. M.: TRIADA LTD, 2013. 160 p.
4. Andrews D.G. An Introduction to Atmospheric Physics. Second edition. Cambridge University Press, 2010, p. 237.
5. Cushman-Roisin B., Beckers J-M. Introduction to Geophysical Fluid Dynamics. Second edition. International geophysics series, vol. 101. Elsevier, 2011, p. 828.
6. Holton J.R. An Introduction to Dynamic Meteorology. Forth edition. Elsevier, 2004, p. 540.
7. Marshall J., Plumb R.A. Atmosphere, Ocean, and Climate Dynamics. International geophysics series, vol. 93. Elsevier, 2008, p. 324.
8. Nappo C.J. An Introduction to Atmospheric Gravity Waves. International geophysics series, vol. 85. Elsevier, 2002, p. 279.
9. Pedlosky J. Waves in the Ocean and Atmosphere. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003, p. 260.
10. Zdunkowski W., Bott A. Dynamics of the Atmosphere. Cambridge University Press, 2003, p. 719.

Рукопись поступила в редакцию 10.12.2018 г.
Принята к публикации 25.02.2019 г.

Об авторах

- Набродова Е.Г., аспирант кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета Телефон: 8-918-753-48-97 E-mail: katy-popova1991@yandecs.ru
- Шмигельский В.А., аспирант кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета Телефон 8(906) 470-57-25 E-mail: shmigelskiy.92777@mail.ru ResearcherID is: Q-3869-2018
- Яновская О.С., аспирант кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета Телефон: 8-905-415-14-14 E-mail: olenka_yan@mail.ru
- Сурнева О.Б., аспирант кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета Телефон: 8-918-744-92-18 E-mail: surnevao@mail.ru

About the authors

- Nabrodova E.G., Post Post-Graduate Student, Department of General and Theoretical Physics, North-Caucasian Federal University. Phone: 8-918-753-48-97 E-mail: katy-popova1991@yandecs.ru.
- Shmigelsky V., Post-Graduate Student, Department of General and Theoretical Physics, North-Caucasian Federal University Phone 8 (906) 470-57-25 E-mail: shmigelskiy.92777@mail.ru ResearcherID is: Q-3869-2018.
- Yanovskaya O.S., Post-Graduate Student, Department of General and Theoretical Physics, North-Caucasian Federal University. Phone: 8-905-415-14-14 E-mail: olenka_yan@mail.ru.
- Surneva O.B., Post-Graduate Student, Department of General and Theoretical Physics, North-Caucasian Federal University Phone: 8-918-744-92-18. E-mail: surnevao@mail.ru

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ», № 1, 2019

25.00.29

УДК 551.576+551.578

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Калов Х.М.
Калов Р.Х.*

Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия
* ruslan_kalov@mail.ru

АКТИВНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТЕПЛЫЕ ТУМАНЫ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Введение.

Несмотря на наличие большого количества теоретических и экспериментальных работ российских и зарубежных авторов (например, [1-3]) проблема рассеяния теплых туманов и низких слоистых облаков (НСО) до настоящего времени остается ещё нерешенной до конца. Из всего многообразия методов рассеяния теплых туманов, предложенных к настоящему времени, только тепловые наиболее близки к достижению ожидаемого результата. Недостаточно полно решена задача инструментального определения горизонтальных и вертикальных протяженностей просветленной зоны в результате искусственного рассеяния туманов и НСО.

Материалы и методы исследований.

В работе разработан тепловой метод рассеяния теплых туманов и НСО, основанный на использовании высокотемпературных источников тепловой энергии. В качестве таких источников использовались взрывы тепловых зарядов, при которых повышается температура и давление в тумане и НСО. Это повышение приводит к испарению тумана в зоне воздействия. Разработано лазерно-локационное устройство для оценки физической эффективности искусственного рассеяния теплых туманов и НСО. Устройство используется в стационарных условиях на земле и на борту самолета-лаборатории Як-40.

Результаты исследований и их обсуждение.

При тепловом методе рассеяния туманов и НСО под действием повышения давления и температуры при взрыве в облачной среде капли, пересекающие фронт ударной волны, дробятся на более мелкие капельки и испаряются. Получены формулы для расчета: избыточного давления и температуры в тумане при взрыве тепловых зарядов; времени полного испарения капель и радиуса зоны просветления в тумане. Расчеты показали, что избыточное давление и температура в тумане при взрыве теплового заряда увеличиваются с увеличением величины заряда. Температура на фронте ударной волны ещё заметно выше температуры невозмущенного воздуха на расстояниях до 200 метров от места взрыва. Если взрыв теплового заряда происходит на небольшой высоте (1...2 м) над грунтом, то полное испарение капель тумана наблюдается в радиусе до 800 и более метров.

Выводы.

Разработанный нами тепловой метод дает возможность создавать зоны просветления небольшими взрывами теплового заряда под действием повышения температуры и давления на волне сжатия по сравнению с их значениями в невозмущенном воздухе. При взрыве небольшого заряда возникает облако расширяющихся взрывных газов, тепловое излучение которого испаряет капельки облачного образования и создает зону просветления в тумане до 800 м. Лазерно-локационное устройство с лазерным излучателем ИЗ-25-1 на длине волны 0,532 мкм с высокой точностью (4...5 м) определяет границы зоны рассеяния тумана.

Ключевые слова:

искусственное рассеяние туманов, результаты активных воздействий, лазерно-локационное устройство, лазерный излучатель.

Kalov Kh.M.,
Kalov R.Kh.

High Mountain Geophysical Institute,
Nalchik, Russia

Active impacts on warm fogs and instrumental determination of their efficiency

Introduction.

Despite the presence of a large number of theoretical and experimental works of Russian and foreign authors (for example [1-3]), the problem of scattering of warm fogs and low layered clouds (LLC) remains unresolved to the present time. Of the variety of warm fog scattering methods proposed to date, only thermal ones are the closest to achieving the expected result. Not fully solved the problem of the instrumental determination of the horizontal and vertical extents of the zone illuminated by artificial dissipation of fog and LLC.

Materials and methods of research.

In this paper, a thermal method of methods of scattering of warm fogs and LLC, based on the use of high-temperature sources of thermal energy. The sources used were explosions of thermal charges, which increased the temperature and pressure in the fog and LLC. This rise leads to the evaporation of the mist in the treated area. Developed laser radar device to measure the physical efficiency of the artificial dissipation of warm fog and LLC. The device is used in stationary conditions on the ground and on Board the Yak-40 laboratory aircraft.

Results of the study and their Discussion.

Under the thermal method of fog and LLC scattering, droplets crossing the shock wave front are crushed into smaller droplets and evaporate under the action of increasing pressure and temperature during the explosion in a cloud medium. The formulas for calculating the excess pressure and temperature in the fog during the explosion of thermal charges, the time of complete evaporation of droplets and the radius of the zone of enlightenment in the fog are obtained. Calculations have shown that the excess pressure and temperature in the fog in the explosion of heat charge increase with increasing charge. The temperature at the front of the shock wave is still noticeably higher than the temperature of the undisturbed air at distances up to 200 meters from the explosion site. If the explosion of heat charge occurs at a low altitude (1...2 m) above the ground, the complete evaporation of fog drops is observed in a radius of 800 m and more.

Conclusions.

The thermal method developed by us makes it possible to create zones of enlightenment by small explosions of a thermal charge under the influence of temperature and pressure increase on a compression wave in comparison with their values in the unperturbed air. When a small charge explodes, a cloud of expanding explosive gases appears, the thermal radiation of which evaporates droplets of cloud formation and creates a zone of enlightenment in the fog up to 800 m. the Laser-locating device with a laser emitter IZ-25-1 at a wavelength of 0.532 μm with high accuracy (4...5 m) determines the boundaries of the fog scattering zone.

Key words:

artificial dissipation of fogs, the results of active effects, laser ranging device, laser emitter

Введение

Проблема искусственного рассеяния туманов и низких слоистых облаков остро стоит для авиации, наземного и морского транспорта, эффективного применения оптико-электронных и тепловизионных систем наведения авиационной техники и т.д. К настоящему времени эта проблема доведена до уровня технологий, которые успешно используются как в России, так и за рубежом, лишь относительно к переохлажденным туманам. Но переохлажденные туманы составляют лишь 5% от общего количества часов с туманом на земном шаре. В связи с этим наиболее актуальной задачей в борьбе с туманами является разработка методов рассеяния теплых туманов.

Настоящая работа посвящена искусственному рассеянию теплых туманов и инструментальному определению результатов рассеяния. Нами проведены теоретические исследования и натурные эксперименты по рассеянию туманов с использованием высокотемпературных источников тепла [4]. В качестве таких источников в работе использовались взрывы тепловых зарядов, при которых в тумане возникает облако расширяющихся взрывных газов, которое на некотором расстоянии R от заряда приобретает в целом правильную шарообразную форму. Эти расширяющиеся газы начинают вихреобразно смешиваться с окружающим туманом за счет турбулентной диффузии и механизма неустойчивости Рихтмайера–Мишкова.

Важной задачей в проблеме активных воздействий (АВ) на туманы и низкие слоистые облака с целью их рассеяния является оперативное определение горизонтальных и вертикальных протяженностей просветленной зоны в результате АВ. Для решения этой задачи нами разработан и испытан действующий макет лазерно-локационного устройства (ЛЛУ) [5]. Это устройство используется в стационарных (наземных) условиях и на борту летательного аппарата (самолета-лаборатории Як-40). Наземные измерения проводились на полигоне ФГБУ «ВГИ» «Кызбурун», где одновременно измерялись дальность видимости в тумане стандартными штатными метеорологическими приборами-фотометрами импульсными ФИ-1. Сравнение результатов измерений показало высокую точность ЛЛУ (± 3 м). Вертикальная протяженность просветленной зоны в туманах и низких слоистых облаках измерялась с борта самолета-лаборатории Як-40 на высотах до $1 \div 2$ км.

Материалы, методы исследований и обсуждения результатов

1. Искусственное рассеяние теплых туманов с помощью взрывов тепловых зарядов

Если взрывчатое вещество представлено в виде шара, то радиус этого шара для тротила (плотность $\rho = 1660$ кг/м³) и многих других взрывчатых веществ средней мощности можно принять равным [1].

$$R_0 = 0.05\sqrt[3]{q}, \quad (1)$$

где R_0 – выражено в м, а
 q – масса заряда в кг.

Первоначальный радиус R_H расширяющихся взрывных газов связан с R_0 формулой

$$R_H = (11...12)R_0.$$

Действие взрывных газов проявляется в основном на расстояниях, не превышающих R_H .

Повышения давления и температуры вблизи центра взрыва настолько значительны, что при взрыве в облаке облачные капли, пересекающие фронт ударной волны, дробятся на более мелкие капельки и испаряются. Перепад давления ΔP в ударной волне, при котором разрушается капля радиусом r , приблизительно можно оценить на основании формулы Лапласа

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r},$$

где γ – поверхностное натяжение воды.

Таким образом, можно считать, что облачные капли, радиусы которых превосходят величину $2\gamma/\Delta P$, будут дробиться в ударной волне с амплитудой ΔP .

Возможность полного испарения облачных капель в ударной волне определяется двумя факторами – величиной избыточной температуры ΔT и длительностью сохранения состояния повышенного давления в ударной волне.

Зависимость избыточного давления ΔP в ударной волне от расстояния R до центра взрыва определяется формулой М.А. Садовского [6]

$$\Delta P = 7 \frac{q}{R^3} \left(\frac{V}{V_T} \right) + 2.7 \frac{q^{2/3}}{R^2} \left(\frac{V}{V_T} \right)^{2/3} + 0.84 \frac{q^{1/3}}{R} \left(\frac{V}{V_T} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где V – удельная энергия взрывчатого веществ;
 V_T – удельная энергия тротила;

R выражено в м;
 q – в кг; ΔP – в атм.

Подставляя вместо q значение R_0 , определяемое формулой (1), можно записать

$$\Delta P = 5600 \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \left(\frac{V}{V_T} \right) + 1080 \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \left(\frac{V}{V_T} \right)^{2/3} + 16.8 \frac{R_0}{R} \left(\frac{V}{V_T} \right)^{1/3}. \quad (3)$$

Формулы (2) и (3) справедливы также и для поздней стадии распространения ударных волн.

Если взрыв происходит на поверхности грунта, то волна распространяется не в полной сфере, а только в полусфере, и объем воздуха, охватываемый ударной волной, уменьшается вдвое. При этом усиление ΔP такое, которое соответствует удвоению величины заряда. Таким образом, при взрыве заряда на поверхности грунта в формуле (2) следует заменить q на $2q$. В результате получаем:

$$\Delta P = 14 \frac{q}{R^3} \left(\frac{V}{V_T} \right) + 4.3 \frac{q^{2/3}}{R^2} \left(\frac{V}{V_T} \right)^{2/3} + 1.1 \frac{q^{1/3}}{R} \left(\frac{V}{V_T} \right)^{1/3}. \quad (4)$$

При удалении от центра взрыва амплитуда ударной волны быстро уменьшается, ударная волна становится слабой. На этой стадии зависимость между ΔP и приращением ΔT выражается формулой [7]

$$\Delta T = \frac{\Delta P}{\rho_0 C_p} \quad (5)$$

где ρ_0 – плотность невозмущенного воздуха,
 C_p – теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

В таблице 1 представлены значения ΔP и ΔT на различных расстояниях R от центра взрыва и при различных значениях веса заряда q , при $\rho_0 = 1 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$, $C_p = 1 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$ и $V = V_T$. Нижняя строка в каждой колонке относится к взрыву на поверхности грунта.

Из данных таблицы видно, что при мощных взрывах на расстояниях порядка 150...200 метров от места взрыва температура на фронте ударной волны еще заметно отличается от температуры невозмущенного воздуха.

Таблица 1. ЗНАЧЕНИЯ ΔP и ΔT ПРИ РАЗЛИЧНЫХ R и q
Table 1. ΔP and ΔT values at different R and q

R, м		50	100	150	200
q = 10 кг	ΔP, атм.	0,042	0,020	0,012	0,009
		0,057	0,026	0,017	0,012
	ΔT, °C	4,20	2,0	1,2	0,9
		5,70	2,6	1,7	1,2
q = 50 кг	ΔP, атм.	0,078	0,040	0,021	0,018
		0,110	0,047	0,027	0,020
	ΔT, °C	7,8	4,0	2,1	1,8
		11,0	4,7	2,7	2,0
q = 100 кг	ΔP, атм.	0,107	0,046	0,030	0,020
		0,150	0,062	0,038	0,034
	ΔT, °C	10,7	4,6	3,0	2,0
		15,0	6,2	3,8	3,4

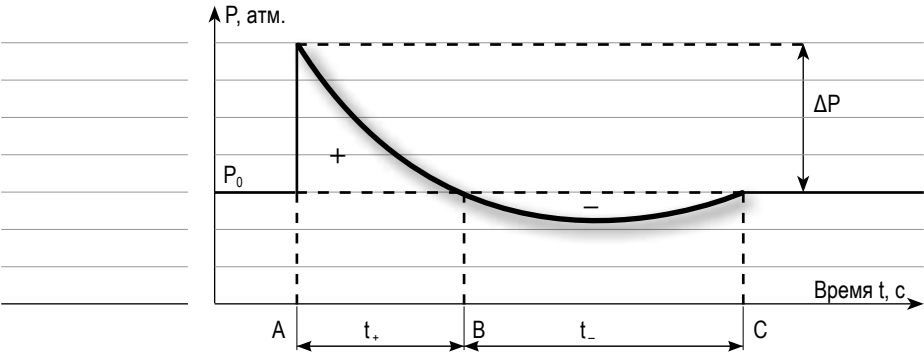


Рис. 1. Зависимость давления P от времени t на фронте сравнительно слабой ударной волны.
P₀ – давление в невозмущенном воздухе,
ΔP – перепад давления в ударной волне,
AB – область сжатия (t₊), BC – область разрежения (t₋).

Fig. 1. The dependence of the pressure P on the time t at the front of a relatively weak shock wave.
P₀ – pressure in the undisturbed air,
ΔP is the differential pressure in a shock wave,
AB is the area of compression (t₊),
BC – region of rarefaction (t₋).

Если проследить за изменением во времени давления P на определенном расстоянии от центра взрыва, то получается картина, изображенная на рис. 1.

Падение давления ΔP происходит практически по прямолинейному графику. Длительная некоторая зона сжатия (отрезок АВ) сменяется более продолжительной зоной разрежения (отрезок ВС).

Воздух, через который проходит ударная волна, движется в зоне сжатия в ту же сторону, что и волна, а в зоне подсоса – в противоположную сторону.

Скорость движения воздуха непосредственно за фронтом ударной волны равна

$$v_{\phi} = \frac{\Delta P}{D_y \rho_0} \tag{6}$$

где D_y – скорость ударной волны, определяемая формулой [6]

$$D_y = C \sqrt{1 + 0.83 \frac{\Delta P}{P_0}}, \tag{7}$$

где C – скорость звука в воздухе;
P₀ – давление в невозмущенном воздухе.

При ΔP ≈ 0,04 атм. из формул (6) и (7) получаем:
D_y ≈ 336,4 мс⁻¹, v_φ ≈ 10 мс⁻¹ (при C = 331 мс⁻¹).

Таким образом, скорость массового потока за фронтом слабой ударной волны составляет величину порядка 10 мс⁻¹.

Облачные капли, пересекающие фронт ударной волны, захватываются и увлекаются спутным потоком воздуха, возникающим за ударной волной. В силу малости числа Стокса можно считать, что движение этих капель происходит под действием стоксовой силы $\vec{F}_{CT} = 6\pi\eta r \vec{v}_r$, где η – динамический коэффициент вязкости воздуха; v_r – скорость капель относительно потока воздуха: v_r = v_φ – v, где v – абсолютная скорость движения облачной капли.

Уравнение движения капли можно записать в виде

$$m \frac{dv}{dt} = 6\pi\eta r (v_{\phi} - v),$$

где m – масса капли. Из этого уравнения получаем:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{9\rho v}{\rho_k r^2} (v_{\phi} - v), \tag{8}$$

где v – кинематическая вязкость воздуха;
ρ_k – плотность воды.

Решение уравнения (8), удовлетворяющее начальному условию v(0) = 0, имеет вид

$$v = v_\phi \left(1 - e^{-\frac{r}{\tau}}\right), \quad (9)$$

где $\tau = \frac{\rho_k r^2}{9\nu\rho}$. Отсюда при $r = 10$ мкм получаем $\tau = 5.6 \cdot 10^{-4}$ с, а при $r = 1$ мкм $\tau = 5.6 \cdot 10^{-6}$ с.

С другой стороны, на основе опытов и теоретических расчетов установлено, что в слабой ударной волне время действия положительного давления в ударной волне t_+ (участок АВ на рис. 1) связано с весом заряда q и с расстоянием R формулой [6]

$$t_+ = \alpha \sqrt{R} \cdot \sqrt[6]{q}, \quad (10)$$

где $\alpha = 0.0015 \left(\frac{\nu}{\nu_T}\right)^{1/6}$; R выражено в м;
 q – в кг;
 t – в сек.

При $R = 50$ м, $q = 10$ кг и $\nu = \nu_T$ получаем: $t_+ \approx 1.56 \cdot 10^{-2}$ с. В этом случае в формуле (9) отношение $t/\tau \ll 1$ и $v \cong v_\phi$.

Из этих оценок следует, что облачные капли, попадающие в спутный поток воздуха за фронтом ударной волны, практически мгновенно увлекаются этим потоком как в зоне сжатия, так и в зоне разрежения. Поэтому процессами взаимной коагуляции этих капель вследствие различия скоростей их движения практически можно пренебречь.

Более существенным является процесс испарения облачных капель за фронтом ударной волны. Если в зоне сжатия газа температуру принять в среднем постоянной, то формулу, описывающую закон изменения радиуса капли, можно записать в виде

$$r^2 = r_0^2 - \frac{2D\Delta\rho_n}{\rho_k} t \quad (11)$$

где r_0 – начальный радиус капли;
 D – коэффициент диффузии водяного пара в воздухе;
 ρ_k – плотность воды;
 $\Delta\rho_n$ – разность плотностей пара на поверхности капли и вдали от нее.

Исходя из уравнения Клапейрона-Клаузиуса можно записать

$$\Delta\rho_n \cong \frac{\rho_n(T_0)L\Delta T}{R_n T_0^2} = \frac{\rho_n(T_0)L\Delta P}{\rho_0 C_p R_n T_0^2}.$$

Здесь T_0 – абсолютная температура воздуха в невозмущенном воздухе;

$\rho_n(T_0)$ – насыщающая плотность пара при температуре T_0 ;
 L – удельная теплота испарения воды;
 R_n – газовая постоянная водяного пара;
 ΔP – определяется формулой (4).

Расчеты показывают, что на расстояниях R порядка 30 м и выше основной вклад в формулу (2) вносит последнее слагаемое, т. е.

$$\Delta P = \frac{\beta q^{1/3}}{R},$$

где $\beta = 0.84 \left(\frac{\nu}{\nu_T}\right)^{1/3}$. При этом формула (11) принимает вид

$$r^2 = r_0^2 - \frac{2D\rho_n(T_0)\beta L q^{1/3}}{\rho_k \rho_0 C_p R_n T_0^2 R} t. \quad (12)$$

Полагая в формуле (12) $r = 0$, найдем время τ полного испарения капли

$$\tau = \frac{\rho_k \rho_0 C_p R_n T_0^2 r_0^2 R}{2\beta \rho_n(T_0) L q^{1/3} D} \quad (13)$$

Полное испарение капель имеет место в том случае, когда время t_+ , в течение которого в ударной волне сохраняется перегрев воздуха, больше чем время τ . Таким образом, условие полного испарения капли можно записать в виде

$$\frac{\rho_k \rho_0 C_p R_n T_0^2 r_0^2 R}{2\beta \rho_n(T_0) L q^{1/3} D} \leq \alpha \sqrt{R} \cdot \sqrt[6]{q}.$$

Отсюда находим радиус шара R_1 в облачной среде на высоте $h = 30 \dots 200$ м, внутри которого все капли с радиусами $r \leq r_0$ полностью испаряются:

$$R_1 = \left(\frac{2\rho_n(T_0)L D}{\rho_k R_n T_0^2 \rho_0 C_p r_0} \right)^2 (\alpha\beta)^2 q. \quad (14)$$

Если же взрыв заряда происходит на поверхности грунта, то в формуле (14) нужно заменить q на $2q$, β на $\sqrt[3]{2}\beta$ и α на $\alpha\sqrt[6]{2}$. При этом вместо выражения $(\alpha\beta)^2$ получаем $2(\alpha\beta)^2$ и в формуле (14) появляется дополнительный множитель 4, т.е. мы имеем

$$R_2 = 4R_1.$$

Большой интерес представляет также случай, когда заряд взрывается на некоторой высоте h порядка нескольких метров от поверхности земли. В этом случае по облачной среде будут распространяться одна за другой две ударные волны – прямая и отраженная, разделенные промежутком времени $\Delta t = 2h / D_y$. При этом для слабых ударных волн избыточное давление на фронте отраженной ударной волны примерно в два раза превосходит избыточное давление в прямой ударной волне. При этом коэффициент α увеличивается в 2 раза. Кроме того промежутки времени t_{1+} и t_{2+} , в течение которых сохраняются избыточные давления в прямой и отраженной ударных волнах, складываются, т. е. коэффициент α в формуле (14) примерно удваивается.

Таким образом, в рассматриваемом случае в формуле (14) появляется дополнительный множитель 16, т. е. $R_3 = 16 R_1$.

Запишем теперь характерные значения параметров, входящих в формулу (14):

$T_0 = 280 \text{ К}$; $\rho_0 = 1,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$; $\rho_0(T_0) = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$; $D = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \text{с}^{-1}$; $C_p = 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$; $L = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$; $R_n = 0,47 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$; $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ с} \cdot \text{м}^{-1/2} \cdot \text{кг}^{-1/6}$; $\beta = 0,84 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{кг}^{-1/3}$; $r_0 = 10^{-6} \bar{r}_0$, где $\bar{r}_0$ – средний радиус облачных капель в мкм. При этих значениях параметров формула (14) принимает вид:

$$R_1 = \frac{5}{\bar{r}_0^4} q \left(\frac{v}{v_T} \right) \quad (15)$$

где R_1 – выражено в м,
 q – в кг,
 $\bar{r}_0$ – в мкм.

При $q = 10 \text{ кг}$, $v = v_T$ и $\bar{r}_0 = 1 \text{ мкм}$ по формуле (15) получаем: $R_1 = 50 \text{ м}$, $R_2 = 200 \text{ м}$, $R_3 = 800 \text{ м}$.

Эти оценки показывают, что если взрыв газа происходит на поверхности грунта, то полное испарение капель тумана наблюдается в радиусе $R_2 = 200 \text{ м}$, а на небольшой высоте (1...2 м) над грунтом – $R_3 = 800 \text{ м}$. Минимальный радиус испарения капель тумана $R_1 = 50 \text{ м}$ имеет место на сравнительно больших высотах над уровнем грунта (30...200 м).

2. Оценка физической эффективности активных воздействий на туманы с помощью лазерно-локационного устройства

Проблема оценки результатов активных воздействий на облака и туманы связана с созданием измерительного прибора, позволяющего с высокой точностью измерять геометрические параметры просветленной области в туманах и облаках. Для решения этой задачи нами создан и испытан лазерно-локационный комплекс, включающий в себя следующие устройства [1, 5]:

1. Оптико-механический тракт и блок накачки, состоящий из лазерного излучателя ИЗ-25-1 с удвоителем частоты излучения и датчиком синхроимпульса, приспособленным для юстировки макета и блока охлаждения излучателя; двух фотоэлектронных умножителей; двух телескопов, снабженных системами поляризационных, абсорбционных (цветных и нейтральных) фильтров; монтажного поворотного стола; юстировочного стола.
2. Входной тракт, состоящий из логарифмического усилителя (ЛУ), устройства выборки и хранения аналогового сигнала (УВХ) и усилителя мощности (УМ).
3. Двухканальный регистратор аналоговых сигналов (ДРАС). Сигналы с выходов приемного блока поступают на входы двухканального регистратора аналоговых сигналов, каждый канал которого состоит из аналого-цифрового преобразователя (АЦП), оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) и схем управления работой.

Лазерно-локационное устройство может быть использовано в наземных условиях и на борту летательных аппаратов.

Определение результатов активных воздействий основано на анализе результатов взаимодействия оптического излучения с рассеивающей аэрозольной (облачной) средой. Лазерно-локационная установка позволяет осуществлять посылку световых импульсов лазерного излучения длительностью до 20 наносекунд и прием обратно рассеянного излучения. При помощи приемной аппаратуры производится регистрация так называемого упругого рассеяния светового излучения, т. е. регистрируется свет той же длины волны, что и зондирующего светового излучения. Выбор именно упругого рассеяния для анализа результатов АВ обусловлен тем, что интенсивность упругого рассеяния в аэрозольной среде на несколько порядков превосходит интенсивность других типов рассеяния. Это обстоятельство позволяет при ограниченной мощности используемого лазера получить максимально возможную дальность зондирования.

Для определения оптических свойств зондируемого объема был использован анализ формы эхо-сигналов обратного рассеяния, что позволяет проводить сравнительно простые относительные измерения сигнала обратного рассеяния и отказаться от сложной и дорогостоящей калибровки локатора. При анализе результатов зондирования облаков и туманов во внимание не принималось молекулярное рассеяние, так как его вклад на несколько порядков меньше вклада аэрозольного рассеяния.

Следует выделить два принципиально различных варианта зондирования атмосферы:

- 1) локатор находится непосредственно в облаках и туманах, подвергаемых АВ;
- 2) излучатель находится вне оптически плотного атмосферного образования, например, при пролете самолета с лидаром над слоем облаков, подвергаемых АВ.

Эти два случая резко различаются по подходам к анализу форм эхо-сигналов. В первом варианте световой зондирующий импульс практически полностью рассеивается на расстоянии всего в несколько десятков метров. Действительно, по закону Бугера, мощность оптического излучения Φ , прошедшего сквозь слой рассеивающей среды толщиной l , с коэффициентом ослабления оптического излучения ε , равна [8]:

$$\Phi = \Phi_0 \cdot e^{\varepsilon l}$$

где Φ_0 — мощность входящего излучения.

С учетом того, что при зондировании среды оптическое излучение проходит одни и те же аэрозольные образования дважды – в прямом и обратном направлениях, мощность оптического излучения только за счет ослабления в атмосфере уменьшается в $e^{2\varepsilon l}$ раз. Например, при $\varepsilon l = 3$, $e^{2\varepsilon l} = 403$. Максимальное расстояние, с которого лидар, находящийся в облаке, получает эхо-сигнал, примерно соответствует метеорологической оптической дальности. Для облаков с коэффициентом ослабления 50 км^{-1} , эта дальность составляет 60 м. Следовательно, глубина проникновения зондирующего оптического излучения в оптически плотную среду практически совпадает с дальностью видимости в этой среде. Эхо-сигнал лазерного локатора, находящегося в облаке, имеет вид одиночного импульса, длительностью до 1 микросекунды, причем с уменьшением оптической плотности облачного образования (коэффициента ослабления ε) эта длительность возрастает. Таким образом, по изменению длительности одиночного импульса при пролете самолета через исследуемую область, подвергнутую активному воздействию, можно судить о степени просветления соответствующего метеорологического образования.

Совершенно иной тип эхо-сигнала регистрируется лазерным локатором во втором варианте, когда он находится в чистой атмосфере, вне облачного образования. Это происходит при полете самолета с лидаром на борту над или под облаками. В этом случае лидар регистрирует как перво-

начальный относительно слабый импульс значительной длительности – до нескольких микросекунд, так и ряд импульсов от аэрозольных образований, лежащих на трассе зондирования. Самый последний большой импульс соответствует слою, в котором зондирующее излучение окончательно рассеивается. При активном воздействии на облачный слой его граница в зоне воздействия смещается, а глубина проникновения лазерного излучения в облаке увеличивается. Изменение этих двух параметров и позволяет судить о результатах АВ на облачные образования в случае нахождения самолета в чистой атмосфере.

При проведении наземных испытаний лазерно-локационное устройство устанавливалось на земле, работа велась по нижней поверхности облака. Определяется расстояние до облаков, динамика нижней границы, энергетический потенциал прибора, глубина проникновения зондирующего луча в облако, дальность видимости по трассе и другие параметры, позволяющие оценить работоспособность прибора и правильность заложенных при его реализации принципов.

Бортовые испытания проводятся в двух вариантах:

- работа через боковые иллюминаторы; в этом варианте проверялась работоспособность аппаратуры при энергообеспечении от бортовых источников питания, а также замерялось реальное энергопотребление; при полете выше верхней границы облаков и при боковом крене самолета (Як-40) $25\text{--}30^\circ$ проводятся те же работы, что и при наземных испытаниях, но по верхней кромке облаков;
- работа через световые люки в днище самолета: в этом случае проверялась работоспособность в штатной ситуации.

Методика наземных испытаний следующая. Аппаратура устанавливается на земле в закрытом помещении, имеющем световое окно, которое обеспечивает достаточный обзор по азимуту и углу места. В качестве контрольных средств используются метеорологические средства оборудования полигона (измерители прозрачности, измерители высоты облаков). Испытания проводятся при различных метеорологических ситуациях – при наличии тумана, при низкой и высокой облачности. Контроль правильности определения дальности видимости в атмосфере ведется при работе по горизонтальным трассам в слабом тумане или дымке (при метеорологической дальности видимости, равной 200–500 м). Проверяется совпадение результатов измерений с помощью разработанной аппаратуры, проводится необходимая коррекция. Затем лазерно-локационное устройство переводится на

работу по наклонным трассам и вертикально в зенит. Измеряется расстояние до нижней кромки облаков (рис. 2), результаты контролируются штатными средствами.

Методика при работе через боковые иллюминаторы следующая. Аппаратура, предварительно испытанная и откалиброванная в наземных условиях, устанавливается на борт самолета-лаборатории. Ведутся измерения прозрачности атмосферы по трассам, параллельным поверхности земли и перпен-

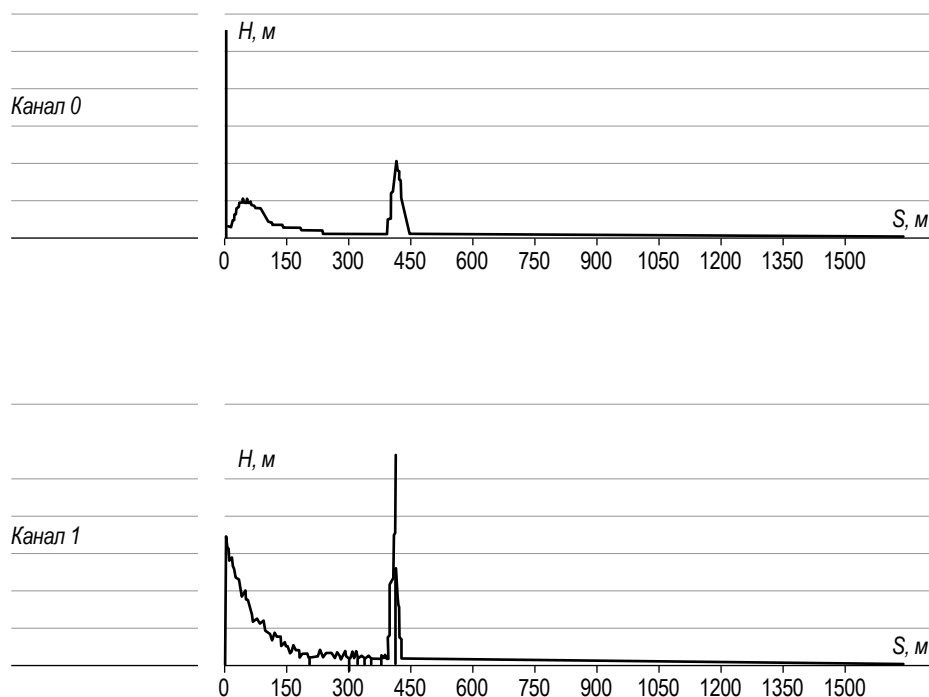


Рис. 2.

Пример записи при определении расстояния до облачных образований H и S. Длина волны $\lambda = 0,532$ мкм. В первом канале («Канал 0») плоскость пропускания поляроида параллельна плоскости поляризации лазерного излучения. Во втором («Канал 1») – перпендикулярна плоскости поляризации.

Fig. 2. An example of a record when determining the distance to cloud formations is H and S. The wavelength $\lambda = 0.532$ microns. In the first channel («Channel 0») the transmission plane of the polaroid is parallel to the polarization plane of the laser radiation. In the second channel («Channel 1») – perpendicular to the polarization plane.

дикулярным траекториям движения самолета. Необходимо, чтобы самолет двигался в разрывах между облаками, при этом определяется прозрачность атмосферы в разрывах и в облаке, а также дальность до боковых кромок облаков. Ведется проверка работоспособности аппаратуры на борту в режиме длительного использования.

При работе через световые люки в днище самолета-лаборатории аппаратура, отъюстированная в наземных условиях, устанавливается на борт самолета. Зондирование ведется в надир. Метеоситуация – приземный туман. Самолет движется над полигоном на высоте около 1000 м. Во время первых пролетов контролируется работоспособность аппаратуры; в момент пролета над точкой расположения штатной наземной аппаратуры производится сверка результатов; при необходимости производится подстройка. На экране постоянно выводятся в графическом виде результаты дальности видимости по трассам над слоем тумана и в самом слое тумана.

Выводы

1. Распространение ударных волн в облачной среде приводит к созданию зоны просветления (увеличению метеорологической дальности видимости) вследствие испарения облачных капель под действием повышения температуры и давления на волне сжатия по сравнению с их значениями в невозмущенном воздухе. При мощных взрывах (см. табл. 1) на расстояниях $100 \div 200$ м от места взрыва температура на фронте ударной волны еще существенно отличается от температуры в невозмущенной среде (на $6,2$ и $3,2$ °C соответственно). При взрывах заряда ($q = 10$ кг) на поверхности земли и на высоте $1 \dots 2$ м от грунта испарение капель тумана происходит в объеме сферы радиусом до $200 \dots 800$ м.
2. Разработан и испытан действующий макет лазерно-локационного устройства (ЛЛУ) с лазерным излучателем ИЗ-25-1 для контроля и регистрации результатов АВ на туманы и низкие слоистые облака. Работы велись на длине волны излучения $\lambda = 0,532$ мкм.
3. Проведены натурные испытания ЛЛУ на борту самолета-лаборатории Як-40 и на земле. Результаты этих испытаний сравнивались с результатами измерений, проводившихся одновременно штатными специальными метеорологическими приборами (фотометры импульсные ФИ-1, дистанци-

онные измерители высоты облаков и др.), установленными на полигоне проведения АВ.

Результаты сравнений показали высокую точность работы ЛЛУ (± 4 м).

Библиографический список

1. Калов Х.М., Калов Р.Х. К расчету зоны просветления при взрыве тепловых зарядов в облачной среде. Метеорология и гидрология. 2018. №5. С. 18–28.
2. Chernikov A.A. Fog dispersal. Jn: WMP Report No. 31, Technical Document WMO/TD, No. 936. Vol. III. P. 19-32.
3. Weinstein A.J., Kunkel B.A. Fog dispersal. An Operational Weather Modification Technology Today // Papers presented at the 2-nd WMO Scientific Conf. on Weather Modification, Boulder, Colorado. 1976. P. 381–388.
4. Калов Х.М., Калов Р.Х. Физические основы, методы и средства активных воздействий на грозо-градовые облака и туманы: монография. Нальчик: Полиграфсервис и Т, 2010. 220 с.
5. Ашкинадзе Д.А., Белобровик В.И., Сергеев Н.М. Разработка и создание действующего макета устройства контроля и регистрации результатов активных воздействий на туманы и слоистую облачность. Отчет по НИР, 1989. 109 с.
6. Покровский Г.И. Взрыв. М.: Недра, 1967. 411 с.
7. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 687 с.
8. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы: монография. Ленинград: Гидрометеиздат, 1978. 455 с.

References

1. Kalov Kh.M., Kalov R.Kh. K raschetu zony prosvetleniya pri vzryve teplovykh zaryadov v oblachnoy srede. Meteorologiya i gidrologiya (To the calculation of the zone of enlightenment in the explosion of heat charges in a cloudy environment). 2018. №5. P. 18–28. (in Russ).
2. Chernikov A.A. Fog dispersal. Jn: WMP Report No. 31, Technical Document WMO/TD, No. 936. Vol. III. P. 19–32.
3. Weinstein A.J., Kunkel B.A. Fog dispersal. An Operational Weather Modification Technology Today // Papers presented at the 2-nd WMO Scientific Conf. on Weather Modification, Boulder, Colorado. 1976. P. 381–388.

4. Kalov Kh.M., Kalov R.Kh. Fizicheskiye osnovy, metody i sredstva aktivnykh vozddeystviy na grozo-gradovyye oblaka i tumany: monografiya (Physical bases, methods and means of active influences on thunderstorm-haze clouds and fogs: monograph.). Nal'chik: Poligrafsevis i T, 2010. 220 p. (in Russ).
5. Ashkinadze D.A., Belobrovik V.I., Sergeyev N.M. Razrabotka i sozdaniye deystvuyushchego maketa ustroystva kontrolya i registratsii rezul'tatov aktivnykh vozddeystviy na tumany i sloistuyu oblachnost'. (Development and creation of a valid layout of the device for monitoring and recording the results of active impacts on fogs and stratus clouds) Otchet po NIR, 1989. 109 p. (in Russ).
6. Pokrovskiy G.I. Vzryv (Explosion). Moskva: Nedra, 1967. 411 p. (in Russ).
7. Zel'dovich Ya.B., Rayzer Yu.P. Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy (Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena). M.: Nauka, 1966. 687 p. (in Russ).
8. Kachurin L.G. Fizicheskiye osnovy vozddeystviya na atmosferynye protsessy: monografiya (Physical bases of influence on atmospheric processes: monograph). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. 455 p. (in Russ).

Рукопись поступила в редакцию 23.12.2018 г.

Принята к публикации 25.02.2019 г.

Об авторах

Калов Хажбара Мамизович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт». Адрес: Россия, Кабардино-Балкарская республика, г. Нальчик, пр. Ленина, д. 2, Scopus ID: 6505656548, Researcher ID: V-6492-2018. Телефон: 8 (928) 080-59-42. E-mail: ruslan_kalov@mail.ru.

Калов Руслан Хажбарович, кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт» по научной работе. Адрес: Россия, Кабардино-Балкарская республика, г. Нальчик, пр. Ленина, д. 2, Scopus ID: 57202231180, Researcher ID: V-6505-2018. Телефон: 8 (928) 718-50-14. E-mail: ruslan_kalov@mail.ru.

About the authors

Kalov Khazhbara Mamizovich, Doctor of Physical and Mathematical Science, Professor, chief scientific researcher of the Federal state budgetary institution «High-Mountain Geophysical Institute». Address: Russia, Kabardino-Balkar Republic, Nalchik, Lenin Ave., 2. Scopus ID: 6505656548. Researcher ID V-6492-2018. Phone: 8 (928) 080-59-42. E-mail: ruslan_kalov@mail.ru.

Kalov Ruslan Khazhbarovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for scientific work of the Federal state budgetary institution «High-Mountain Geophysical Institute». Address: Russia, Kabardino-Balkar Republic, Nalchik, Lenin Ave., 2. Scopus ID: 57202231180, Researcher ID V-6505-2018, Phone: 8 (928) 718-50-14. E-mail: ruslan_kalov@mail.ru.

25.00.30
УДК 551.513.22

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ
И АГРОМЕТЕОРОЛОГИЯ

**Федина А.А.,
Мкртчян А.С.,
Шевченко А.И.,
Шаталов Н.А.**

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

ПОЛЯ ВОЗМУЩЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ,
ПЛОТНОСТИ И СКОРОСТИ
ПРИ ГЕОСТРОФИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ
АТМОСФЕРЫ

Введение:

Под общей (глобальной) циркуляцией атмосферы (ОЦА) понимают совокупность воздушных течений (ветров) такой горизонтальной протяженности (масштаба), которая сравнима с размерами материков и океанов. К ОЦА относятся такие системы воздушных потоков, как западный перенос в умеренных широтах обоих полушарий, пассатные ветры субтропиков, муссоны, струйные течения, системы движения в планетарных волнах, циклонах и антициклонах. Циркуляция атмосферы определяется рядом факторов, среди которых наиболее важными являются лучистая энергия Солнца, неравномерно распределенная на земном шаре и сила Кориолиса.

Материалы и методы: Как известно, геострофическое состояние атмосферы является ее основным стационарным состоянием. При этом нам остается неизвестным поле возмущения давления. Поэтому в этой ситуации поступают следующим образом: по фактическому полю давления определяют скорость геострофического ветра. Получается, что геострофическое состояние является неопределенным. В данной работе предлагается решение для полей возмущения давления и плотности, соответствующие геострофическому (стационарному) состоянию атмосферы.

Результаты
исследования:

для возмущений давления и плотности получаем:

$$p' = -2\omega_0 z \rho_e \frac{c}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} (k_1 x + k_2 y), \quad \rho' = \frac{2\omega_0 z c}{g \sqrt{k_1^2 + k_2^2}} \rho_e \left[k_2 \frac{\omega_{0y}}{\omega_{0z}} - \alpha (\gamma_A - \gamma) (k_1 x + k_2 y) \right]$$

Отсюда для проекций скорости геострофического ветра получим выражения

$$u_g = -\frac{1}{2\omega_0 z \rho_e} \frac{\partial p'}{\partial y} = \frac{k_2}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} c, \quad v_g = \frac{1}{2\omega_0 z \rho_e} \frac{\partial p'}{\partial x} = -\frac{k_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} c$$

Обсуждение

и заключение: Таким образом, в работе проведен анализ линеаризованной системы уравнений динамики атмосферы. В эту систему входят уравнения движения в трех проекциях на оси координат, уравнение неразрывности и уравнение теплопроводности. Показано, что равенство нулю вертикальной составляющей скорости является следствием стационарности возмущения температуры. Как правило, этот факт просто постулируется и входит в определение геострофического состояния атмосферы.

Ключевые слова:

геострофическое состояние атмосферы, уравнение статики атмосферы, геострофический ветер, сила Кориолиса, параметр Кориолиса, завихренность, функция тока.

**Fedina A.A.,
Mkrtchyan A.S.,
Shevchenko A.I.,
Shatalov N.A.** North-Caucasian Federal University,
Stavropol, Russia,
zakinyan@mail.ru

Fields of perturbation of pressure, density and speeds at a geostrophic state of atmosphere

Introduction: The general (global) atmospheric circulation (OCA) is understood as the totality of air currents (winds), which is the horizontal extent (scale), which allows you to get the size of the material and the oceans. Airflow systems such as westerly transport in temperate latitudes of both hemispheres, trade winds of subtropics, monsoons, string currents, a system of motion in planetary waves, cyclones and anticyclones. Atmospheric circulation is determined by a number of factors that are unevenly distributed across the globe and the Coriolis force.

Materials and methods: As is known, the geostrophic state of the atmosphere is its basic stationary state. In this case, the pressure perturbation field remains unknown to us. Therefore, in this situation, proceed as follows: the actual pressure field determines the speed of the geostrophic wind. It turns out that the geostrophic state is uncertain. In this paper, a solution is proposed for pressure and density perturbation fields corresponding to the geostrophic (stationary) state of the atmosphere.

Results of the research: for pressure and density perturbations we get:

$$p' = -2\omega_0 z \rho_e \frac{c}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} (k_1 x + k_2 y), \quad \rho' = \frac{2\omega_0 z c}{g \sqrt{k_1^2 + k_2^2}} \rho_e \left[k_2 \frac{\omega_{0y}}{\omega_0 z} - \alpha (\gamma_A - \gamma) (k_1 x + k_2 y) \right]$$

From here for the projections of the speed of the geostrophic wind we obtain the expression

$$u_g = -\frac{1}{2\omega_0 z \rho_e} \frac{\partial p'}{\partial y} = \frac{k_2}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} c, \quad v_g = \frac{1}{2\omega_0 z \rho_e} \frac{\partial p'}{\partial x} = -\frac{k_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} c$$

Discussion and conclusion: Thus, the analysis of the linearized system of equations of atmospheric dynamics is carried out. This system includes the equations of motion in three projections on the coordinate axes, the continuity equation and the heat equation. It is shown that the zero vertical component of the velocity is a consequence of the stationarity of the temperature perturbation. As a rule, this fact is simply postulated and is included in the definition of the geostrophic state of the atmosphere.

Keywords: geostrophic state of the atmosphere, equation of atmospheric static, geostrophic wind, Coriolis force, Coriolis parameter, vorticity, flow function.

Введение

Под общей (глобальной) циркуляцией атмосферы (ОЦА) понимают совокупность воздушных течений (ветров) такой горизонтальной протяженности (масштаба), которая сравнима с размерами материков и океанов. К ОЦА относятся такие системы воздушных потоков, как западный перенос в умеренных широтах обоих полушарий, пассатные ветры субтропиков, муссоны, струйные течения, системы движения в планетарных волнах, циклонах и антициклонах [3].

Циркуляция атмосферы определяется рядом факторов, среди которых наиболее важными являются лучистая энергия Солнца, неравномерно распределенная на земном шаре и сила Кориолиса [2].

Представления об основных процессах ОЦА были заложены в работах В. Бьеркнеса и Россби еще в 1930–1940-х гг. [1].

Одним из основных элементов структуры ОЦА является западный ветер (западный перенос).

Как известно, крупномасштабные движения во вращающейся атмосфере являются квазистатическими и квазигеострофическими. Составляющие скорости горизонтального ветра легко определяются из геострофического соотношения, которые получаются в результате приравнивания градиента давления и силы Кориолиса [1].

Материалы и методы исследования

Как известно, геострофическое состояние атмосферы является ее основным стационарным состоянием. При этом нам остается неизвестным поле возмущения давления. Поэтому в этой ситуации поступают следующим образом: по фактическому полю давления определяют скорость геострофического ветра. Получается, что геострофическое состояние является неопределенным.

В данной работе предлагается решение для полей возмущения давления и плотности, соответствующие геострофическому (стационарному) состоянию атмосферы.

В локальной системе координат (x, y, z) состояние атмосферы описывается системой уравнений

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) + 2\omega_0 z v - 2\omega_0 y w, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) - 2\omega_0 z u, \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) - g + 2\omega_0 y u, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla) T = 0, \quad (4)$$

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

Здесь T –

температура воздуха возмущенной атмосферы, соответственно;

(u, v, w) – проекции скорости движения воздуха, соответственно, на оси (x, y, z) ,
 ρ – плотность воздуха;
 p – давление воздуха;
 $(\omega_{0y}, \omega_{0z})$ – проекции вектора угловой скорости вращения Земли, соответственно, на оси (y, z) .

Напомним, что ось x направлена по касательной к параллели в направлении вращения Земли, ось y – по касательной к меридиану в направлении от экватора к северному полюсу; ось z – перпендикулярна поверхности Земли. Поэтому $\omega_{0x} = 0$. Далее, g – ускорение свободного падения.

Кинематическую вязкость воздуха и коэффициент теплопроводности воздуха считаем равными нулю.

Представим параметры атмосферы в возмущенном состоянии в виде:

$$p = \bar{p}(z) + p'(x, y, z, t), \quad T = T_e(z) + \theta(x, y, z, t), \quad T_e = T_{e0} - \gamma \cdot z, \quad \rho = \rho_e + \rho', \quad (6)$$

т.е. в виде суммы значения параметра в состоянии статики атмосферы и возмущенного значения.

Уравнение статики атмосферы выражается формулами:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} = 0, \quad -\frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \right) - g = 0. \quad (7)$$

В состоянии статики плотность воздуха изменяется с высотой по закону:

$$\rho_e(z) = \rho_{e0} e^{-\alpha(\gamma_A - \gamma)z} \quad (8)$$

– распределение плотности воздуха с высотой в состоянии статики атмосферы;
 γ_A – так называемый, градиент автоконвекции, он совпадает с градиентом температуры однородной по плотности атмосферы;

$$T_e(z) = T_{e0} - \gamma z \quad (9)$$

γ – температура воздуха в состоянии статики атмосферы;
 вертикальный градиент температуры.

Тогда система уравнений запишется в виде:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial p'}{\partial x} \right) + 2\omega_{0z}v - 2\omega_{0y}w, \quad (10)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial p'}{\partial y} \right) - 2\omega_{0z}u, \quad (11)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_e} \left(\frac{\partial p'}{\partial z} \right) - \frac{\rho'}{\rho_e} g + 2\omega_{0y}u, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \gamma \cdot w, \quad (13)$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + u \frac{\partial \rho'}{\partial x} + v \frac{\partial \rho'}{\partial y} + w \frac{\partial \rho'}{\partial z} + w \frac{\partial \rho_e}{\partial z} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0. \quad (14)$$

Линеаризуем систему уравнений (10) – (14):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p'}{\partial x} + 2\omega_{0z}v - 2\omega_{0y}w, \quad (15)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p'}{\partial y} - 2\omega_{0z}u, \quad (16)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p'}{\partial z} - \frac{g}{\rho_e} \rho' + 2\omega_{0y}u, \quad (17)$$

$$\frac{1}{\rho_e} \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \alpha(\gamma_A - \gamma)w. \quad (18)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \gamma \cdot w. \quad (19)$$

Из уравнения (19) следует, что источником генерации вертикальной скорости является нестационарное возмущение температуры.

В стационарном состоянии

$$-\frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p'}{\partial x} + 2\omega_{0z}v - 2\omega_{0y}w = 0, \quad (20)$$

$$-\frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p'}{\partial y} - 2\omega_{0z}u = 0, \quad (21)$$

$$-\frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p'}{\partial z} - \frac{g}{\rho_e} \rho' + 2\omega_{0y}u = 0, \quad (22)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \alpha(\gamma_A - \gamma)w. \quad (23)$$

$$w = 0. \quad (24)$$

Обычно, равенство нулю вертикальной составляющей скорости является определением геострофического состояния. Но, как видно из приведенного анализа, равенство нулю вертикальной составляющей скорости является следствием стационарности состояния системы.

Получаем систему уравнений, описывающих геострофическое состояние атмосферы:

$$-\frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p'}{\partial x} + 2\omega_{0z}v = 0, \quad (20)$$

$$-\frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p'}{\partial y} - 2\omega_{0z}u = 0, \quad (21)$$

$$-\frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p'}{\partial z} - \frac{g}{\rho_e} \rho' + 2\omega_{0y}u = 0, \quad (22)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (23)$$

Обычно при описании геострофического состояния атмосферы уравнение (22) заменяется уравнением статики атмосферы. Но на наш взгляд это не корректно. Нет оснований пренебрегать уравнением (22).

Взяв производную по переменной x от (20) и производную по переменной y от (21), и складывая уравнения, получим

$$\Omega_z = \frac{1}{2\omega_{0z}\rho_e} \left(\frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p'}{\partial y^2} \right), \quad (24)$$

$$\text{Здесь } \Omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (25)$$

– вертикальная завихренность

Из формулы (24) следует, что поле завихренности коррелирует с полем возмущения давления. Однако, наличие завихренности не означает, поле возмущения давления имеет круговой характер. По физическому смыслу геострофического состояния – это состояние с равным нулю ускорением. Поэтому движение может быть только прямолинейным и равномерным.

Из (23) следует, что можно ввести функцию тока:

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (26)$$

$$\text{Отсюда } \Omega_z = -\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right). \quad (27)$$

Подставляя (27) в (24), получим

$$-\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \psi = \frac{1}{2\omega_{0z}\rho_e} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) p', \quad -\psi = \frac{1}{2\omega_{0z}\rho_e} p' \quad (28)$$

Из (22) получим

$$\rho' = -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{\omega_{0y}}{\omega_{0z}} \frac{\partial}{\partial y} \right) p'. \quad (29)$$

Умножим (20) на v , а (21) на u и вычтем

$$\frac{1}{\rho_e} \left(v \frac{\partial}{\partial x} - u \frac{\partial}{\partial y} \right) p' - 2\omega_{0z} (u^2 + v^2) = 0. \quad (30)$$

$$\text{Пусть } u^2 + v^2 = c^2 = \text{const}, \quad (31)$$

$$\left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \right)^2 = c^2. \quad (32)$$

Принятое допущение равносильно постоянству кинетической энергии движения воздуха, что является очевидным в стационарном состоянии атмосферы.

Результаты исследования и их обсуждение

Найдем решение уравнения (32) в виде:

$$\psi = \frac{c}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} (k_1 x + k_2 y). \quad (33)$$

Отсюда следует, что линии тока в геострофическом состоянии атмосферы представляют собой прямые линии, направленные под углом к оси x , определяемым равенством: $\text{tg } \alpha = k_2/k_1$.

Для возмущений давления и плотности соответственно получим

$$p' = -2\omega_{0z}\rho_e \frac{c}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} (k_1 x + k_2 y), \quad (34)$$

$$\rho' = \frac{2\omega_{0z}c}{g\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} \rho_e \left[k_2 \frac{\omega_{0y}}{\omega_{0z}} - \alpha(\gamma_A - \gamma)(k_1 x + k_2 y) \right]. \quad (35)$$

Отсюда для проекций скорости геострофического ветра получим выражения

$$u_g = -\frac{1}{2\omega_0 z \rho_e} \frac{\partial p'}{\partial y} = \frac{k_2}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} c, \quad v_g = \frac{1}{2\omega_0 z \rho_e} \frac{\partial p'}{\partial x} = -\frac{k_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} c. \quad (36)$$

Таким образом, в геострофическом состоянии атмосферы геострофический ветер имеет постоянное значение и направлен под углом $\tan \alpha = k_2/k_1$ к оси x . В зависимости от значений k_1 и k_2 направление геострофического ветра может быть произвольным. В частности, если $k_1 = 0$, и $k_2 > 0$ то мы имеем зональный поток в направлении с запада на восток. Если же $k_1 = 0$, а $k_2 < 0$, то мы имеем поток в обратном направлении с востока на запад.

Аналогично, если $k_2 = 0$, а $k_1 < 0$, то мы имеем меридиональный поток в направлении с юга на север. Если же $k_2 = 0$, а $k_1 > 0$, то мы имеем обратный поток с севера на юг.

В общем случае, если знаки k_1 и k_2 одинаковые, то мы имеем поток в направлении с северо-запада на юго-восток, если же знаки противоположны, то направление потока с юго-запада на северо-восток.

Выводы

Таким образом, в работе проведен анализ линеаризованной системы уравнений динамики атмосферы. В эту систему входят уравнения движения в трех проекциях на оси координат, уравнение неразрывности и уравнение теплопроводности. Показано, что равенство нулю вертикальной составляющей скорости является следствием стационарности возмущения температуры. Как правило, этот факт просто постулируется и входит в определение геострофического состояния атмосферы.

В систему уравнений, описывающих геострофическое состояние атмосферы, входит также вертикальная проекция уравнения движения. Данным уравнением, как правило, пренебрегают и заменяют ее уравнение статики атмосферы, что, на наш взгляд, является не правомерным.

Следует заметить, что во вращающейся атмосфере, вопреки установившимся представлениям, геострофического состояния быть не может. Это следует из того, что согласно первому закону Ньютона при равенстве нулю ускорения тело может двигаться только прямолинейно и равномерно. Поэтому о геострофическом движении можно говорить только локально в малых масштабах.

Работа выполнена под научным руководством профессора Р.Г. Закиняна.

Библиографический список

1. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. М.: Мир, 1986. Т. 1, 399 с.; Т. 2, 416 с.
2. Holton J.R. An Introduction to Dynamic Meteorology. Forth edition. Elsevier, 2004, p. 540.
3. Матвеев Л.Т. Теория общей циркуляции атмосферы и климата Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1991, 295 с.
4. Zakinyan R.G., Zakinyan A.R., Ryzhkov R. On the Isobaric Surface Shape in the Geostrophic State of the Atmosphere // The 1st International Electronic Conference on Atmospheric Sciences (ECAS 2016), 16–31 July 2016; Sciforum Electronic Conference Series. Vol. 1, 2016.
5. Zakinyan R.G., Zakinyan A.R., Ryzhkov R. Phases of the Isobaric Surface Shapes in the Geostrophic State of the Atmosphere and Connection to the Polar Vortices // Atmosphere 2016, 7, 126; doi: 10.3390/atmos 7100126.
6. Шакина Н.П. Лекции по динамической метеорологии. М.: Триада ЛТД, 2013. 160 с.

References

1. Gill A. Dynamics of the atmosphere and the ocean. M.: Mir, 1986, T. 1, 399 p.; T. 2, 416 s.
2. Holton J.R. An Introduction to Dynamic Meteorology. Forth edition. Elsevier, 2004, p. 540.
3. Matveyev L.T. The theory of the general circulation of the atmosphere and climate of the Earth. L.: Hydrometeoizdat, 1991, 295 p.
4. Zakinyan R.G., Zakinyan A.R., Ryzhkov R. On the Isobaric Surface Shape in the Geostrophic State of the Atmosphere // The 1st International Electronic Conference on Atmospheric Sciences (ECAS 2016), 16–31 July 2016; Sciforum Electronic Conference Series, Vol. 1, 2016.
5. Zakinyan R.G., Zakinyan A.R., Ryzhkov R. Phases of the Isobaric Surface Shapes of the Atmosphere and the Polar Vortices // Atmosphere 2016. 7. 126. doi: 10.3390 / atmos 7100126.
6. Shakina N.P. Lectures on dynamic meteorology. M.: TRIADA LTD, 2013. 160 p.

**Рукопись поступила в редакцию 13.12.19,
принята к публикации 01.03.19.**

Об авторах

- Федина А.А.**, аспирант кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета. Тел. 8-918-757-76-55.
E-mail: alexmendas@gmail.com.
- Мкртчян А.С.**, аспирант кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета. Тел. 8-918-779-60-50.
E-mail: Mkrtchyan-asmik@mail.ru.

Шевченко А.И., доцент кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета. Тел. 8-905-499-12-01.
E-mail: shev-ai@mail.ru.

Шаталов Н.А., аспирант кафедры общей и теоретической физики Северо-Кавказского федерального университета.

About the authors

Fedina A.A., Post-Graduate Student, Department of General and Theoretical Physics, North-Caucasian Federal University.

Phone: 8-918-757-76-55. Email: alexmendas@gmail.com.

Mkrtchyan A.S., Post-Graduate Student. Department of General and Theoretical Physics, North-Caucasian Federal University.

Phone: 8-918-779-60-50. E-mail: Mkrtchyan-asmik@mail.ru.

Shevchenko A.I., Associate Professor of the Department of General and Theoretical Physics of the North-Caucasian Federal University,

Phone: 8-905-499-12-01, E-mail: shev-ai@mail.ru.

Shatalov N.A., Post-Graduate Student, Department of General and Theoretical Physics, North-Caucasian Federal University.



Издательство Северо-Кавказского
федерального университета.
г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1.

Корректор – М.И. Толмачев.
Компьютерная верстка – О.Г. Полевич.

Подписано в печать 29.03.2019 г. Выход в свет 16.04.2019 г.
Формат 70 × 108 1/16. Гарнитура Times New Roman. Бумага
офсетная. Усл. печ. л. 15,5. Тираж 1000 экз. Цена 534 руб.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе
ФГАОУВО «Северо-Кавказский федеральный университет».
355029, г. Ставрополь, пр-т Кулакова, 2.