

ISSN 1026-2237

DOI 10.18522/1026-2237

ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский  
регион*

---

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2024

4-2

## Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

### Главная редакция:

М.А. Боровская (главный редактор),  
В.Е. Закруткин (заместитель главного редактора),  
Е.А. Шинкаренко (ответственный секретарь)

### Редакционная коллегия:

М.А. Боровская – главный редактор, академик РАО, доктор эконом. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
В.Е. Закруткин – председатель редколлегии, доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
Я.М. Ерусалимский – зам. председателя редколлегии, кандидат физ.-мат. наук, доктор техн. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
В.А. Бабешко – академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор, Кубанский государственный университет, Россия  
Б.С. Карамурзов – доктор техн. наук, профессор, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Россия  
В.И. Колесников – академик РАН, доктор техн. наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия  
А.Г. Кусраев – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный математический институт ВНЦ РАН, Россия  
Г.Г. Матишов – академик РАН, доктор геол.-мин. наук, профессор, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Россия  
В.И. Минкин – академик РАН, доктор хим. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
М.Х. Рабаданов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Дагестанский государственный университет, Россия  
А.В. Абанин – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
Г.Г. Бабаян – доктор техн. наук, Центр эколого-ноосферных исследований НАН РА, Армения  
О.С. Безуглова – доктор биол. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
Н.И. Бойко – доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
А.В. Бочкарев – доктор геол.-мин. наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Россия  
Л.С. Ворович – кандидат физ.-мат. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия  
О.Н. Демина – доктор биол. наук, профессор, Карачаево-Черкесский государственный университет им. У.Д. Алиева, Россия  
А.Г. Захаров – доктор техн. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
Л.М. Зубов – доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
М.Ю. Жуков – доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
А.Н. Карапетянц – доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
Д.В. Карелин – доктор биол. наук, Институт географии РАН, Россия  
М.И. Карякин – доктор физ.-мат. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия  
С.И. Колесников – кандидат геогр. наук, доктор с.-х. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
Е.М. Колосова – кандидат физ.-мат. наук, Южный федеральный университет, Россия  
Г.В. Куповых – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
С.В. Курбатов – доктор хим. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
А.М. Лерер – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
С.Н. Мелихов – доктор физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
В.А. Миноранский – доктор с.-х. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
В.В. Онищенко – доктор геогр. наук, профессор, Карачаево-Черкесский государственный университет им. У.Д. Алиева, Россия  
О.В. Назаренко – кандидат геогр. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия  
С.Г. Парада – доктор геол.-мин. наук, доцент, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Россия  
Г.В. Пироговская – доктор с.-х. наук, профессор, Институт почвоведения и агрохимии НАН РБ, Белоруссия  
В.С. Рабинович – доктор физ.-мат. наук, профессор, Национальный политехнический институт, Мексика  
М.А. Сазыкина – доктор биол. наук, доцент, Южный федеральный университет, Россия  
В.И. Силаев – доктор геол.-мин. наук, Институт геологии им. Н.П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН, Россия  
В.Н. Труфанов – доктор геол.-мин. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
П. Фатгаль – доктор наук, профессор, Университет Нанта, Франция  
Ю.А. Федоров – доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия  
А.Д. Хованский – кандидат геол.-мин. наук, доктор геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет, Россия

### Учредители:

Дагестанский государственный технический университет,  
Дагестанский государственный университет,  
Донской государственный технический университет,  
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,  
Кубанский государственный технологический университет,  
Ростовский государственный университет путей сообщения,  
Ростовский государственный экономический университет (РИНХ),  
Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова,  
Южный федеральный университет

**Journal was founded in 1972 by Yu.A. Zhdanov**

**Main Edition:**

M.A. Borovskaya (Editor-in-Chief),  
V.E. Zakrutkin (Deputy Editor-in-Chief),  
E.A. Shinkarenko (Assistant Editor)

**Editorial Board:**

M.A. Borovskaya - Editor-in-Chief, Academician, Russian Academy of Education, Doctor of Economics, Professor, Southern Federal University, Russia  
V.E. Zakrutkin - Chairman of the Editorial Board, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia  
Ya.M. Erusalimsky - Deputy Chairman of the Editorial Board, Candidate of Physics and Mathematics, Doctor of Technical Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia  
V.A. Babeshko - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Kuban State University, Russia  
B.S. Karamurзов - Doctor of Technical Sciences, Professor, Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Russia  
V.I. Kolesnikov - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rostov State Transport University, Russia  
A.G. Kusraev - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Mathematical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia  
G.G. Matishov - Academician, Sciences, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Federal Research Center the Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia  
V.I. Minkin - Academician, Russian Academy of Sciences, Doctor of Chemistry, Professor, Southern Federal University, Russia  
M.H. Rabadanov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Dagestan State University, Russia  
A.V. Abanin - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia  
G.G. Babayan - Doctor of Technical Sciences, Center for Ecological and Noospheric Studies, National Academy of Sciences of Armenia, Armenia  
O.S. Bezuglova - Doctor of Biology, Professor, Southern Federal University, Russia  
N.I. Boiko - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia  
A.V. Bochkarev - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Russia  
L.S. Vorovich - Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Southern Federal University, Russia  
O.N. Dyomina - Doctor of Biological Sciences, Professor, Aliev Karachay-Cherkess State University, Russia  
M.Y. Zhukov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia  
A.G. Zakharov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia  
L.M. Zubov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia  
A.N. Karapetyants - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia  
Dmitry V. Karelin - Doctor of Biology, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences  
M.I. Karjakin - Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Southern Federal University, Russia  
S.I. Kolesnikov - Candidate of Geography, Doctor of Agricultural Science, Professor, Southern Federal University, Russia  
E.M. Kolosova - Candidate of Physics and Mathematics, Southern Federal University, Russia  
G.V. Kupovykh - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia  
S.V. Kurbatov - Doctor of Chemistry, Professor, Southern Federal University, Russia  
A.M. Lerer - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia  
S.N. Melikhov - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, Russia  
V.A. Minoranskiy - Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia  
V.V. Onishchenko - Doctor of Geography, Professor, Aliev Karachay-Cherkess State University, Russia  
O.V. Nazarenko - Candidate of Geography, Associate Professor, Southern Federal University, Russia  
S.G. Parada - Doctor of Geology and Mineralogy, Associate Professor, Federal Research Center the Southern Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Russia  
G.V. Pirogovskaya - Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Institute of Soil Science and Agrochemistry, National Academy of Sciences of Belarus, Belarus  
V.S. Rabinovich - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, National Polytechnic Institute, Mexico  
M.A. Sazykina - Doctor of Biological Sciences, Professor, Southern Federal University, Russia  
Valerii I. Silaev - Doctor of Geology and Mineralogy, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia  
V.N. Trufanov - Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Southern Federal University, Russia  
P. Fattal - PhD, Professor, University of Nantes, France  
Yu.A. Fedorov - Doctor of Geography, Professor, Southern Federal University, Russia  
A.D. Khovanskiy - Candidate of Geology and Mineralogy, Doctor of Geography, Professor, Southern Federal University, Russia

**The Founders**

Dagestan State Technical University,  
Dagestan State University,  
Don State Technical University,  
Berebekov Kabardino-Balkarian State University,  
Kuban State Technological University,  
Rostov State Transport University,  
Rostov State University of Economics,  
Platov South Russian State Polytechnical University,  
Southern Federal University

# ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН

## BULLETIN OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS. NORTH CAUCASUS REGION

doi: 10.18522/1026-2237-2024-4-2

*Свидетельство о регистрации*  
ПИ № ФС 77 – 77252 от 25.11.2019,  
выдано Федеральной службой по надзору  
в сфере связи, информационных технологий  
и массовых коммуникаций  
Научный журнал  
Издается с 1973 г.  
Периодичность серии 4 номера в год  
№ 4-2 (224-2) 2024 г.

*Registration certificate*  
PI No. FS 77 - 77252 dated 25.11.2019  
issued Federal Service for Supervision  
of Communications, Information Technology,  
and Mass Media  
Science magazine  
Published since 1973.  
4 issues per a year  
No. 4-2 (224-2) 2024

### ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

### NATURAL SCIENCE

#### СОДЕРЖАНИЕ

#### CONTENTS

#### НАУКИ О ЗЕМЛЕ

#### SCIENCES OF EARTH

<b>Варданян Р.Р., Суварян С.Р., Андреасян В.Д.</b> Устойчивый туризм как фактор разрешения экологических проблем (на примере города Еревана).....	4	<b>Vardanyan R.R., Suvaryan S.R., Andreyan V.D.</b> Sustainable Tourism as a Factor in Solving Environmental Problems (Using the Example of Yerevan).....	4
<b>Глинка В.В., Сапрыгин В.В., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А.</b> Типизация берегов Волгоградского водохранилища (левый берег) на основе данных беспилотных летательных аппаратов.....	11	<b>Glinka V.V., Saprygin V.V., Ivlieva O.V., Bespalova L.A.</b> Typification of Volgograd Reservoir Coasts (Left Coast) Based on Data From Unmanned Aerial Vehicles.....	11
<b>Горбунова Т.Л., Гудкова Н.К., Рубанова Н.И.</b> Оценка воздействия стока некоторых рек Сочинского Причерноморья на прибрежную морскую среду в зонах их плумов.....	20	<b>Gorbunova T.L., Gudkova N.K., Rubanova N.I.</b> Assessment of the Impact of Some Rivers of the Black Sea Region on the Coastal Marine Environment in Their Plume Zones.....	20
<b>Горяев И.А., Уланова С.С.</b> О формации <i>Tamariceta ramosissima</i> в экотонных системах Северо-Западного Прикаспия.....	31	<b>Goryaev I.A., Ulanova S.S.</b> On the <i>Tamariceta Ramosissima</i> Formation in the Ecotone Systems of the Northwestern Caspian Lowland.....	31
<b>Забураева Х.Ш.</b> Туристско-рекреационное районирование Чеченской Республики.....	43	<b>Zaburaeva Kh.Sh.</b> Tourist and Recreational Zoning of the Chechen Republic.....	43
<b>Назаренко О.В., Гарькуша Д.Н.</b> Изменение метеорологических условий в Республике Калмыкии за период 1970–2020 годов.....	49	<b>Nazarenko O.V., Gar'kusha D.N.</b> Changes in the Meteorological Conditions in Republic of Kalmykia in 1970-2020.....	49
<b>Парада С.Г.</b> Петрохимические особенности и формационная принадлежность магматических пород Кондаковского поднятия (Восточный Донбасс).....	59	<b>Parada S.G.</b> Petrochemical Features and Formation Affiliation of Igneous Rocks of the Kondakov Uplift (Eastern Donbass).....	59
<b>Пономарев В.С., Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Фаррахова Н.Н.</b> Вещественный состав хромитов из ультрамафитов обрамления Сысертского комплекса (гора Крон, Средний Урал).....	67	<b>Ponomarev V.S., Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Farrakhova N.N.</b> Composition of Chromitites from Ultramafites Framing the Sysert Complex (Mount Kron, Middle Urals).....	67



<b>Радионон А.А.</b> Аналитическая модель суточной осцилляции плотности для возникновения ночных низкоуровневых струйных течений.....	77	<b>Radionoff A.A.</b> Analytical Study of the Low Level Jet Formation in a Diurnal Density Oscillation Model.....	77
<b>Решетняк О.С., Галагур К.Г.</b> Региональные особенности формирования ионного стока в бассейне Северной Двины.....	93	<b>Reshetnyak O.S., Galagur K.G.</b> Regional Features of Formation of Ion Runoff in the Northern Dvina Basin ...	93
<b>Тимошенко Д.В., Куповых Г.В., Белоусова О.В.</b> Анализ электродинамической модели приземного слоя атмосферы.....	104	<b>Timoshenko D.V., Kupovykh G.V., Belousova O.V.</b> Analysis of the Atmosphere Ground Layer Electrodynamic Model .....	104
<b>Федоров Ю.А., Зимовец А.А., Доценко И.В., Гарькуша Д.Н., Михайленко А.В., Доценко Н.В.</b> Эколого-географическая характеристика озера Пелёнкино (Ростовская область) по материалам ретроспективных и современных исследований .....	113	<b>Fedorov Yu.A., Zimovets A.A., Dotsenko I.V., Gar'ku-sha D.N., Mikhailenko A.V., Dotsenko N.V.</b> Ecological and Geographical Characteristics of the Lake Pelenkino (Rostov Region) Based on the Materials of Retrospective and Modern Research.....	113
<b>Хардинов А.Э., Бондарева О.С.</b> Условия образования месторождений золота золоторудно-кварцевого формационного типа на примере рудопоявления Хугланна Верхояно-Колымской складчатой области.....	127	<b>Hardikov A.E., Bondareva O.S.</b> Conditions for the Gold Deposits Formation of Gold-Quartz Formation Type on the Example of the Hooglannach Ore Occurrence of the Verkhoyansk-Kolyma Folded Region.....	127
<b>Gurbanov G.H.</b> Conditions for the Formation of Landslides in the Territory of the Nakhchivan Autonomous Republic .....	139	<b>Gurbanov G.H.</b> Conditions for the Formation of Landslides in the Territory of the Nakhchivan Autonomous Republic .....	139

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ SCIENCES OF EARTH

Научная статья

УДК 338.46

doi: 10.18522/1026-2237-2024-4-2-4-10

### УСТОЙЧИВЫЙ ТУРИЗМ КАК ФАКТОР РАЗРЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА ЕРЕВАНА)

**Рена Рафаэловна Варданян<sup>1✉</sup>, Сейран Рафикович Суварян<sup>2</sup>, Ваге Дереникович Андреасян<sup>3</sup>**

<sup>1, 2, 3</sup> Ереванский государственный университет, Ереван, Республика Армения

<sup>1</sup> r.vardanyan@ysu.am✉

<sup>2</sup> s.suvaryan@ysu.am

<sup>3</sup> andreasyan\_yahe@lest.ru

**Аннотация.** Направленность на новое видение в области туризма обусловлена тенденцией к глобализации человеческой деятельности, резкому увеличению масштабов туристического бизнеса и его диверсификации. Это привело к обострению экологических проблем. Стратегия устойчивого туризма требует системного подхода к данной проблеме. Целью данной статьи является попытка осмысления новейших тенденций, выявления всеобщих закономерностей в стратегии устойчивого туризма, которые заключаются в факторе устойчивого природопользования, как во всем мире, так и в Республике Армения (РА). Увеличение туристских потоков в РА приводит к обострению тех же проблем, связанных с развитием туризма в мире. Ряд факторов способствует нарушению экологического баланса в столице РА. Для создания устойчивой городской среды и восстановления благоприятного климата в Ереване необходимо проектировать зеленую инфраструктуру. Необходимо по возможности придерживаться концепции устойчивого развития городов, которая предполагает концентрацию внимания и усилий не на архитектурных постройках, а на открытом городском пространстве. Приоритетным является выявление экологического и туристического баланса, выработка новой мировоззренческой парадигмы в отношении городов как территорий с устойчивым развитием.

**Ключевые слова:** устойчивое развитие, глобализация, туристские потоки, устойчивый туризм, деградация почв, устойчивое природопользование, сухость воздуха, экобаланс

**Для цитирования:** Варданян Р.Р., Суварян С.Р., Андреасян В.Д. Устойчивый туризм как фактор разрешения экологических проблем (на примере города Еревана) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 4-2. С. 4–10.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

## SUSTAINABLE TOURISM AS A FACTOR IN SOLVING ENVIRONMENTAL PROBLEMS (USING THE EXAMPLE OF YEREVAN)

**Rena R. Vardanyan<sup>1✉</sup>, Seyran R. Suvaryan<sup>2</sup>, Vahe D. Andreasyan<sup>3</sup>**

<sup>1, 2, 3</sup> Yerevan State University, Yerevan, Republic of Armenia

<sup>1</sup> r.vardanyan@ysu.am✉

<sup>2</sup> s.suvaryan@ysu.am

<sup>3</sup> andreasyan\_vahe@lest.ru

**Abstract.** The focus on a new vision in the field of tourism is due to the trend towards globalization of human activity, a sharp increase in the scale of the tourism business and its diversification. A sharp increase in the scale of tourism activity has led to an aggravation of environmental problems. The strategy of sustainable tourism requires a systematic approach to this problem. The purpose of this article is an attempt to comprehend the latest trends, identify universal patterns in the strategy of sustainable tourism, which lies in the factor of sustainable environmental management, both worldwide and in the RA. The increase in tourist flows in Armenia leads to an aggravation of the same problems associated with the development of tourism in the world. A number of factors contribute to the disruption of the ecological balance in the capital of the Republic of Armenia. In order to create a sustainable urban environment and restore a favorable climate in Yerevan, it is necessary to design a green infrastructure. It is necessary, if possible, to adhere to the concept of sustainable urban development, which involves focusing attention and efforts not on architectural buildings, but on open urban space. The priority is to identify the ecological and tourist balance, to develop a new worldview paradigm in relation to cities as territories with sustainable development.

**Keywords:** sustainable development, globalization, tourist stream, sustainable tourism, soil degradation, sustainable environmental management, dryness of the air, ecological balance

**For citation:** Vardanyan R.R., Suvaryan S.R., Andreasyan V.D. Sustainable Tourism as a Factor in Solving Environmental Problems (Using the Example of Yerevan). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(4-2):4-10. (In Russ.).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

### Введение

В современном мире туризм является одной из наиболее значимых отраслей экономического развития. Современный туризм – это системная деятельность по развитию территорий. Притягательный образ туристической территории формируется из совокупности многих факторов, где ключевую роль играет стратегический менеджмент по развитию территорий [1]. Территория – это социально конструируемая реальность, в которой стратегии геобрендинга и геомаркетинга играют роль своеобразного модератора в организации единого культурного пространства. Развитие сферы туризма в этом аспекте основывается на реализации культурно-познавательной потребности человека [2]. Стремительно развивающаяся индустрия туризма создает все условия для удовлетворения этих потребностей. Однако культурно-познавательная потребность человека в условиях современных реалий трансформируется в потребительское отношение к окружающему миру. Технократическая потребительская цивилизация становится угрозой всему миру и самому человеку. Ориентированность на интенсивный путь развития приводит к необходимости увеличения использования ресурсов во всех областях жизнедеятельности человека, что, в свою очередь, может привести к экологическому кризису. Необходимо найти разумный баланс между прогрессом и потреблением, где ценностные характеристики потребительского контента не будут противоречить нравственным аспектам природопользования.

## Концепция устойчивого туризма и проблемы экологии

В XXI в. намечается тенденция к резкому увеличению масштабов туристической деятельности человека, ее глобализация. Она носит системный характер и охватывает все области жизни современного общества, в том числе и туристическую индустрию. Движущей силой глобализации можно назвать ряд факторов. Это и обострение международной конкуренции, и либерализация экономики, и научно-технический прорыв в сфере транспорта и связи, что позволяет получать необходимую информацию в любой точке мира в реальном режиме, что, в свою очередь, дает возможность международному капиталу свободно интегрироваться в мировое экономическое пространство. Фактически с процессом глобализации мировые сообщества становятся единым пространством. Туризм в этой связи можно назвать социокультурным проводником в данном процессе.

Процесс всемирной туристической интеграции требует нового подхода к уже сформировавшимся отношениям в области туризма. Наметившаяся еще во второй половине XX в. концепция устойчивого туризма начинает постепенно превалировать. Всемирная туристическая организация (UNWTO) определяет устойчивый туризм как «туризм, берущий на себя всю полноту ответственности за нынешнее и будущее экономическое, социальное и экологическое развитие с учетом интересов туристов, предпринимательства, местных общин и охраны окружающей среды» [3].

Всемирная туристическая организация давала долгосрочные прогнозы по туризму на период с 2010 по 2030 г. Предполагалось, что число международных туристских прибытий по всему миру будет увеличиваться на 3,3 % в год в период с 2010 по 2030 г. и достигнет 1,8 млрд к 2030 г. [4]. Данные по количеству туристских потоков за период с 2015 по 2019 г. дают следующую картину. В 2015 г. было зафиксировано 1 млрд 184 млн туристических поездок, что превышает их количество за предыдущий год на 4,4 % [5, 6]. В 2016 г. было совершено 1 млрд 200 млн поездок, что больше, чем в предыдущем году, на 5 % [6]. В 2017 г. – 1 млрд 323 млн поездок (прирост 7 %) [7]. В 2018 г. – 1 млрд 400 млн (прирост 5 %) [8]. В 2019 г. было совершено 1,5 млрд туристических поездок. Это на 4 % больше, чем в предыдущем году [9]. В 2020 г. также прогнозировался 4%-й рост в туристической индустрии, однако вспышка коронавируса замедлила и в корне поменяла картину развития этой отрасли. Мировая экономика оказалась в глубочайшем кризисе. То же можно сказать и о туристической сфере, где практически вся деятельность индустрии оказалась парализованной (в данной статье не ставится цель анализировать события, связанные с пандемией). В 2022 г. ситуация начинает постепенно выравниваться. По данным Всемирной туристической организации, за первые 6 месяцев 2022 г. число международных туристов увеличилось почти втрое (+172 %) по сравнению с аналогичным периодом в 2021 г. [10].

Резкое увеличение масштабов туристической деятельности, ее глобализация привели к обострению экологических проблем и осознанию человеком негативного воздействия на окружающий мир. Удовлетворение культурно-познавательных потребностей приводит к чрезмерной эксплуатации природы, загрязнению окружающей среды, изменению климата, что, в свою очередь, может привести к нарушению баланса в экосистеме и биоразнообразия самой природы. Изменение окружающей природной среды – неизбежный результат туристической деятельности.

Концепция устойчивого туризма начала формироваться не на пустом месте. Основой послужило постепенное понимание и осознание человеком приближающейся экологической катастрофы. Фактически можно говорить об экологизации человеческого сознания, постепенного осознания им своей миссии на этой планете, что привело к формированию ответственного отношения к окружающему миру, нового видения туристической индустрии. Стратегия устойчивого туризма заключается в факторе устойчивого природопользования, что подразумевает осознанное отношение ко всем ресурсам – природным, культурно-историческим, экономическим, создание условий для долгосрочного сохранения баланса имеющихся ресурсов и требует системного подхода к данной проблеме. В 1972 г. в Париже на конференции ООН по вопросам образования, науки и культуры была принята Конвенция по охране всемирного культурного и природного наследия. Был учрежден Фонд охраны всемирного культурного и природного наследия, в котором оговаривались условия и формы предоставления международной помощи [11]. В 1992 г. в Рио-де-Жанейро на конференции по окружающей среде и развитию была принята декларация, в которой были провозглашены обязательства государств по основным принципам достижения нашей цивилизацией устойчивого развития [12]. В 2015 г. ООН запустила программу «Повестка дня в области устойчивого развития».

Принятие этих и многих других документов свидетельствует об осознании большинством государств необходимости разработки стратегии устойчивого развития.

Туризм можно рассматривать как совокупность двух взаимоисключающих тенденций. С одной стороны, туристический бизнес всегда традиционно считался одним из факторов социально-экономического развития, что дает несомненный положительный эффект. Однако с усилением интенсивности туристического бизнеса увеличивается нагрузка на окружающий мир. С увеличением туристских потоков расширяется захват территорий для нужд сектора. Вырубаются зеленые насаждения для строительства новых гостиниц, прокладываются дороги к объектам поселения туристов, что может привести к нарушению естественной биосреды почв, усиливается нагрузка на водные ресурсы. Туристический бизнес увеличивает нагрузку на энергетические системы в связи с необходимостью все большего потребления топлива и энергии. Развитие туристического сектора оказывает негативное влияние на климат и экосистему в целом, что может свести на нет цели Парижского соглашения о климате [13]. Выбросы парниковых газов, связанные с активизацией транспортной составляющей туристической отрасли, составляют 5 % от всех выбросов, вызванных деятельностью человека [14].

### **Некоторые аспекты экологических проблем в Республике Армения в концепции устойчивого туризма**

Увеличение туристских потоков в Республике Армения (РА) приводит к обострению тех же общепланетарных проблем, связанных с развитием туризма в мире. В столице республики Ереване экологическая ситуация остается довольно напряженной. Источниками его атмосферного загрязнения, помимо промышленных предприятий, являются транспорт, энергетика и градостроительство. Особое беспокойство вызывает, наряду с другими проблемами, сухость воздуха.

В разных городах Армении в последние годы обращает на себя внимание тенденция роста превышения предельно допустимых концентраций вредных веществ в атмосфере. В текущем году Министерство окружающей среды распространило проект постановления Правительства РА «Об утверждении Порядка стратегической экологической оценки и требований, предъявляемых к отчету стратегической экологической оценки».

Особое беспокойство вызывает чрезмерно сухой климат Еревана, что доставляет дискомфорт как жителям, так и туристам. Сухость климата обусловлена рядом факторов. Среди них необходимо отметить недостаточные масштабы озеленения, усиленную застройку территории города. В связи с увеличением потока туристов в городе вырубаются зеленые массивы для постройки новых гостиничных комплексов. Обращает на себя внимание ситуация в административном районе Норк-Мараш г. Еревана. За последние годы количество гостиниц в этом административном районе непомерно возросло. В связи со строительством новых гостиничных комплексов вырубаются зеленые насаждения. Расположенный на холме административный район Норк-Мараш, некогда весь покрытый природными зелеными насаждениями, фактически оголился. С порывами ветра пыль с многочисленных стройплощадок распространяется по всему городу.

Та же проблема наблюдается и в другом административном районе Еревана – Арабкире. Здесь также активно вырубаются зеленые насаждения для постройки гостиниц и жилых комплексов. Сам город расположен в котловине. Окружающие его некогда зеленые холмы постепенно оголяются, открывая доступ сухим, изматывающим ветрам.

Невозможно обойти вниманием в этом плане Кольцевой бульвар Еревана, который опоясывает малый центр города и тянется на 5 км. Некоторые участки бульвара так плотно застроены (гостиницы, кафе, рестораны, спортивные комплексы), что его уже вряд ли можно назвать бульваром. Кроме того, при сооружении дорог для нужд гостиничных и иных комплексов оказывается значительное негативное влияние на почву.

Среди многочисленных факторов, способствующих нарушению экологического баланса в Ереване, особое значение приобретают работы по асфальтированию и укладке плитки на дорогах, пешеходных маршрутах и тропах. Центр города благоустраивается, появляются новые парки с фонтанами. Особо выделяются в этом плане и Кольцевой бульвар, и бульвар на ул. Италакан, который почти весь вымощен нарядной разноцветной плиткой. При мощении значительные площади почвы остаются под твердым покрытием, что в сочетании со скудной растительностью негативно сказывается как на жизнедеятельности обитающих в почве живых микроорганизмов, так и на остальных компонентах окружающей среды.

Почва имеет особое положение в природных ландшафтах, она является важнейшим элементом экосистемы. Органогенный слой способствует развитию культурного фитоценоза.

В процессе строительства автомобильных и пешеходных дорог почвы подвергаются физическому воздействию. Угнетение зеленых насаждений, механическое перемещение земляных масс в ходе строительства приводят к деградации почв.

Согласно первому экологическим закону Б. Коммонера, в природе все компоненты связаны друг с другом. Этот закон подчеркивает универсальную связь между явлениями и функциями природы. Изменение любого явления в природе напрямую влияет на другие компоненты.

Покрытие участков твердой плиткой приводит к ухудшению или полному блокированию интенсивности аэрации почвы, теплообмена, влагообмена и других важнейших процессов. Почва лишается доступа к растительным остаткам, нарушается круговорот химических элементов, в результате чего живые организмы и микроорганизмы, населяющие почву, погибают. Деградация почвы приводит к вымиранию растений, что влияет на сокращение зеленых насаждений.

Кроме того, при твердом покрытии грунтового слоя изменяется температура приземного слоя воздуха, потому что асфальтированная или плиточная поверхность быстро нагревается днем и быстро остывает ночью.

В таких условиях снижается относительная влажность воздуха, что затрудняет дыхание и негативно сказывается на здоровье людей. Это особенно ощутимо в летние месяцы, которые, по сути, являются самыми «туристоёмкими» для Еревана.

Основными организациями, ответственными за сбор и производство данных и информации о состоянии окружающей среды, управление ими и обеспечение доступа к ним в РА, являются Министерство окружающей среды с подчиненными ему природоохранными организациями и Статистический комитет РА. Центр гидрометеорологии и мониторинга РА регулярно осуществляет мониторинг и оценку качества атмосферного воздуха, а также других необходимых параметров. Концентрация пыли в воздухе, по данным Центра гидрометеорологии и мониторинга, с 05.06.2023 по 12.10.2023 превысила предельно допустимые нормы в некоторых административных районах Еревана в три раза [15]. Наиболее загрязненные – административные районы Центр, Арабкир, Норк-Мараш и Шенгавит г. Еревана. Неблагоприятная ситуация по концентрации пыли сохраняется во все летние месяцы.

Сухость воздуха, помимо усиленного градостроительства и вырубания зеленых массивов под новые здания, обусловлена также скудостью водных артерий в Ереване. Одна из двух водных артерий города р. Раздан протекает через центр города, пересекая его с севера на запад. Ущелье реки очень живописно, однако это затрудняет её влияние на систему Еревана в целом. Кроме того, в летние месяцы в связи с забором воды из речного бассейна р. Раздан для нужд орошения река сильно мелеет, что тоже сказывается на климате города.

Еще одна река Еревана, Гетар, протекает по центру города и впадает в р. Раздан у окраины. Гетар печально известна из-за своей чрезмерной загрязненности. Согласно годовому отчету Центра мониторинга воздействия на окружающую среду 2012 г., в результате исследования было выявлено превышение ионов нитрита в 8,4 раза, ионов аммония – в 8,5, ванадия – в 21, хрома – в 7, алюминия – в 3,3, меди – в 3, селена – в 2 раза [16]. Экологическое состояние реки Гетар было оценено как катастрофическое. Проблему очищения реки решили простым способом – ее заключили в бетонный тоннель.

В любом городе наличие водной артерии привлекает туристов. Протекающая вдоль Кольцевого бульвара река Гетар могла бы стать яркой достопримечательностью и местом для отдыха как жителей, так и гостей столицы. И все же река была загнана в бетонную трубу вместо разработки программ по очищению, а на проблемы, связанные с загрязнением реки, просто закрыли глаза в прямом и переносном смысле.

### Заключение

В Ереване для создания устойчивой городской среды и восстановления благоприятного климата необходимо проектировать зеленую инфраструктуру. Она позволит восстановить естественный гидрологический цикл и интегрировать экологические процессы в городскую среду. Возвращение природного облика реки, её открытое русло помогут преобразовывать и нейтрализовать загрязняющие вещества в воде за счет биоремедиации, воздействия солнечного света, воздуха и почвы.

Необходимо ужесточить контроль за землепользованием и природопользованием со стороны соответствующих административных структур. Нельзя сказать, что в РА отсутствует система контроля за состоянием земель и природных ресурсов. Приняты законы, нацеленные на предупреждение их деградации. Однако на практике фактически отсутствуют действенные меры по контролю за природопользованием.

Следование концепции устойчивого развития городов, которая предполагает концентрацию внимания и усилий не на архитектурных постройках, а на открытом городском пространстве, позволит воплотить в жизнь главную её идею – удовлетворение потребностей текущих поколений без ущерба для последующих [17]. Половина населения Земли живет в городах, и эта тенденция продолжает расти и увеличиваться с каждым годом. Высокая концентрация населения в городах делает их уязвимыми перед различного рода катаклизмами, будь то изменение климата, стихийные бедствия или иные метаморфозы. Тенденция к увеличению туристских потоков, с одной стороны, благоприятно сказывается на экономическом процветании регионов, однако бездумное эксплуатирование природных ресурсов создает предпосылки для нагнетания экологически неблагоприятной обстановки. Выработка новой мировоззренческой парадигмы в отношении городов как территорий с устойчивым развитием, которая предполагает гармонизацию отношений между человеком и природой, позволит избежать надвигающейся экологической катастрофы.

#### Список источников

1. Вардамян Р.Р., Суварян С.Р. Узнаваемость туристической дестинации // Учен. зап. ЕГУ. 2020. № 1. С. 73–77.
2. Вардамян Р.Р., Суварян С.Р. Роль социальных коммуникаций в современном обществе // Материалы междунар. конф., посвященной 100-летию ЕГУ. Ереван, 2018. С. 317–321.
3. Sustainable development. URL: <https://www.unwto.org/sustainable-development> (дата обращения: 20.02.2024).
4. Европейская экономическая комиссия. Комитет по экологической комиссии. URL: [https://unece.org/sites/default/files/2021-12/Sustainable\\_tourism.IP\\_3.ru\\_.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2021-12/Sustainable_tourism.IP_3.ru_.pdf) (дата обращения: 20.02.2024).
5. UNWTO Tourism Highlights 2016 Edition. URL: <https://www.e-unwto.org/doi/pdf/10.18111/9789284418145> (дата обращения: 20.02.2024).
6. UNWTO Tourism Highlights 2017 Edition. URL: <https://www.e-unwto.org/doi/pdf/10.18111/9789284419029> (дата обращения: 25.02.2024).
7. UNWTO Tourism Highlights 2018 Edition. URL: <https://www.e-unwto.org/doi/pdf/10.18111/9789284419876> (дата обращения: 25.02.2024).
8. International Tourism Highlights 2019 Edition. URL: <https://www.e-unwto.org/doi/pdf/10.18111/9789284421152> (дата обращения: 02.03.2024).
9. TOHOLOGY Tourism&Hospitality Индустрия. URL: <https://www.tohology.com/hospitality/industry/unwto-statistika-mezhdunarodnyh-poezdok/> (дата обращения: 02.03.2024).
10. World Tourism Barometer. 2022. Vol. 20, iss. 5. URL: [https://webunwto.s3.eu-west-1.amazonaws.com/s3fs-public/2022-09/UNWTO\\_Barom22\\_05\\_Sept\\_EXCERPT.pdf?VersionId=pYFmf7WmvpcfjUDuhNzbQ\\_G.4phQX79q](https://webunwto.s3.eu-west-1.amazonaws.com/s3fs-public/2022-09/UNWTO_Barom22_05_Sept_EXCERPT.pdf?VersionId=pYFmf7WmvpcfjUDuhNzbQ_G.4phQX79q) (дата обращения: 02.03.2024).
11. Конвенция об охране всемирного культурного и природного наследия. URL: [https://www.un.org/ru/documents/decl\\_conv/conventions/heritage.shtml](https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/heritage.shtml) (дата обращения: 02.03.2024).
12. Конференция ООН по окружающей среде и развитию, Рио-де-Жанейро, Бразилия, 3–14 июня 1992 г. URL: <https://www.un.org/ru/conferences/environment/rio1992> (дата обращения: 03.03.2024).
13. Меры по борьбе с изменением климата. Парижское соглашение. URL: <https://www.un.org/ru/climatechange/paris-agreement> (дата обращения: 03.03.2024).
14. Transport-related CO2 Emissions of the Tourism Sector. URL: <https://www.e-unwto.org/doi/pdf/10.18111/9789284416660> (дата обращения: 03.03.2024).
15. Մթնոլորտային օդի որակը Երևանում, 2024թ. URL: <http://meteo monitoring.am/posts/33> (дата обращения: 08.03.2024).
16. Երջակա միջավայրի աղտոտվածության մշտադիտարկում: URL: [https://armstat.am/file/article/eco\\_11\\_11.pdf](https://armstat.am/file/article/eco_11_11.pdf) (дата обращения: 08.03.2024).
17. Gehl J. Public Spaces for a changing public life // Topos. 2007. № 61. P. 16–22.

## References

1. Vardanyan R.R., Suvaryan S.R. Recognizability of a tourist destination. *Uchenye zapiski EGU = Scientific Notes of Yerevan State University*. 2020;(1):73-77. (In Russ.).
2. Vardanyan R.R., Suvaryan S.R. The role of social communications in modern society. *Materials of the international conference dedicated to the 100th anniversary of YSU*. Yerevan, 2018:317-321. (In Russ.).
3. *Sustainable development*. Available from: <https://www.unwto.org/sustainable-development> [Accessed 20th February 2024].
4. *The Economic Commission for Europe. Committee on the Environmental Commission*. Available from: [https://unece.org/sites/default/files/2021-12/Sustainable\\_tourism.IP\\_3.ru\\_.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2021-12/Sustainable_tourism.IP_3.ru_.pdf) [Accessed 20th February 2024]. (In Russ.).
5. *UNWTO Tourism Highlights 2016 Edition*. Available from: <https://www.e-unwto.org/doi/pdf/10.18111/9789284418145> [Accessed 20th February 2024].
6. *UNWTO Tourism Highlights 2017 Edition*. Available from: <https://www.e-unwto.org/doi/pdf/10.18111/9789284419029> [Accessed 25th February 2024].
7. *UNWTO Tourism Highlights 2018 Edition*. Available from: <https://www.e-unwto.org/doi/pdf/10.18111/9789284419876> [Accessed 25th February 2024].
8. *International Tourism Highlights 2019 Edition*. Available from: <https://www.e-unwto.org/doi/pdf/10.18111/9789284421152> [Accessed 2nd March 2024].
9. *TOHOLOGY Tourism&Hospitality. Industry*. Available from: <https://www.tohology.com/hospitality/industry/unwto-statistika-mezhdunarodnyh-poezdok/> [Accessed 2nd March 2024]. (In Russ.).
10. *World Tourism Barometer*. 2022;20(5). Available from: [https://webunwto.s3.eu-west-1.amazonaws.com/s3fs-public/2022-09/UNWTO\\_Barom22\\_05\\_Sept\\_EXCERPT.pdf?VersionId=pYFmf7WmvpfcjUDuhNzbQ\\_G.4phQX79q](https://webunwto.s3.eu-west-1.amazonaws.com/s3fs-public/2022-09/UNWTO_Barom22_05_Sept_EXCERPT.pdf?VersionId=pYFmf7WmvpfcjUDuhNzbQ_G.4phQX79q) [Accessed 2nd March 2024].
11. *Convention on the Protection of the World Cultural and Natural Heritage*. Available from: [https://www.un.org/ru/documents/decl\\_conv/conventions/heritage.shtml](https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/heritage.shtml) [Accessed 2nd March 2024].
12. *United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, Brazil, June 3-14, 1992*. Available from: <https://www.un.org/ru/conferences/environment/rio1992> [Accessed 3rd March 2024]. (In Russ.).
13. *Measures to combat climate change. The Paris Agreement*. Available from: <https://www.un.org/ru/climatechange/paris-agreement> [Accessed 3rd March 2024].
14. *Transport-related CO2 Emissions of the Tourism Sector*. Available from: <https://www.e-unwto.org/doi/pdf/10.18111/9789284416660> [Accessed 3rd March 2024].
15. *Atmospheric air quality in Yerevan, 2024*. Available from: <http://meteomonitoring.am/posts/33> [Accessed 8th March 2024]. (In Armen.).
16. *Environmental pollution monitoring*. Available from: [https://armstat.am/file/article/eco\\_11\\_11.pdf](https://armstat.am/file/article/eco_11_11.pdf) [Accessed 8th March 2024]. (In Armen.).
17. Gehl J. Public Spaces for a changing public life. *Topos*. 2007;(61):16-22.

### **Информация об авторах**

*Р.Р. Варданян – кандидат географических наук, ассистент, кафедра сервиса, геолого-географический факультет.*

*С.Р. Суварян – кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой сервиса, геолого-географический факультет.*

*В.Д. Андреасян – преподаватель, кафедра сервиса, геолого-географический факультет.*

### **Information about the authors**

*R.R. Vardanyan - Candidate of Science (Geography), Assistant, Department of Service, Faculty of Geology and Geography.*

*S.R. Suvaryan - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Head of the Department of Service, Faculty of Geology and Geography.*

*V.D. Andreasyan - Lecturer, Department of Service, Faculty of Geology and Geography.*

*Статья поступила в редакцию 24.06.2024; одобрена после рецензирования 10.08.2024; принята к публикации 16.10.2024.  
The article was submitted 24.06.2024; approved after reviewing 10.08.2024; accepted for publication 16.10.2024.*



Научная статья

УДК 502.171:551.4:355.469.34

doi: 10.18522/1026-2237-2024-4-2-11-19

## ТИПИЗАЦИЯ БЕРЕГОВ ВОЛГОГРАДСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА (ЛЕВЫЙ БЕРЕГ) НА ОСНОВЕ ДАННЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**Вадим Васильевич Глинка<sup>1</sup>, Владислав Владимирович Сапрыгин<sup>2</sup>,  
Ольга Васильевна Ивлиева<sup>3</sup>, Людмила Александровна Беспалова<sup>4</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>3, 4</sup> Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>1</sup>vadim-glinka@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5671-5740

<sup>2</sup>vv.saprygin@gmail.com

<sup>3</sup>ivlieva.o@mail.ru

<sup>4</sup>bespalowaliudmila@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-0245-7835

**Аннотация.** Типизация берегов осуществлялась путем определения их морфологических и морфометрических характеристик, что является важным параметром мониторинга водоохраных зон водных объектов. Работа выполнена на основе материалов, полученных в период экспедиции с 27 сентября по 4 октября 2023 г. С применением беспилотных летательных аппаратов (Phantom 4 Pro и Phantom 4 Advanced) осуществлялось зондирование берегов и водоохранной зоны водохранилища (фотографирование в надир). Для получения морфологических и морфометрических характеристик берегов (высота берега, уклон склона и др.) по ортофотопланам и цифровым моделям рельефа были построены поперечные профили берегов. Построение поперечных профилей для абразионных берегов каждого типа проводилось с интервалом, примерно равным 1000 км, где это было возможно и берега не заросли влаголюбивой растительностью. Результаты легли в основу создания банка данных типов берегов Волгоградского водохранилища. Проведена оценка современного состояния береговых процессов. Обследовано 179 км береговой линии на левом берегу водохранилища в пределах Среднеахтубинского и Быковского районов. На обследованном участке были выявлены следующие типы берегов: абразионно-обвальный – 12,1 % (21,75 км), абразионно-обвальный с волно-прибойными нишами – 4,7 % (8,45 км), абразионный (отмерший клиф) – 6,1 % (10,9 км), абразионный обвалью-осыпной – 11,6 % (20,87 км), абразионный с фестончатым расчленением – 0,5 % (0,85 км), аккумулятивный – 2,8 % (5,09 км), аккумулятивный (конус выноса оврагов и балок) – 0,6 % (1,14 км), нейтральный – 57,7 % (103,45 км), низкий берег затопления – 3,4 % (6,12 км), техногенный – 0,4 % (0,73 км).

**Ключевые слова:** Волгоградское водохранилище, водоохранная зона, мониторинг, беспилотный летательный аппарат, типы берегов, морфология, морфометрия, левый берег

**Для цитирования:** Глинка В.В., Сапрыгин В.В., Ивлиева О.В., Беспалова Л.А. Типизация берегов Волгоградского водохранилища (левый берег) на основе данных беспилотных летательных аппаратов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 4-2. С. 11–19.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

## TYPIFICATION OF VOLGOGRAD RESERVOIR COASTS (LEFT COAST) BASED ON DATA FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES

Vadim V. Glinka<sup>1</sup>, Vladislav V. Saprygin<sup>2</sup>, Olga V. Ivlieva<sup>3</sup>, Ludmila A. Bespalova<sup>4</sup>✉

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources,  
Rostov-on-Don, Russia

<sup>3, 4</sup> Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>1</sup>vadim-glinka@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5671-5740

<sup>2</sup>vv.saprygin@gmail.com

<sup>3</sup>ivlieva.o@mail.ru

<sup>4</sup>bespalowaludmila@yandex.ru✉, ORCID: 0000-0002-0245-7835

**Abstract.** Shoreline typification was conducted by determining their morphological and morphometric characteristics, which are important parameters for monitoring the water protection zone of water bodies. The work was carried out based on materials obtained during the expedition from September 27 to October 4, 2023. Using unmanned aerial vehicles (Phantom 4 Pro and Phantom 4 Advanced), shoreline and reservoir water protection zone probing (nadir photography) were performed. Cross-sectional profiles of the shores were constructed from orthophotomaps and digital elevation models to obtain morphological and morphometric characteristics of the shores (shoreline height, slope angle, etc.). Cross-sectional profiles for abrasion shorelines of each type were constructed at intervals approximately equal to 1000 km, where possible, and the shores were not overgrown with moisture-loving vegetation. All these data formed the basis for creating a database of shoreline types of the Volgograd Reservoir. An assessment of the current state of shoreline processes was conducted. A total of 179 km of shoreline on the left bank of the reservoir within the boundaries of the Sredneakhtubinsky and Bykovsky regions were surveyed. The following shoreline types were identified on the surveyed stretch: abrasion-cliff - 12.1 % (21.75 km), abrasion-cliff (with wave-cut niches) - 4.7 % (8.45 km), abrasion (dead cliff) - 6.1 % (10.9 km), abrasion-cliff-ialus - 11.6 % (20.87 km), abrasion with scalloped fragmentation - 0.5 % (0.85 km), accumulative - 2.8 % (5.09 km), accumulative (cone of gully and ravine erosion) - 0.6 % (1.14 km), neutral - 57.7 % (103.45 km), low floodplain - 3.4 % (6.12 km), anthropogenic - 0.4 % (0.73 km).

**Keywords:** Volgograd Reservoir, water protection zone, monitoring, unmanned aerial vehicle, shoreline types, morphology, morphometry, left coast

**For citation:** Glinka V.V., Saprygin V.V., Ivlieva O.V., Bespalova L.A. Typification of Volgograd Reservoir Coasts (Left Coast), Based on Data from Unmanned Aerial Vehicles. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(4-2):11-19. (In Russ.).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

### Введение

Типизация берегов, измерение их морфологических и морфометрических характеристик является одной из важных задач мониторинга водоохранных зон водных объектов. Использование материалов, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов (БЛА), значительно расширяет возможности определения непосредственно типов берегов и их характерных признаков с большей точностью.

Следует отметить принципиальное различие между правым и левым берегами водохранилища по геологическому строению и литологическому составу береговых склонов.

Правобережье сложено более древними и прочными, очень устойчивыми к размыву породами. Здесь представлены верхнемеловые породы (темно-серые и желтовато-серые опоки, черные плитчатые кремнистые глины с маломощным глауконитовым песчаником в основании, серые и темно-серые мергелистые глины) и породы палеогенового периода (опоки, слюдяные зеленовато-серые песчаники), также встречаются супеси, суглинки, пески и глины хвалынского и хазарского возраста [1, 2].

На левобережье надводные береговые уступы сложены относительно рыхлыми, слабоустойчивыми к размыву отложениями более молодого возраста. Оно расположено в пределах Прикаспийской синеклизы и характеризуется слабой расчлененностью. В литологическом составе преобладают в основном суглинки, пластинчатые трещиноватые глины, местами – супеси и слабоуплотненные или рыхлые пески (эолового и древнеаллювиального происхождения) [3–5].

### Материалы и методы исследования

Аэрофотосъемку проводили при помощи БЛА моделей Phantom 4 Pro и Phantom 4 Advanced с 27 сентября по 4 октября 2023 г. в Среднеахтубинском и Быковском районах на левом берегу Волгоградского водохранилища в границах его водоохранной зоны. Для построения цифровых моделей рельефа (ЦМР) и ортофотопланов полученные в ходе съемки в нади́р (с вертикальным положением объектива) аэрофотоснимки обрабатывали в фотограмметрическом программном обеспечении (ПО) Agisoft Metashape Professional. Типизацию берегов, построение поперечных профилей берегового уступа и создание схемы расположения выявленных характерных типов берегов в Среднеахтубинском и Быковском районах Волгоградского водохранилища проводили с использованием геоинформационных технологий для анализа построенных ЦМР и ортофотопланов. На момент наблюдений уровень воды в водохранилище колебался от 14,09 до 13,87 м (в среднем 14 м), что является ниже отметки нормального подпорного уровня (НПУ), который составляет 15 м [6, 7].

### Результаты и обсуждение

По результатам проведенных исследований была составлена схема (рис. 1) с характерными типами берегов района обследования. Согласно схеме, на обследованном участке были выявлены следующие типы берегов: абразионно-обвальный – 12,1 % (21,75 км), абразионно-обвальный с волно-прибойными нишами – 4,7 % (8,45 км), абразионный (отмерший клиф) – 6,1 % (10,9 км), абразионный обвально-осыпной – 11,6 % (20,87 км), абразионный с фестончатым расчленением – 0,5 % (0,85 км), аккумулятивный – 2,8 % (5,09 км), аккумулятивный (конус выноса оврагов и балок) – 0,6 % (1,14 км), нейтральный – 57,7 % (103,45 км), низкий берег затопления – 3,4 % (6,12 км), техногенный – 0,4 % (0,73 км). Общая протяженность обследованного участка 179,407 км (рис. 2). Доля типов берегов без учета нейтральных берегов, к которым относятся заливы и балки, представлена на рис. 3, их протяженность составляет 76 км.

*Морфологические и морфометрические особенности абразионно-обвальных берегов.* Абразионный-обвальный тип берега развивается под воздействием ветрового волнения. Большая площадь водохранилища способствует интенсивной волновой абразии. Характерными признаками абразионно-обвального берега являются крутой уступ, наличие следов обвала грунта береговых обрывов. Судя по полученным снимкам, можно сделать вывод, что для абразионно-обвальных берегов на левом берегу водохранилища характерно наличие и преобладание глин и суглинков в геологическом строении грунта, не исключено присутствие в строении толщи прослоев и линз песчаного состава, характерными признаками этого являются песчаные пляжи с шириной от 5 до 20 м. Нередко наблюдаются трещины на береговом уступе, что говорит о скором обрушении новых пород и активном абразионном процессе. Высота берегов варьируется от 2 до 6,5 м, в среднем 5 м. Типичные абразионно-обвальные берега наблюдаются возле с. Рахинка и далее на север до с. Новоникольского, а также возле с. Нижний Балыклей (рис. 4).

*Морфологические и морфометрические особенности абразионных обвально-осыпных берегов.* В геологическом строении принимают участие суглинки, глины, пески. Свое распространение они получили в районе Приволжской песчаной гряды, встречаются возле населенных пунктов: Новоникольское, Приморск, Луговая Пролейка, Верхний Балыклей.

Основными формами переработки берега на участке являются осыпи песчаноглинистых пород и глыбы песчаников и других твердых пород, скапливающихся у основания уступа. Ширина песчаных пляжей на момент наблюдений составляла от 2 до 30 м. Высота берегов варьируется от 2 до 11 м, в среднем 6,5 м.

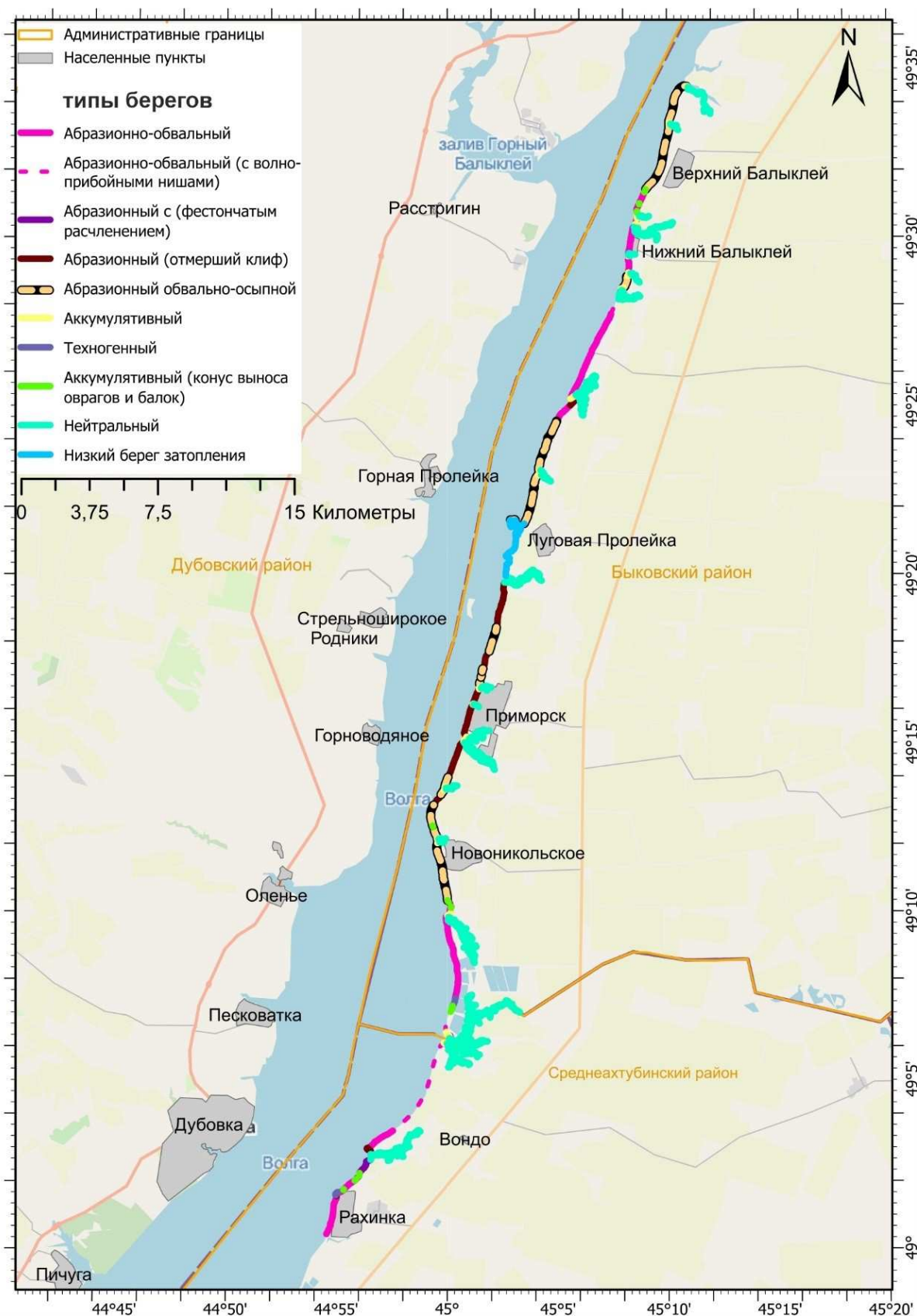


Рис. 1. Общая схема типов берегов Волгоградского водохранилища в Среднеакhtubинском и Быковском районах между населенными пунктами Рахинка и Верхний Бальклей / Fig. 1. General map of the types of coasts of the Volgograd Reservoir in the Sredneakhtubinsky and Bykovsky regions between the settlements of Rakhinka and Verkhniy Balykley



Рис. 2. Структура типов берегов Волгоградского водохранилища относительно протяженности береговой линии, % / Fig. 2. Structure of shore types of the Volgograd Reservoir relative to the length of the coastline, %



Рис. 3. Структура типов берегов Волгоградского водохранилища относительно протяженности береговой линии (без учета береговой линии в заливах и балках), % / Fig. 3. Structure of shore types of the Volgograd Reservoir relative to the length of the coastline (excluding the coastline in bays and rades), %





Рис. 4. Фотография абразионно-обвального берега / Fig. 4. Photograph of the abrasion-landslide coast

*Морфологические и морфометрические особенности абразионных берегов с отмершим клиффом.* К данному типу относятся берега абразионного типа, у подножия клифа которых густые заросли влаголюбивой растительности, а абразионные процессы находятся в стадии затухания, при подъёме уровня воды в водохранилище абразионные процессы снова могут активизироваться. Распространены берега данного типа возле с. Приморск. Весьма вероятно, что влаголюбивые растения были высажены искусственно, как один из способов берегозащитных мероприятий и снижения абразионных процессов (рис. 5). Расстояние до ближайших жилых построек от берегового уступа составляет 160 м.



Рис. 5. Фотография берега с отмершим клиффом / Fig. 5. Photo of a coast with a dead cliff



*Морфологические и морфометрические особенности аккумулятивных берегов и конусов выноса.* Аккумулятивные берега представляют собой аккумулятивные косы, пересыпи, образующиеся во входах в заливы и балки, чаще всего задернованы. Пересыпи в устьях заливов, образовавшиеся в результате вдольберегового транспорта наносов (побережье и отмель), формируются отколовшимися от основного массива берега породами. В гранулометрическом составе наносов преобладают галечно-гравийные фракции, песок различной крупности.

*Морфологические и морфометрические особенности низких берегов затопления.* Они представляют собой низкие берега высотой до 1 м, густо заросшие влаголюбивой растительностью, в зависимости от уровня воды в водохранилище подвержены заболачиванию. В плане геологического строения преимущественно состоят из песка. На левом берегу встречались единойды возле населенного пункта Луговая Пролейка (рис. 6).

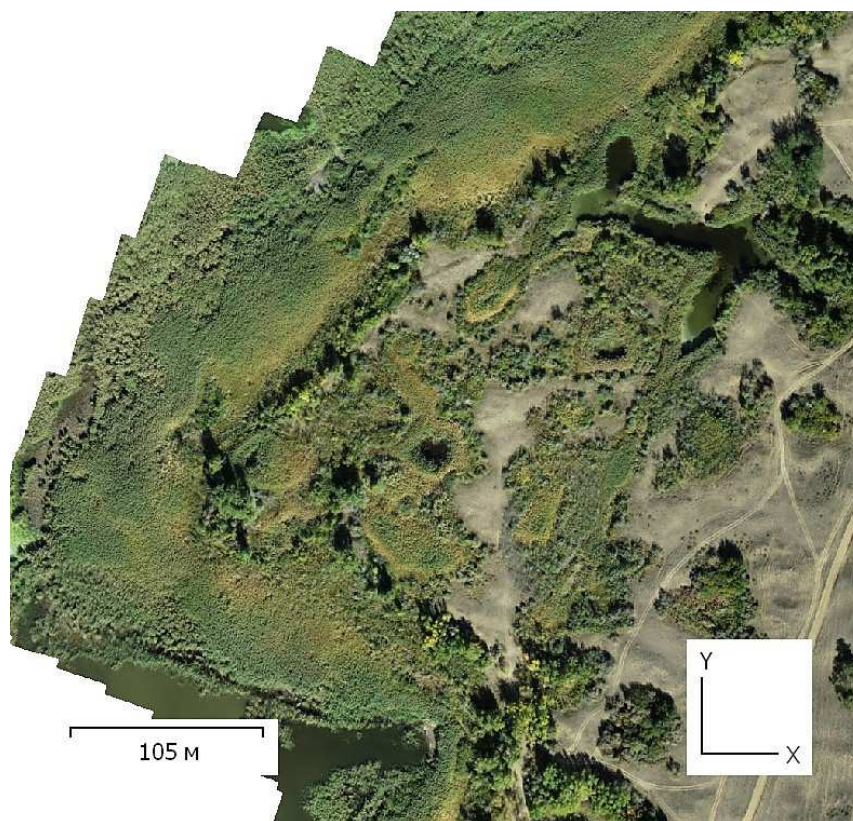


Рис. 6. Фрагмент ортофотоплана с низким берегом затопления  
/ Fig. 6. Fragment of an orthophotoplan with a low flood coast

*Морфологические и морфометрические особенности нейтральных берегов.* Наибольшее значение для берегов водохранилищ имеют нейтральные берега. На левом берегу водохранилища они приурочены к заливам и балкам, где берега практически не подвержены волновой активности и находятся в относительно стабильном состоянии. Из-за большой протяженности береговой линии в заливах и балках и ее извилистости в процентном соотношении являются наиболее распространенным типом и составляют 57,7 % всей береговой линии. Часто задернованы.

*Морфологические и морфометрические особенности техногенных берегов.* Техногенные берега на левом берегу водохранилища развиты слабо и встречаются дважды:

1. Выступ берегового обрыва, на котором расположен водозабор, укрепленный наброской каменного материала. Ширина берегозащитного сооружения 10–12 м, протяженность около 200 м. Берегозащитное сооружение препятствует размыву берега, в результате образуется мыс, почти на 130 м выступающий в акваторию водохранилища (рис. 7).

2. Берегозащитное сооружение в виде насыпи предположительно бетонных валунов площадью до 1,5 м<sup>2</sup>, расположенное возле базы разведения рыбы «Прибой». Ширина сооружения 2–5 м, протяженность 420 м.

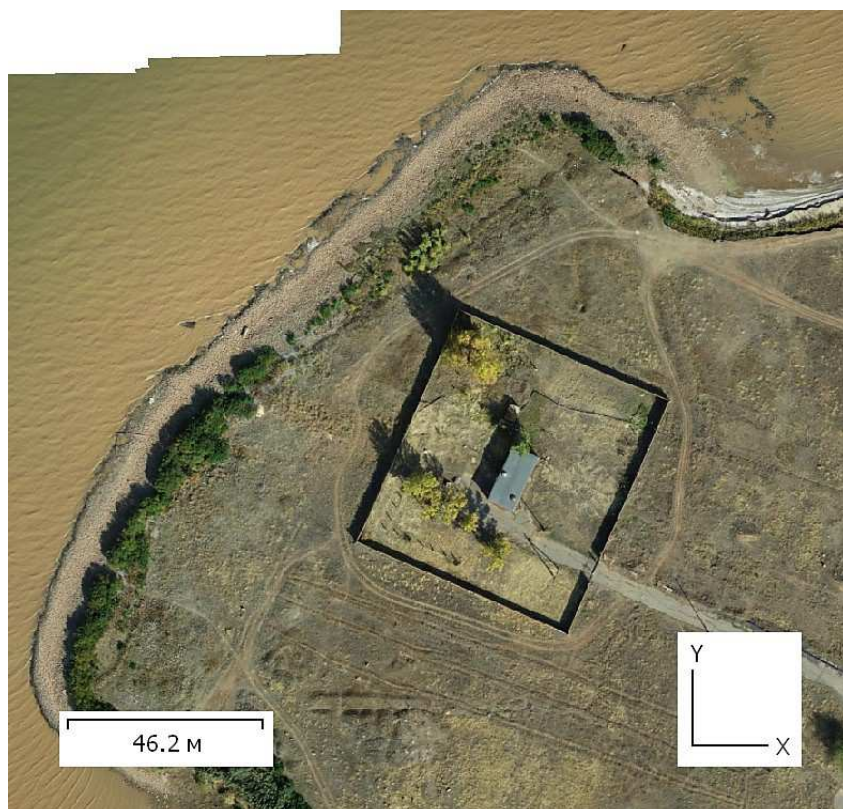


Рис. 7. Водозабор на защищённом участке берега / Fig. 7. Water intake on a protected section of the coast

### Заключение

На основе съемок с БЛА создана база данных в виде тематических электронных таблиц и ГИС-карт, отражающих современное состояние береговых процессов Волгоградского водохранилища.

Впервые проведена детальная типизация берегов на участке водохранилища и установлена их тесная связь с геологическим строением.

По результатам исследования наибольшее распространение получили нейтральные берега (57,7 % береговой линии), приуроченные к заливам и балкам, где не наблюдается волновой активности.

На остальной части обследованной береговой линии преобладает абразионный тип берега, характеризующийся активным проявлением опасных береговых процессов, таких как абразия, обвалы, осыпи. На этих берегах при наличии прибрежной инфраструктуры требуется проведение берегозащитных мероприятий.

### Список источников

1. Баранова М.С., Кочеткова А.И., Леонтьев Д.А., Брызгалина Е.С., Обьедкова О.А. Периоды отделения и классификация заливов Волгоградского водохранилища по первоначальному объему // Регион. гео-системы. 2020. Т. 44, № 2. С. 186–197. Doi: 10.18413/2712-7443-2020-44-2-186-197.
2. Баранова М.С., Кочеткова А.И., Филиппов О.В., Брызгалина Е.С., Фотина О.С., Михайлова Е.А., Курыкин А.А. Морфометрические характеристики устьевых абразионно-аккумулятивных пересыпей и заливов озерного участка Волгоградского водохранилища // Геогр. вестн. 2020. № 1 (52). С. 70–83. Doi: 10.17072/2079-7877-2020-1-70-83.
3. Филиппов О.В. Переформирование берегов Волгоградского водохранилища // Геоморфология. 2012. № 2. С. 34–43. Doi: 10.15356/0435-4281-2012-2-34-43.
4. Брылёв В.А., Овчарова А.Ю. Формирование побережья нижней части Волгоградского водохранилища // Геоморфология. 2016. № 2. С. 18–26. Doi: 10.15356/0435-4281-2016-2-18-26.



5. Шубин М.А., Юшин О.В. Мониторинг экологической безопасности прибрежных городских территорий Волгоградского водохранилища // Вестн. Волгоградского гос. архит.-строит. ун-та. Серия: Строительство и архитектура. 2016. № 44 (1). С. 119–129.

6. Ивлиева О.В., Беспалова Л.А., Глинка В.В., Сердюк А.В., Чмыхов А.А. Использование беспилотных летательных аппаратов для оценки интенсивности проявления опасных береговых процессов водоохранной зоны Цимлянского водохранилища // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2021. № 2 (210). С. 56–65. Doi: 10.18522/1026-2237-2021-2-56-65.

7. Сапрыгин В.В., Глинка В.В., Скрипка Г.И. Применение беспилотных летательных аппаратов и геоинформационных систем при осуществлении мониторинга берегов и водоохраных зон водохранилищ // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 2. С. 90–100. Doi: 10.35567/19994508-2023-2-6.

## References

1. Baranova M.S., Kochetkova A.I., Leont'ev D.A., Bryzgalina E.S., Ob'edkova O.A. Periods of separation and classification of the bays of the Volgograd reservoir by the primary volume. *Regional'nye geosistemy = Regional Geosystems*. 2020;44(2):186-197. Doi: 10.18413/2712-7443-2020-44-2-186-197. (In Russ.).

2. Baranova M.S., Kochetkova A.I., Filippov O.V., Bryzgalina E.S., Fotina O.S., Mikhailova E.A., Kurykin A.A. Morphometric characteristics of estuarial abrasion-accumulative jumpers and bays of the Volgograd reservoir lake area. *Geograf. vestn. = Geographical Bulletin*. 2020;(1):70-83. Doi: 10.17072/2079-7877-2020-1-70-83. (In Russ.).

3. Philippov O.V. Reshaping of the Volgograd reservoir coasts. *Geomorfologiya = Geomorphology*. 2012;(2):34-43. Doi: 10.15356/0435-4281-2012-2-34-43. (In Russ.).

4. Brylev V.A., Ovcharova A.Yu. Development of the Volgograd reservoir lower part coastline. *Geomorfologiya = Geomorphology*. 2016;(2):18-26. Doi: 10.15356/0435-4281-2016-2-18-26. (In Russ.).

5. Shubin M.A., Yushin O.V. Ecological security monitoring of the coastal city territories of the Volgograd reservoir. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura = Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*. 2016;(44):119-129. (In Russ.).

6. Ivlieva O.V., Bespalova L.A., Glinka V.V., Serdyuk L.V., Chmykhov A.A. The use of unmanned aerial vehicles to assess the intensity of manifestation of dangerous coastal processes in the water protection zone of the Tsimlyansk reservoir. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(2):56-65. Doi: 10.18522/1026-2237-2021-2-56-65. (In Russ.).

7. Saprygin V.V., Glinka V.V., Skripka G.I. Use of unmanned aerial vehicles and geoinformation systems in monitoring the coasts and protected water areas of reservoirs. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie = Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023;(2):90-100. Doi: 10.35567/19994508-2023-2-6. (In Russ.).

## Информация об авторах

В.В. Глинка – кандидат географических наук, ведущий специалист.

В.В. Сапрыгин – кандидат географических наук, старший научный сотрудник.

О.В. Ивлиева – доктор географических наук, доцент, профессор кафедры туризма, Институт наук о Земле, ЮФУ; ведущий научный сотрудник, РНИИКИиОВР.

Л.А. Беспалова – доктор географических наук, доцент, профессор кафедры океанологии, Институт наук о Земле, ЮФУ; ведущий научный сотрудник, РНИИКИиОВР.

## Information about the authors

V.V. Glinka – Candidate of Science (Geography), Leading Specialist.

V.V. Saprygin – Candidate of Science (Geography), Senior Researcher.

O.V. Ivlieva – Doctor of Science (Geography), Associate Professor, Professor of the Department of Tourism, Institute of Earth Sciences, SFedU; Leading Researcher, RRIIUPWR.

L.A. Bespalova – Doctor of Science (Geography), Associate Professor, Professor of the Department of Oceanology, Institute of Earth Sciences, SFedU; Leading Researcher, RRIIUPWR.

Статья поступила в редакцию 17.05.2024; одобрена после рецензирования 12.09.2024; принята к публикации 16.10.2024.  
The article was submitted 17.05.2024; approved after reviewing 12.09.2024; accepted for publication 16.10.2024.

Научная статья

УДК 502.171

doi: 10.18522/1026-2237-2024-4-2-20-30

## ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ СТОКА НЕКОТОРЫХ РЕК СОЧИНСКОГО ПРИЧЕРНОМОРЬЯ НА ПРИБРЕЖНУЮ МОРСКУЮ СРЕДУ В ЗОНАХ ИХ ПЛЮМОВ

Татьяна Львовна Горбунова<sup>1</sup>, Наталья Константиновна Гудкова<sup>2</sup>,  
Наталья Ивановна Рубанова<sup>3</sup>✉

<sup>1, 2, 3</sup> Филиал Института природно-технических систем в г. Сочи, Сочи, Россия

<sup>1</sup> tatianashaw@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3699-7159

<sup>2</sup> n.k.gud@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-3299-7701

<sup>3</sup> lej06@yandex.ru ✉, ORCID: 0000-0001-6084-6233

**Аннотация.** Проводится оценка влияния качества воды некоторых рек Сочинского Причерноморья на экологическую безопасность и состояние прибрежной полосы Черного моря. Актуальность исследования обусловлена отсутствием единого методического подхода к определению параметров оценки экологического состояния водных объектов прибрежной полосы Черного моря. Рассматривается единая система река – море с точки зрения комплексного мониторинга качества природных вод. Исследование базируется на биологических методах (биотестирование, биоиндикация) оценки состояния биологических сообществ и процессов в сочетании с анализом геологических аспектов. Это позволяет детально изучить влияние различных факторов на экологическую безопасность морской среды. Выявлено, что наиболее токсичными свойствами обладает морская среда в зонах поступления стоков малых рек, испытывающих значительное комплексное воздействие полигонов твердых коммунальных отходов и промышленных предприятий, расположенных на их водосборной площади. В морских плюмах рек, имеющих важное водохозяйственное, рекреационное и рыбохозяйственное значение для региона, вода менее токсична вследствие значительного разбавления. Таким образом, сток малых рек может оказывать сопоставимое, негативное воздействие на качество морской среды и состояние прибрежных биоценозов. Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых подходов к оценке и мониторингу экологической безопасности прибрежной морской среды, которые должны базироваться на концепции единства экологической системы в контексте взаимозависимостей при переносе загрязняющих и биогенных веществ между качественно отличающимися средами и связанными с ними гидробиоценозами речных вод и морской прибрежной зоны.

**Ключевые слова:** рекреационное водопользование, геологические процессы, система река – море, малые и средние реки, мониторинг водной среды, биотестирование, биоиндикация

**Для цитирования:** Горбунова Т.Л., Гудкова Н.К., Рубанова Н.И. Оценка воздействия стока некоторых рек Сочинского Причерноморья на прибрежную морскую среду в зонах их плюмов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 4-2. С. 20–30.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания Института природно-технических систем по теме «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан – атмосфера и антропогенного воздействия» (№ госрегистрации 121122300072-3).

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

## ASSESSMENT OF THE IMPACT OF SOME RIVERS OF THE BLACK SEA REGION ON THE COASTAL MARINE ENVIRONMENT IN THEIR PLUME ZONES

**Tatiana L. Gorbunova<sup>1</sup>, Natalia K. Gudkova<sup>2</sup>, Natalia I. Rubanova<sup>3</sup>**

<sup>1, 2, 3</sup> Branch of the Institute of Natural and Technical Systems in the Sochi, Sochi, Russia

<sup>1</sup> tatianashaw@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3699-7159

<sup>2</sup> n.k.gud@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-3299-7701

<sup>3</sup> lej06@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-6084-6233

**Abstract.** The paper assesses the impact of water quality of some rivers located within the Black Sea coastal zone in the Sochi area on the ecological security and status of the Black Sea coastal line. The relevance of the study is determined by the lack of a unified methodological approach to establishing parameters for assessing the ecological condition of water bodies within the Black Sea coastal area. The study is the first to consider a unified river-sea system in the context of integrated monitoring of natural water quality. The research is based on biological methods (biotesting, bioindication) to evaluate the state of biological communities and processes in combination with the analysis of geological aspects. This allows a detailed study of the influence of various factors on the marine environment ecological safety. It was revealed that the marine environment has the highest levels of toxicity in the inflow zones of small rivers, which are subject to significant complex impacts from municipal solid waste landfills and industrial enterprises located in their catchment areas. In the marine plumes of rivers classified as medium, which are important for water management, recreation and fisheries in the region, seawater has a lower toxic effect as a result of significant dilution. Thus, small rivers inflows can cause similar negative impacts on the quality of the marine environment and the status of coastal biocenoses as runoff from larger watercourses. The study results can contribute to the development of new approaches for the assessment and monitoring of the environmental security of the coastal marine environment, based on the concept of the ecological system integrity in the context of interdependencies associated with the pollutants and nutrients transfer between qualitatively different environments and associated with them river and coastal marine hydrobiocenoses.

**Keywords:** water demand for recreational purposes, geological processes, river-sea system, small and medium-sized rivers, aquatic environment monitoring, biotesting, bioindication

**For citation:** Gorbunova T.L., Gudkova N.K., Rubanova N.I. Assessment of the Impact of Some Rivers of the Black Sea Region on the Coastal Marine Environment in Their Plume Zones. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(4-2):20-30. (In Russ.).

**Acknowledgments:** the work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Natural and Technical Systems on the topic "Fundamental and applied research into the patterns and mechanisms of formation of regional changes in the natural environment and climate under the influence of global processes in the ocean-atmosphere system and anthropogenic impact" (state registration number 121122300072-3).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

### Введение

Постоянно возрастающая нагрузка и изменение качества водной среды рек Сочинского Причерноморья, особенно в устьевых зонах [1–4], обуславливают необходимость проведения оценки их воздействия на экологическое состояние и безопасность туристского природопользования прибрежной полосы Черного моря – главного природного ресурса города-курорта Сочи и федеральной территории «Сириус». Актуальность проводимого исследования определяется тем, что в настоящее время не разработан единый методический подход к определению параметров оценки экологического состояния водных объектов прибрежной полосы Черного моря. В данной работе предлагается системный подход, основанный на биологических методах, так как именно он позволяет оценить суммарное воздействие факторов влияния, а не отдельные параметры водной среды. Обычно влияющих факторов гораздо больше, чем можно выявить с помощью физико-химического анализа даже самого современного уровня, а именно на таком подходе основан в настоящее время фоновый мониторинг службы Росгидромета. Только 13 территориальных

субъектов нашей страны включают биологическую оценку в систему рутинного фонового мониторинга, и исследуемый регион не входит в их число. Однако, учитывая разнообразие природных ландшафтов и климатических зон, обусловленных высотной поясностью (от субтропиков на побережье до альпийских лугов и скальных участков с круглогодичными снежниками в горах), а также принимая во внимание наличие активных геологических процессов (в том числе и опасных) и естественных геологических аномалий, именно на территории Сочинского Причерноморья необходимо применение системного подхода к организации мониторинга природных вод с использованием биологических методов. Условия исследуемого региона существенно отличаются от условий южной и средней полосы Европы, для которых были разработаны (и утверждены службой Росгидромета) применяемые в нашей стране методики оценки и мониторинга состояния водной среды. Поэтому и возникла необходимость, на наш взгляд, разработки и апробирования системы биологических индикаторов для исследуемого региона.

Система комплексного мониторинга водной среды в подобных районах не может считаться полной и исчерпывающей, если анализ воздействия загрязненного речного стока на развитие морских биологических сообществ не является ее составной частью. В работе рассмотрен подход анализа единой системы река – море с точки зрения комплексного мониторинга качества природных вод. Система река – море является областью маргинального фильтра и представляет собой своеобразную ловушку осадочного материала, обусловленного природными и антропогенными факторами, по мере его продвижения от наземных территорий в морские акватории. Именно в этой зоне осаждается до 90–95 % взвешенных веществ и от 5 до 80 % различных химических примесей и их растворенных форм.

До недавнего времени основное внимание исследователей было сосредоточено на процессах, происходящих в местах впадения в море крупных рек. В то же время малые водотоки могут играть значительную роль в формировании гидрохимического режима и переносе вещества в прибрежной зоне [5]. Малые и средние речные плюмы могут оказывать существенное воздействие на биологическую продуктивность, рыболовство, качество морской среды, рельеф берега и дна, а также гидротехническое строительство в региональном масштабе [6].

### Материалы, объекты и методы исследования

Исследовались реки, их бассейны и участки прибрежной полосы Черного моря в зонах их стока, разделенные авторами на две группы. Первая – это водотоки, имеющие важное водохозяйственное, рекреационное (источники питьевой воды для города-курорта, места расположения курортных объектов) и рыбохозяйственное (места нереста ценных видов рыб, включая кумжу) значение: реки Мзымта и Сочи. Ко второй группе отнесены реки Битха и Херота, относительно малые водные объекты, испытывающие значительное комплексное воздействие полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО) и предприятий промышленной зоны, расположенных на их водосборной площади [7]. Эти водотоки представляют собой потенциальную опасность для экологии прибрежной морской полосы, где расположены пляжи оздоровительных и рекреационных объектов курорта. В качестве фонового участка использовалась станция в пос. Головинка (Лазаревский район г. Сочи), так как эта локация находится вдали от значительных загрязнителей водной среды (рис. 1).

Для биотестирования качества морской среды в прибрежной зоне Черного моря пробы воды и биоты отбирались на станциях в зонах стока четырех исследуемых рек с волнорезов (вода и мидии) и камней (мидии) на расстоянии 30–50 м от берега на горизонте 30–70 см от поверхности воды. Пробы морской воды для контрольных опытов были отобраны на траверзе пос. Головинка в 3 км от берега. С целью биоиндикации исследовалась естественная популяция черноморской мидии на волнорезах и камнях на расстоянии 10–50 м от берега. Площадь отбора мидий с субстрата 25×25 см.

Токсикологические эксперименты с морской водой проводились в течение двух лет. В летний период (с апреля по октябрь, при температуре морской воды от 22 до 26 °С) пробы отбирались не менее трех раз, а в зимний, когда температура морской воды составляла 7–9 °С, – один раз в течение сезона. Было отобрано и проанализировано 32 пробы за весь период исследования.

Пробы как биологического материала, так и прибрежной морской воды отбирались в условиях отсутствия волнения моря свыше 2 баллов и обильных осадков с целью избежать экстремального воздействия речного стока, характерного для паводков.



ГМ-1 – пос. Головинка, фоновый участок; БМ-2 – впадение р. Битха; ХМ-4 – впадение р. Херота;  
СМ-3 – впадение р. Сочи; ММ-5 – впадение р. Мзымта

Рис. 1. Месторасположение станций отбора проб / Fig. 1. Location of sampling stations

Для биотестирования морской воды в качестве биоиндикатора был выбран представитель первичного звена водных экосистем – одноклеточная диатомовая водоросль *Phaeodactylum tricorutum* Bohlin [8, 9], выделенная из планктона Черного моря и полученная для проведения данных исследований из коллекции культур отдела экологической физиологии водорослей Института биологии южных морей РАН.

Выбор микроводорослей в качестве основного биомаркера объясняется тем, что эти организмы относятся к автотрофным, являются представителями первичного звена трофических цепей водных биоценозов: во-первых, способны демонстрировать реакцию на содержание в водной среде токсичных загрязнителей; а во-вторых, прогноз о флуктуации их численности может служить косвенным индикатором развития следующих звеньев трофической цепи, для которых микроводоросли служат кормовой базой. Одноклеточные водоросли демонстрируют реакцию не только на токсиканты, вызывающие их гибель или ингибирование прироста численности клеток, но и на вещества, которые в определенных концентрациях стимулируют рост их численности. К таким загрязнителям могут относиться микроколичества фенолов, образующихся в процессе декомпозиции органики, или малые дозы некоторых металлов (железо, медь и др.), выносимые в морскую среду с загрязненными речными и ливневыми стоками.

Биотестирование проводилось в трех повторностях, в каждой из них выполнялось три подсчета [10]. Водоросли для биотестирования выращивались в среде Гольдберга в модификации Кабановой. Морская вода перед биотестированием очищалась от взвеси путем фильтрации через мембранный фильтр Millipore с диаметром пор 0,3 мкм. Культура *P. tricorutum* в стадии логарифмического роста помещалась в колбы емкостью 100 мл (10 мл суспензии водорослей на 100 мл тестируемой воды).

Ни в одной тестируемой в ходе данного исследования пробе не было отмечено достоверных отклонений от контроля в острых экспериментах (24 ч). Наличие подострой токсичности среды было определено за 72 ч, а хроническая токсичность – за период 7 сут. Клетки микроводорослей просчитывались ежедневно в камере Горяева, после чего рассчитывали коэффициент прироста/ингибирования численности клеток. Критерием токсичности вод было отклонение от контроля значения коэффициента прироста численности на 25 % и выше. Достоверность рассчитывали по критерию Стьюдента для  $n = 9, p = 0,05$ .

Для биоиндикации состояния морской среды использовалась также оценка морфометрических признаков черноморской мидии *Mytilus Galloprovincialis* Lam. Они имеют адаптивное значение, поэтому являются удобными маркерами при оценке состояния окружающей водной среды в условиях техногенного пресса [11, 12]. Комплексное действие факторов влияет как на процесс роста раковины мидии в длину, так и на её увеличение в двух других основных измерениях – в ширину и высоту.

Измерения морфометрических параметров раковин мидий ( $L$  – длина раковины;  $H$  – толщина/высота раковины;  $D$  – ширина/выпуклость) производились в соответствии с методом, предложенным В.А. Дехтой [13, 14]. Для определения формы раковины использовались индексы отношений: высота створки к её длине  $H/L$  (вытянутость, или относительная высота) и ширина к длине  $D/L$  (выпуклость, или сагитальная кривизна).

### Характер природопользования в зонах впадения исследуемых рек в Черное море

**Фоновая станция.** На территории курортного поселка Головинка нет объектов, оказывающих значительное антропогенное воздействие на состояние морской среды. Береговая линия исследуемой территории относительно ровная, крупные бухты и мысы отсутствуют. Внизу берегового обрыва расположена горизонтальная полка от 16 до 35 м шириной, по которой проходит железная дорога. Пляжи характеризуются песчано-галечной полосой, опускающейся на глубину 0,5–2 м. Донный субстрат в основном песчаный с отдельными выходами образующих скальных пород. Преобладают волнения западных румбов, вследствие чего для донных и береговых наносов характерна общая направленность перемещения в виде потока на юго-восток.

Следует отметить, что морские берега Лазаревского района, несмотря на свою довольно большую протяженность (105 км) и происходящее в прибрежной части все более интенсивное развитие рекреационно-туристической индустрии, не включены в систему государственного фонового мониторинга морской среды, осуществляемого лабораторией Специализированного центра гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды Черного и Азовского морей.

В устье р. Мзымта был сооружен прибрежный кластер спортивных и сопутствующих объектов XXII Олимпийских зимних игр 2014 г. Ныне на этом участке расположена федеральная территория «Сириус». Интенсивное строительство и дальнейшее развитие олимпийских и туристских объектов, а также возобновление выборки строительного материала из русла р. Мзымта стали причиной того, что отступление береговой линии в данном районе приобрело катастрофический характер. Сток наносов в береговую зону фактически прекратился, а крупноглыбовый материал был перемещен на подводный склон. Кроме того, сооружение грузопассажирского терминала порта Сочи «Имеретинский» при сложном рельефе дна нарушило естественный ход береговых процессов в дельте реки. Оградительные молы порта полностью блокировали вдольбереговое перемещение галечных наносов [15]. Такие изменения ландшафта, гидрологических и геологических характеристик, а также характера и интенсивности природопользования угрожают не только сохранности олимпийских и туристских объектов, но и экологическому здоровью прибрежной полосы Черного моря, на которую оказывается беспрецедентная антропогенная нагрузка.

**Устьевой участок р. Сочи.** Нарушения природного баланса прибрежной зоны Черного моря в исследуемой местности связаны с антропогенным изменением русла реки и его зарегулированием берегоукрепительными железобетонными стенами. Это является одной из причин снижения объемов транспортируемых стоком реки наносов и нарушения естественного режима накопления седиментов на шельфе. Кроме того, это способствует росту объема выносимой речным потоком растительной органики, что сопровождается развитием эвтрофикации в устье реки и загрязнением прибрежных вод Черного моря минеральными биогенными веществами, что может привести к изменению морской экосистемы [4].

Место впадения р. Сочи в Черное море находится практически в центре города-курорта Сочи и, являясь одним из наиболее популярных мест отдыха, несет огромную антропогенную нагрузку в летний курортный сезон (май – сентябрь). Рядом находится морской вокзал, дорога с интенсивным движением, множество объектов торговли, общественного питания и курортно-рекреационного назначения [1]. Распресненная зона моря, обусловленная стоком р. Сочи, наблюдается у морского вокзала города-курорта. Она характеризуется сравнительно высокой мутностью, что объясняется негативным влиянием на качество речной воды ливневого стока и техногенного воздействия.

**Устьевая зона р. Херота** проходит через густонаселенный микрорайон города и расположена вблизи нескольких здравниц курорта. В непосредственной близости от нее пролегал автомагистраль федерального значения и железная дорога, которые усиливают антропогенную нагрузку. Русло реки на устьевом участке зарегулировано в бетонный коллектор, что препятствует естественным процессам выноса твердого стока и биологической трансформации загрязняющих веществ.

Воздействие стока р. Битха на гидрохимическую структуру прибрежных вод Черного моря отслеживается отчетливо, несмотря на малые размеры водотока. Река впадает в море в 200 м от

пляжа санатория «Белые ночи», расположенного в Лазаревском районе. Ее плюм имеет стойкую ярко-коричневую окраску и резкий запах органики, что, по результатам исследования авторов, обусловлено влиянием на качество вод реки стоков полигона ТКО [3, 16]. Плюм р. Битха обычно имеет вытянутую форму и простирается вдоль берега в юго-восточном направлении на 1 км. Его толщина составляет около 3,5 м, а аномалия солености в плюме – 12 PSU. Река выносит в море значительный объем растворенного органического вещества [5]. Пляжная полоса исследуемого участка в основном галечная, сравнительно узкая. Скальные породы прибрежной полосы представлены чередованием свит, склонных к оползанию и обвалам.

### Оценка токсичности морской воды в прибрежной полосе Черного моря в местах впадения рек

Результаты биотестирования морской воды с использованием одноклеточной планктонной диатомовой водоросли *Phaeodactylum tricornutum* отражены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

#### Результаты биотестирования морской воды в зонах речного стока на побережье Сочинского Причерноморья / Results of biotesting of seawater in river runoff zones on the coast of the Sochi Black Sea region

Участки Черного моря, прилегающие к стоку рек	Месяц отбора проб	Критерии токсичности			
		Процент отклонения от контроля за 3 сут	Критерий достоверности Стьюдента ( $t_d$ ) ( $t_{st} = 2,12$ )	Процент отклонения от контроля за 7 сут	Критерий достоверности Стьюдента ( $t_d$ ) ( $t_{st} = 2,12$ )
Мзымта	Июнь	4,2	0,97	37,68	-2,89
	Июль	19,63	-2,16	<b>42,61</b>	-3,14
	Август	<b>33,3</b>	-2,7	22,63	-2,09
	Сентябрь	11,36	-1,64	26,16	-2,17
	Февраль	<b>34,78</b>	3,02	30,16	-2,71
Сочи	Июнь	22,67	-2,1	52,15	-12,77
	Июль	22,47	-2,13	50,53	-11,08
	Август	24,19	-2,19	44,98	-6,73
	Сентябрь	<b>37,11</b>	-3,06	<b>54,27</b>	-17,23
	Февраль	16,74	1,23	8,38	0,62
Херота	Июнь	<b>31,18</b>	-6,13	<b>72,12</b>	-14,23
	Июль	19,75	2,11	55,17	5,29
	Август	21,83	2,65	55,97	7,05
	Сентябрь	<b>47,52</b>	-5,4	54,04	-5,89
	Февраль	23,04	3,14	<b>61,52</b>	12,36
Битха	Июнь	19,34	-2,01	55,34	-5,58
	Июль	<b>38,9</b>	-5,99	56,3	-7,02
	Август	<b>33,32</b>	-4,53	<b>61,61</b>	-8,67
	Сентябрь	<b>31,48</b>	-5,09	<b>62,62</b>	-11,43
	Февраль	26,94	-2,64	32,9	-3,57

В экспериментах, определяющих подострую токсичность морской воды, достоверного ингибирующего эффекта обнаружено не было.

Выраженный эффект стимуляции роста численности водорослей по сравнению с контролем обнаружен в пробах летних месяцев и сентября (табл. 1, выделено жирным шрифтом). Это те периоды, когда оказывается максимальная рекреационная нагрузка на водные объекты Сочинского Причерноморья и их бассейны, а объем естественного стока рек уменьшается из-за засухи и значительного (санкционированного и несанкционированного) забора воды, не обеспечивая достаточного разбавления попадающих в воду загрязняющих стоков.

Кроме того, достоверные отклонения от контроля с эффектом стимуляции роста численности наблюдались в зимний период в зонах сброса в прибрежную полосу Черного моря рек Мзымта и Херота, что, по нашей гипотезе, объясняется обильными ливневыми стоками с участков строительства (Мзымта) и тела полигона ТКО (Херота), содержащими соответствующие ингредиенты



(соединения металлов, характерные для локальных геохимических аномалий бассейна р. Мзымта [17], остатки перегнившей в теле полигона органики и пр.).

Сезонные изменения показателей отклонения роста численности водорослей от контроля в хроническом эксперименте (7 сут) отражены на рис. 2.

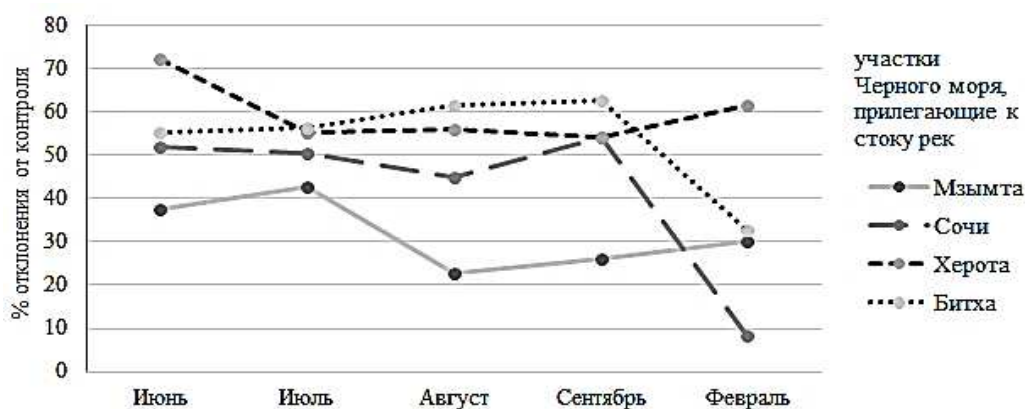


Рис. 2. Сезонные изменения показателей отклонения коэффициентов прироста численности водорослей от контроля за 7 сут в прибрежных водах Черного моря в зонах стока исследуемых рек / Fig. 2. Seasonal changes in indicators of deviation of algae growth coefficients from control over 7 days in the coastal waters of the Black Sea in the runoff zones of the studied rivers

Установлено, что для участков Черного моря в районе рек второй группы (Битха и Херота) отклонения от контроля по росту численности водорослей наблюдались во всех пробах. Однако в зоне стока р. Херота самыми высокими отклонения от контроля были в июне и феврале, а в зоне стока р. Битха – в августе и сентябре. В зонах стока рек Мзымта и Сочи ухудшение ситуации наблюдается в летние месяцы (разгар курортного сезона), а в осенний и зимний периоды воздействие токсикантов на водоросли выражено слабее. Учитывая, что динамика показателей зависит не только от состава поступающих в прибрежную полосу моря загрязняющих веществ (выносимые реками, смывы с прилегающей территории), но и от гидрологического режима водотоков, а следовательно, и степени разбавления поступающих в них загрязненных стоков различного характера, была выдвинута гипотеза, что улучшение экологических условий прибрежных вод моря в зоне впадения крупных рек объясняется в значительной степени режимом их водности. Такая динамика описывается для рек Мзымта и Сочи по результатам гидрохимического анализа их вод [18, 19]. Для уточнения данного предположения необходимо продолжить наблюдения.

Изучение морфологических характеристик черноморской мидии *Mytilus Galloprovincialis* Lam. на исследуемых территориях использовалось как дополнительный биоиндикатор в целях дополнения результатов биотестирования морской воды с использованием микроводорослей.

Для прибрежной полосы Сочинского Причерноморья характерен твердый субстрат (природный: валуны, большие камни; искусственный: буны и волнорезы), благоприятный для обитания мидий, которые являются организмами-обрастателями. Мидийные банки были типичны для биоценозов прибрежных зон до того, как в регионе началось интенсивное рекреационное и жилищное строительство и отсыпка пляжей (в середине 2000-х гг.). Популяции мидий были частично «захоронены» в пляжных зонах из-за смены субстрата и критического воздействия взвешенных веществ. Изменение состава стока рек, негативно влияющего на свойства воды в зонах речных плумов, обусловлено как физическими факторами (наличие взвешенных и коллоидных частиц), так и трансформацией элементного состава вод, вызванной техногенными причинами: разработкой горных участков под строительство, карьеры, дороги, а также возникновением и активизацией оползней, селей, обвалов, связанных с этими разработками.

В ходе исследования наиболее крупноразмерные особи были обнаружены на фоновом участке в прибрежной зоне пос. Головинка (табл. 2). Однако в зоне стока р. Битха у моллюсков наблюдалось превышение, по сравнению с фоновой станцией, значений параметров их ширины и толщины в среднем. При этом средняя длина раковин была ниже, чем у фоновых гидробионтов. Предположительно, этот феномен возник как адаптационный механизм к неблагоприятным условиям морской среды. На участке прибрежной полосы Черного моря в месте стока р. Херота поселений мидий обнаружено не было.



Таблица 2 / Table 2

**Значения морфологических параметров раковины черноморской мидии и их соотношений в зонах исследуемых речных стоков / Values of the morphological parameters of the Black Sea mussel shell and their relationships in the areas of the studied river flows**

Параметр	Длина раковины $L$ , см	Ширина раковины $D$ , см	Толщина раковины $H$ , см	Индекс $D/L$	Индекс $H/L$
Прибрежная зона Черного моря, пос. Головинка (фон)					
Среднее значение	4,07±0,34	2,23±0,18	1,81±0,13	0,56±0,01	0,46±0,01
max	7,30	4,10	3,00	0,74	0,57
min	2,40	1,30	1,00	0,21	0,06
Стандартное отклонение $\delta$	1,86	0,96	0,71	0,06	0,06
Прибрежная зона Черного моря, зона стока р. Сочи					
Среднее значение	3,61±0,17	2,25±0,10	2,4±0,09	0,62±0,04	0,67±0,01
max	4,7	3,4	2		
min	1,2	0,6	0,5		
Стандартное отклонение $\delta$	0,91	0,51	0,3	0,21	0,06
Прибрежная зона Черного моря, зона стока р. Мзымта					
Среднее значение	3,12±0,57	2,01±0,37	1,62±0,32	0,65±0,12	0,56±0,10
max	3,50	2,70	2,50	0,87	0,80
min	2,50	1,50	1,30	0,50	0,43
Стандартное отклонение $\delta$	0,23	0,27	0,34	0,08	0,09
Прибрежная зона Черного моря, зона стока р. Битха					
Среднее значение	4,26±0,17	2,90±0,15	2,59±0,047	0,68±0,12	0,62±0,11
max	4,7	3,4	2		
min	1,2	0,6	0,5		
Стандартное отклонение $\delta$	0,91	0,51	0,3	0,21	0,06

Принимая во внимание, что увеличение значений индексов ширины и высоты (табл. 2), как правило, связано с неблагоприятными для моллюсков изменениями морской среды, достоверные отличия исследуемых мидий в зонах стока рек от мидий фонового участка (при  $n=30$ ,  $p=0,05$ ) указывают на изменение экологических условий в местах расположения этих популяций в худшую сторону.

Кроме того, в выборках моллюсков с участков поступления стоков рек Битха и Мзымта обнаружен значительный процент мидий (56,7 и 53,3 % соответственно) с ребристой поверхностью раковины – так называемым эффектом стиральной доски, который обычно проявляется у животных, растущих в неблагоприятных условиях, и связан, так же как и форма раковины моллюска, с необходимостью плотно закрывать створки в присутствии повторяющегося или продолжающегося загрязнения (преимущественно такими токсикантами, как нефтепродукты, соли металлов, пестициды и др.). На фоновом участке моллюски с ребристой поверхностью раковины составляли 7 %, в зоне стока р. Сочи – 23,3 %.

Таким образом, планктонные микроводоросли являются индикатором качества воды на момент отбора проб и только косвенно, на основании данных хронических экспериментов, могут предоставить информацию об изменении характера воздействия химических примесей на гидробионты в результате их естественной трансформации в водной среде. Поэтому мы можем наблюдать флуктуацию значений параметров токсичности или стимуляции роста численности водорослей по сравнению с контролем в зависимости от времени отбора проб и изменяющейся антропогенной нагрузки на прибрежные морские воды. С другой стороны, двустворчатые моллюски – биоиндикаторы более продолжительного периода, а изменения их экологических или морфометрических признаков отражают долговременное, хроническое влияние, не обусловленное единичными, случайными сбросами загрязнителей. Использование обоих индикаторов в системе позволяет получить более детальное представление о процессах, происходящих в прибрежных морских биоценозах, и их зависимости от антропогенных факторов различной природы [20].

## Заключение

В местах впадения в Черное море рек первой группы – Мзымта и Сочи – морская вода менее токсична. К этой группе авторы относят также реки Хоста, Псеуапсе, Шахе, Аше, которые по своим гидрологическим характеристикам классифицируются как средние и имеют первостепенное значение для водоснабжения населения, туристической деятельности и как нерестилища ценных эндемичных видов рыб.

Наиболее токсичными свойствами обладает морская среда в зонах поступления стоков рек, отнесенных авторами ко второй группе – Битха и Херота (в эту группу включены также реки Кудепста и Лоо). Несмотря на относительно малый объем стока, эти водные объекты характеризуются полностью деградированными биоценозами в их устьевых зонах. Из-за комплексного характера загрязнения и практически полного отсутствия процессов самоочищения они являются серьезными факторами воздействия на качество прибрежной морской среды в рекреационной зоне, непосредственно прилегающей к ним. Практически все установленные факторы воздействия на качество водной среды этих водотоков обусловлены техногенными причинами.

Таким образом, плюмы малых рек могут оказывать воздействие на качество морской среды и состояние прибрежных биоценозов, сопоставимое с влиянием стоков более крупных водотоков. Это должно учитываться как при формировании программы мониторинга водной среды региона, так и при разработке природоохранных мероприятий.

Комплексная система экологического мониторинга исследуемой территории, чрезвычайно зависимой от природно-климатических ресурсов, должна базироваться на концепции единой экологической системы и объединять анализ как состояния поверхностных вод суши, так и локальной морской прибрежной полосы, что позволит оценить перенос загрязнения, биогенных веществ, а также трансформацию поступающих с территорий водосбора примесей вследствие биохимических процессов, обусловленных жизнедеятельностью гидробионтов.

Использование в исследовании биоиндикаторов, имеющих различный временной период реакции на неблагоприятное воздействие (планктон служит краткосрочным индикатором, мидии – биомаркером долговременного негативного влияния), представляет собой этап формирования системы биоиндикаторов, относящихся к разным таксономическим и трофическим группам, которая позволяет получить более детальное представление о процессах, происходящих в прибрежных морских биоценозах, и их зависимости от факторов негативного воздействия антропогенного генеза.

Результаты идентификации и оценки основных геологических и гидробиологических характеристик и особенностей природопользования водотоков и их бассейнов позволили подтвердить гипотезу об однородности сформированных авторами групп водотоков как по морфометрическим характеристикам и характеру природопользования, так и по особенностям их воздействия на гидробиоценозы рек и их плюмов.

## Список источников

1. Колесникова А.А., Гудкова Н.К., Горбунова Т.Л. Оценка антропогенной нагрузки на экосистемы реки Сочи // Берега Черного моря: экологические ориентиры в настоящем – устойчивое развитие в будущем : материалы II Рос.-Абхаз. междунар. науч.-практ. семинара. Краснодар: Изд. дом – Юг, 2020. С. 85–94.
2. Потиевская Н.А., Горбунова Т.Л., Зуева Н.В. Оценка качества вод верховьев реки Мзымта по характеристикам макрозообентоса // Геогр. среда и живые системы. 2022. № 2. С. 25–37. Doi: 10.18384/2712-7621-2022-2-25-37.
3. Гудкова Н.К., Горбунова Т.Л., Матова Н.И. Влияние полигонов ТКО на деградацию биогеоценозов прибрежных зон водотоков и Черного моря // Природообустройство. 2021. № 5. С. 117–124. Doi: 10.26897/1997-6011-2021-5-117-124.
4. Канонникова Е.О. Геоэкологическая обстановка прибрежной части Чёрного моря в границах Сочинского Причерноморья // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=15148> (дата обращения: 10.04.2024).
5. Завьялов П., Маккаев П. Речные плюмы в акватории Сочи // Наука в России. 2014. № 2. С. 4–12.
6. Полухин А.А., Заговенкова А.Д., Хлебонашев П.В., Сергеева В.М., Осадчиев А.А., Дбар Р.С. Гидрохимический состав стока рек Абхазии и особенности его трансформации в прибрежной зоне // Океанология. 2021. Т. 61, № 1. С. 21–31. Doi: 10.31857/S0030157420060118.
7. Горбунова Т.Л., Гудкова Н.К., Рубанова Н.И. Геологические и гидробиологические характеристики экологически опасных рек Сочинского Причерноморья // Системы контроля окружающей среды – 2023 : тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Севастополь: ИП Куликов А.С., 2023. С. 93.

8. Бегун А.А. Биоиндикация состояния морской среды по диатомовым водорослям эпифитона макрофитов (залив Петра Великого, Японское море) // Изв. ТИПРО. 2012. Т. 169. С. 77–93.
9. Stelmakh L., Kovrigina N., Gorbunova T. Response of marine microalgae *Phaeodactylum Tricornutum*, *Prorocentrum Cordatum* and *Gyrodinium Fissum* to complex pollution of sevastopol bays (Black Sea) // *Ecologica Montenegrina*. 2021. Vol. 48. P. 109–116. Doi: 10.37828/EM.2021.48.13.
10. Р 52.24.690–2006. Оценка токсического загрязнения вод водотоков и водоемов различной солености и зон смешения речных и морских вод методами биотестирования. Ростов н/Д., 2006. 7 с.
11. Челябинска Н.С., Попов М.А. Сравнительный анализ морфометрических характеристик мидии *Mytilus galloprovincialis*, из различных районов обитания (Крым, Черное море) // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2018. № 2. С. 264–269.
12. Горбунова Т.Л., Баширова М.П., Матова Н.И. Морфометрические характеристики черноморских мидий *Mytilus galloprovincialis* Lam. как биоиндикатор антропогенного воздействия на прибрежные биоценозы Черного моря на территориях рекреационно-туристской специализации // *Амурский зоол. журн.* 2022. Т. 14, № 3. С. 516–530. Doi: 10.33910/2686-9519-2022-14-3-516-530.
13. Дехта В.А., Каталевский Н.Н. Содержание химических элементов в раковинах и изменчивость их формы у мидий *Mytilus galloprovincialis* прибрежной зоны Черного моря // *Геозкол. исследования и охрана недр*. 2000. № 3. С. 26–33.
14. Дехта В.А. Адекватность механизмов морфофункциональной адаптации мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam. к загрязнению // *Современные проблемы физиологии и биохимии водных организмов: материалы Междунар. конф. Петрозаводск, 2004*. С. 40.
15. Петров В.А., Ярославцев Н.А. Влияние порта «Сочи-Имеретинский» на береговые процессы (Черное море) // *Геозкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология*. 2019. № 5. С. 38–47. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019538-47>.
16. Гудкова Н.К., Горбунова Т.Л., Матова Н.И. Оценка комплексного воздействия полигонов ТКО на биотопы рек в условиях влажных субтропиков // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики*. Серия: Естеств. и техн. науки. 2020. № 9. С. 23–29. Doi: 10.37882/2223-2966.2020.09.12. EDN: TIPBWX.
17. Гудкова Н.К. Геохимические аномалии и риски загрязнения водных экосистем в условиях расширения горных курортов Сочи // *Устойчивое развитие особо охраняемых природных территорий : сб. статей VIII Всерос. (нац.) науч.-практ. конф. Сочи: Природный орнитол. парк в Имеретинской низменности, 2021*. Т. 8. С. 105–109. EDN: YGBBTV.
18. Лесникова П.С. Изменение макроэлементного состава речных вод в контрастных геологических условиях, река Сочи Черноморского побережья России // *Вестн. Воронежского гос. ун-та*. 2023. № 3. С. 47–56. <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/3/47-56>
19. Zakharikhina L., Kerimzade V., Litvinenko Y. Elemental Composition of Soils in the Heterogeneous Geological Setting of the Mzymta River Basin on the Russian Black Sea Coast // *Environment and Ecology Research*. 2023. Vol. 11, № 2. P. 225–239. Doi: 10.13189/eer.2023.110201. URL: <https://www.hrpub.org/download/20230330/EER1-14029580.pdf> (дата обращения: 11.03.2024).
20. Lyche Solheim A., Feld C., Birk S., Phillips G., Carvalho L., Morabito G. Comparison of common metrics for phytoplankton, macrophytes, macro-invertebrates and fish for ecological status assessment of European lakes: a synthesis from the WISER project Module 3 // *Hydrobiologia*. 2013. Vol. 704. P. 57–74.

## References

1. Kolesnikova A.A., Gudkova N.K., Gorbunova T.L. Assessment of anthropogenic load on the ecosystems of the Sochi river. *Shores of the Black Sea: ecological landmarks in the present – sustainable development in the future: Abstracts of Papers of the II Russian-Abkhazian International Scientific and Practical Seminar*. Ed. by M.S. Arakelov. Krasnodar: Publishing House – South; 2020:85-94. (In Russ.).
2. Potievskaya N.A., Gorbunova T.L., Zueva N.V. Assessment of water quality in the upper Mzymta river by characteristics of macrozoobenthos. *Geogr. sreda i zhivye sistemy = Geographical Environment and Living Systems*. 2022;(2):25-37. Doi: 10.18384/2712-7621-2022-2-25-37. (In Russ.).
3. Gudkova N.K., Gorbunova T.L., Matova N.I. Influence of MSW landfills on degradation of biogeocenoses of coastal zones of water courses and the Black Sea. *Prirodoobustroistvo = Environmental Engineering*. 2021;(5):117-124. Doi: 10.26897/1997-6011-2021-5-117-124. (In Russ.).
4. Kanonnikova E.O. Geoecological situation of the coastal part of the Black Sea within the boundaries of the Sochi Black Sea region. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2014;(5). Available from: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=15148> [Accessed 10th April 2024]. (In Russ.).
5. Zavyalov P., Makkaveev P. River plumes in the Sochi water area. *Nauka v Rossii = Science in Russia*. 2014;(2):4-12. (In Russ.).
6. Polukhin A.A., Zagovenkova A.D., Khlebopashev P.V., Sergeeva V.M., Osadchiev A.A., Dbar R.S. Hydrochemical composition of the flow of rivers of Abkhazia and features of its transformation in the coastal zone. *Okeanologiya = Oceanology*. 2021;61(1):21-31. Doi: 10.31857/S0030157420060118. (In Russ.).

7. Gorbunova T.L., Gudkova N.K., Rubanova N.I. Geological and hydrobiological characteristics of ecologically dangerous rivers of the Sochi Black Sea region. *Environmental Control Systems - 2023*. Abstracts of articles of the International Scientific and Practical Conference. Sevastopol: IP Kulikov A.S. Publ.; 2023:93. (In Russ.).
8. Begun A.A. Bioindication of marine environment condition by epiphytic diatoms on macrophytes (Peter the Great Bay, Japan Sea). *Izv. TINRO = Transactions of the Pacific Research Institute of Fisheries and Oceanography*. 2012;169:77-93. (In Russ.).
9. Stelmakh L., Kovrigina N., Gorbunova T. Response of marine microalgae *Phaeodactylum Tricornutum*, *Prorocentrum Cordatum* and *Gyrodinium Fissum* to complex pollution of sevastopol bays (Black Sea). *Ecologica Montenegrina*. 2021;48:109-116. Doi: 10.37828/EM.2021.48.13.
10. R 52.24.690-2006. *Assessment of toxic pollution of watercourses and reservoirs of various salinity and mixing zones of river and marine waters by biotesting methods*. Rostov-on-Don, 2007. 7 p. (In Russ.).
11. Chelyadina N.S., Popov M.A. Comparative analysis of the morphometric characteristics of the mussel *Mytilus Galloprovincialis* from different habitats (the Crimea, the Black Sea). *Vestn. Voronezhskogo gos. un-ta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*. 2018;(2):264-269. (In Russ.).
12. Gorbunova T. L., Basharova M. P., Matova N. I. Morphometric characteristics of Black Sea mussels *Mytilus Galloprovincialis* Lam. as biomarkers of the anthropogenic impact on the Black Sea coastal biocenoses in tourist destinations. *Amurskii zool. zhurn. = Amur Zoological Journal*. 2022;14(3):516-530. Doi: 10.33910/2686-9519-2022-14-3-516-530. EDN: ALHGGY. (In Russ.).
13. Dekhta V.A., Katalovsky N. N. The content of chemical elements in shells and the variability of their shape in *Mytilus galloprovincialis* mussels of the Black Sea coastal zone. *Geoekol. issledovaniya i okhrana nedr = Overview Information. Geoecological Research and Protection of the Subsoil*. 2000;(3):26-33. (In Russ.).
14. Dekhta V.A. Adequacy of mechanisms of morphofunctional adaptation of the mussel *Mytilus galloprovincialis* Lam. to pollution. *Modern problems of physiology and biochemistry of aquatic organisms*. Proceedings of the International Conference. Petrozavodsk, 2004:40. (In Russ.).
15. Petrov V. A., Yaroslavtsev N. A. The impact of Sochi - Imeretinsky harbor on the coastal processes (the Black sea). *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya = Geoecology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology*. 2019;(5):38-47. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019538-47> (In Russ.).
16. Gudkova N. K., Gorbunova T. L., Matova N. I. Evaluation the CSW landfills complex impact on river biotops in humid subtropics. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestv. i tekhn. nauki = Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2020;(9):23-29. Doi: 10.37882/2223-2966.2020.09.12. EDN: TIPBWX. (In Russ.).
17. Gudkova N. K. Geochemical anomalies and risks of pollution of aquatic ecosystems in conditions of expansion of Sochi mountain resorts. *Sustainable development of specially protected natural territories: Abstracts of articles of the VIII All-Russian (National) Scientific and Practical Conference*. Sochi: Natural Ornithological Park in the Imereti lowland Press; 2021;8:105-109. EDN: YGBBTV. (In Russ.).
18. Lesnikova P.S. Change in the macronutrient composition of river waters in contrasting geological conditions, Sochi river of the Black Sea coast of Russia. *Vestn. Voronezhskogo gos. un-ta = Bulletin of the Voronezh State University*. 2023;(3):47-56. <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/3/47-56>. (In Russ.).
19. Zakharikhina L., Kerimzade V., Litvinenko Y. Elemental Composition of Soils in the Heterogeneous Geological Setting of the Mzymta River Basin on the Russian Black Sea Coast. *Environment and Ecology Research*. 2023;11(2):225-239. Doi: 10.13189/eer.2023.110201. Available from: <https://www.hrpub.org/download/20230330/EER1-14029580.pdf> [Accessed 11th March 2024].
20. Lyche Solheim A., Feld C., Birk S., Phillips G., Carvalho L., Morabito G. Comparison of common metrics for phytoplankton, macrophytes, macro-invertebrates and fish for ecological status assessment of European lakes: a synthesis from the WISER project Module 3. *Hydrobiologia*. 2013;704:57-74.

### **Информация об авторах**

Т.Л. Горбунова – научный сотрудник.

Н.К. Гудкова – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник.

Н.И. Рубанова – кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией экономики природопользования и экологии.

### **Information about the authors**

T.L. Gorbunova – Researcher.

N.K. Gudkova – Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Senior Researcher.

N.I. Rubanova – Candidate of Science (Economics), Senior Researcher, Head of the Laboratory of Economics of Nature Management and Ecology.

Статья поступила в редакцию 13.05.2024; одобрена после рецензирования 21.06.2024; принята к публикации 16.10.2024.  
The article was submitted 13.05.2024; approved after reviewing 21.06.2024; accepted for publication 16.10.2024.

Научная статья

УДК 574.42

doi: 10.18522/1026-2237-2024-4-2-31-42

## О ФОРМАЦИИ TAMARICETA RAMOSISSIMAE В ЭКОТОННЫХ СИСТЕМАХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПРИКАСПИЯ

Иван Александрович Горяев<sup>1✉</sup>, Светлана Сергеевна Уланова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт комплексных исследований аридных территорий, Элиста, Республика Калмыкия, Россия

<sup>1</sup>goriaev.arslan@yandex.ru✉, ORCID: 0000-0002-0732-7810

<sup>2</sup>svetaulanova@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-0491-7313

**Аннотация.** Сообщества формации *Tamariceta ramosissima* встречаются повсеместно по экотонным системам водоёмов Прикаспийской низменности Калмыкии. Формация состоит из 5 классов ассоциаций и 23 ассоциаций. Ценозы *Tamarix ramosissima* отмечены во флуктуационном, динамическом и дистантном блоках экотонных систем и приурочены к солончаковым и солончаковатым почвам. Самыми характерными являются злаково-тамариковые (*Tamariceta ramosissima graminosa*) и полукустарничково-тамариковые (*Tamariceta ramosissima suffruticulosa*) сообщества. Зональные особенности характеризуются распределением сообществ с севера на юг и юго-восток. Они различаются по фитоценологическому и видовому составу.

**Ключевые слова:** формация, экотоны, сообщества *Tamarix ramosissima*, Северо-Западный Прикаспий, Калмыкия

**Для цитирования:** Горяев И.А., Уланова С.С. О формации *Tamariceta ramosissima* в экотонных системах Северо-Западного Прикаспия // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 4-2. С. 31–42.

**Благодарности:** исследование выполнено по гранту Российского научного фонда № 23-27-10017 «Гео-экологическая оценка водных объектов Республики Калмыкия и прилегающих к ним территорий», <https://rscf.ru/project/23-27-10017/>.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

## ON THE TAMARICETA RAMOSISSIMAE FORMATION IN THE ECOTONE SYSTEMS OF THE NORTHWESTERN CASPIAN LOWLAND

Ivan A. Goryaev<sup>1✉</sup>, Svetlana S. Ulanova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Institute of Complex Research of Arid Areas, Elista, Republic of Kalmykia, Russia

<sup>1</sup>goriaev.arslan@yandex.ru✉, ORCID: 0000-0002-0732-7810

<sup>2</sup>svetaulanova@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-0491-7313

**Abstract.** Communities of the *Tamariceta ramosissima* formation are found everywhere in the ecotone systems of reservoirs of the Caspian lowland of Kalmykia. The formation consists of 5 classes of associations and 23 associations. *Tamarix ramosissima* cenoses occur in fluctuation, dynamic and distant ecotone blocks and are confined to solonchaks, solonchaks solonets. The most characteristic are the *Tamariceta ramosissima graminosa*

© Горяев И.А., Уланова С.С., 2024

and *Tamariceta ramosissima suffruticulosa* communities. Zonal features are characterized by the distribution of communities from north to south and southeast. They differ in phytocenotic and species composition.

**Keywords:** formation, ecotones, communities *Tamarix ramosissima*, Northwestern Caspian lowland, Kalmykia

**For citation:** Goryaev I.A., Ulanova S.S. On the *Tamariceta ramosissima* Formation in the Ecotone Systems of the Northwestern Caspian Lowland. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2024;(4-2):31-42. (In Russ.).

**Acknowledgments:** the study was carried out under the grant of the Russian Science Foundation No. 23-27-10017 «Geoecological assessment of water bodies of the Republic of Kalmykia and adjacent territories», <https://rscf.ru/project/23-27-10017/>.

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

## Введение

Сообщества формации *Tamariceta ramosissima* являются неотъемлемой частью экотонных систем Северо-Западного Прикаспия. Они распространены по берегам водоёмов, вдоль каналов и приурочены к солончаковым, солончаковатым почвам с разным гранулометрическим составом (суглинистый, супесчаный, песчаный). До настоящего времени не было специальных работ, посвященных тамариковым (*Tamarix ramosissima*) сообществам в Калмыкии. Однако сведения о ценозах *Tamarix ramosissima* в регионе исследования и на прилегающих территориях имеются в ряде флористических и геоботанических работ [1–9]. Соответственно, цель нашего исследования – изучить ценозы формации *Tamariceta ramosissima* и составить эколого-фитоценотическую доминантно-детерминантную классификацию.

## Материалы и методы исследования

Методологией исследования послужили работы В.С. Залетаева по определению структурно-функциональной организации экотона вода – суша [10], где им выделены 6 основных блоков: аквальный – акватория с глубиной более 1,5–2,5 м; амфибиальный – литораль с периодическим обсыханием в период сработки вод водоёмов; флуктуационный – ежегодно заливаемый участок побережья; динамический – заливаемый не ежегодно, в годы максимального половодья; дистантный – незаливаемая территория, но испытывающая воздействие неглубоко (до 3–5 м) залегающих грунтовых вод; маргинальный – воздействие водоёма передаётся через микроклимат предыдущих блоков.

Полевые исследования проводились в мае и сентябре с 2012 по 2023 г. на пяти ключевых водных объектах, расположенных в условиях степной и пустынной зон (рис. 1). Выполнено 158 геоботанических описаний с использованием стандартной методики на площадках размером 10×10 м<sup>2</sup>. Они включают характеристику местообитания, общее проективное покрытие в сообществе в процентах, проективное покрытие в процентах и обилие по Друде для каждого вида, фенофазу и высоту растений [11, 12].

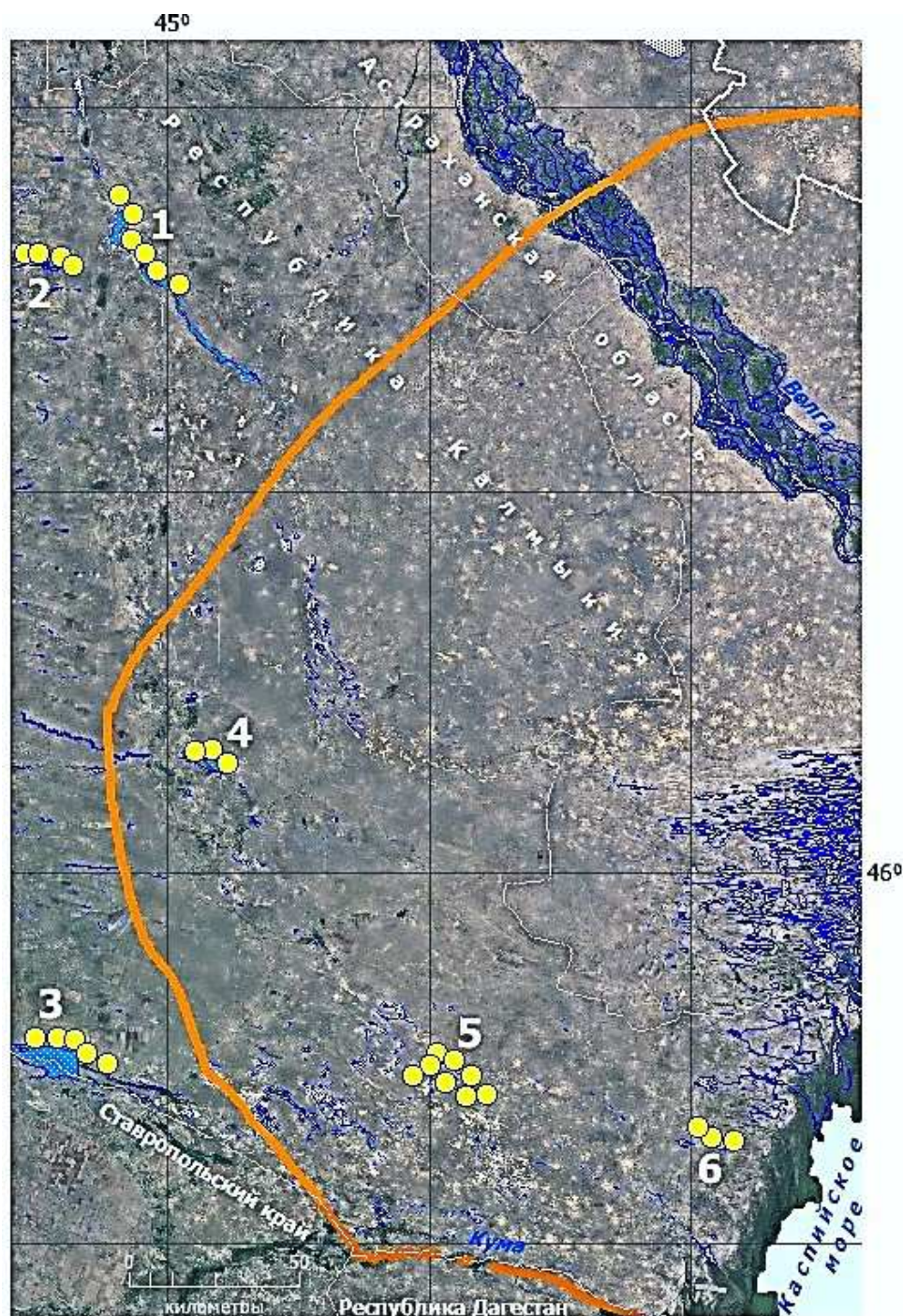
При анализе геоботанических описаний разработана эколого-фитоценотическая доминантно-детерминантная классификация. Выделены классы ассоциаций и ассоциации [13].

Названия видов растений даны по сводке С.К. Черепанова. Жизненные формы растений выделены по Т.И. Серебряковой и др. Латинские названия классов ассоциаций и ассоциаций приведены по Всероссийскому кодексу фитоценотической номенклатуры [14–16].

Под сообществами отбирались грунтовые воды на минерализацию с учётом глубины залегания. Химический анализ поверхностных и грунтовых вод был выполнен в лаборатории Всероссийского научно-исследовательского института охотничьего хозяйства и звероводства в соответствии со всеми стандартами: катионно-анионный состав – титриметрическим методом, определение сухого остатка – гравиметрическим. Водная вытяжка почвенных проб была проанализирована по ГОСТ 26425-85; 26424-85; 26426-85; 26427-85; 26428-85; 26483-85.

Ординационный и кластерный анализ выполнен в программе PAST методом неметрического многомерного шкалирования (NMDS) с использованием меры расстояния Брея – Кёртиса [17, 18].





● – сообщества *Tamarix ramosissima*; — граница степной и пустынной зон; 1 – вдхр. Цаган-Нур; 2 – вдхр. Аршань-Зельмень; 3 – вдхр. Чограй; 4 – вдхр. Деед-Хулсун; 5 – вдхр. Келтрикан и Киркита; 6 – вдхр. Красинское

Рис. 1. Карта-схема распространения ценозов *Tamarix ramosissima* на ключевых водных объектах Калмыкии [4, 19, 20] / Fig. 1. Map-scheme of distribution of *Tamarix ramosissima* cenoses on key water bodies of Kalmykia [4, 19, 20]

### Характеристика формации *Tamariceta ramosissima*

*Tamarix ramosissima* Ledeb. (тамарикс, гребенщик многоветвистый) – степно-пустынный кустарник до 3–4 м высотой. Ареал вида средиземный. Он протянулся от Бессарабии на западе до равнинной и предгорной части Средней Азии и восточного Казахстана на востоке. Северная граница доходит до Нижнего Поволжья и юга Западной Сибири, южная граница – до пустынь Ирана.

В Северо-Западном Прикаспии встречается повсеместно по берегам озёр, каналов, бугристым пескам. Тамариковые (*Tamarix ramosissima*) сообщества отмечены на всех изучаемых нами экотонных системах водоёмов Аршань-Зельмень, Цаган-Нур и Чограй – степная зона; Деед-Хулсун, Красинское, Келтрикан, Киркита – пустынная зона.

Общее проективное покрытие в тамариковых (*Tamarix ramosissima*) ценозах колеблется в пределах от 10 до 60 %, изредка – 90 %. В степной зоне проективное покрытие 50 % и выше за счет злаков, в пустынной зоне ниже и составляет 30–40 %. Также проективное покрытие тамариковых сообществ зависит от близости или удаленности от берега водоёма и от глубины залегания грунтовых вод. К примеру, 10 % и более обычно встречается во флуктуационном и реже в дистантном блоках. Здесь преобладают подросты тамариксов. Наиболее часто проективное покрытие в ценозах составляет 40–60 % в дистантном и реже в динамическом блоках. Изредка покрытие может достигать 80–90 % за счет травянистой растительности.

Составлена классификация формации *Tamariceta ramosissima*, которая представлена 5 классами ассоциаций и 23 ассоциациями (табл. 1).

Сообщества класса ассоциаций ***Tamariceta ramosissima fruticulosa*** встречаются во флуктуационном, динамическом и реже в дистантном блоках водоёмов Аршань-Зельмень, Чограй и Цаган-Нур в степной зоне. В пустынной зоне – по берегу водоёмов Деед-Хулсун, Келтрикан и Киркита. Они представлены тамариковыми (*Tamarix ramosissima*, *Tamarix ramosissima-laxa*) и лохово-тамариковыми (*Tamarix ramosissima – Elaeagnus angustifolia*) ценозами. Смородиново-тамариковые (*Tamarix ramosissima – Ribes aureum*) сообщества отмечены нами только по берегу вдхр. Аршань-Зельмень и, вероятнее всего, являются посадками.

Уровень грунтовых вод под сообществами расположен на глубине от 1 м до 2,5 и более. Общее проективное покрытие в ценозах составляет 40–60 %. Изредка покрытие может достигать 90 %, при зарастании подростами тамарикса – обычно очень низкое (7–10 %).

Класс ассоциаций ***Tamariceta ramosissima suffruticulosa*** представлен полынно-тамариковыми (*Tamarix ramosissima – Artemisia santonica*, *T. ramosissima – Artemisia lerchiana*, *T. ramosissima – Artemisia taurica*, *T. ramosissima – Artemisia austriaca*) сообществами. Структура ценозов двухъярусная. Первый ярус – травянисто-полукустарничковый, второй – кустарниковый. Уровень грунтовых вод под полынно-тамариковыми ценозами колеблется от 1 до 1,3 м. Общее проективное покрытие – 30–40 %, может достигать 60 % и более.

Самыми распространёнными являются сантоникополынно-тамариковые ценозы. Они встречаются по экотонам всех исследуемых водоёмов в пустынной и степной зонах. Обычны для динамического, дистантного блоков, характерны и для флуктуационного. Сообщества приурочены к солончаковатым полугидроморфным почвам.

Лерхопалынно-тамариковые ценозы встречаются намного реже, чем сантоникополынно-тамариковые, и отмечены нами в экотонах водоёмов Чограй в степной зоне и Красинское в пустынной. Они характерны для дистантного, реже динамического блоков и приурочены к солонцеватым полугидроморфным почвам. В других водоёмах *Artemisia lerchiana* не может содоминировать в тамариковых ценозах ввиду солончаковатости почв.

Ценозы таврическопалынно-тамариковые встречены по берегу водоёма Цаган-Нур (реже) в степной зоне и часто по экотонам вдхр. Деед-Хулсун, Киркита, Келтрикан в пустынной зоне. Они приурочены к солонцеватым и солончаковатым полугидроморфным почвам.

Австрийскопалынно-тамариковые сообщества встречаются только по экотонам Чограйского водохранилища в динамическом блоке. Это нарушенные ценозы, подвергающиеся постоянному вытаптыванию крупным и мелким рогатым скотом, использующим водоём в качестве водопоя.

Для экотонных систем водоёмов Чограй и Красинское характерны разнотравно-тамариковые сообщества ***Tamariceta ramosissima herbosa***. Они имеют также двухъярусную структуру. Первый ярус представлен многолетним разнотравьем, второй – кустарниковый. Они отмечены в динамическом и дистантном блоках. Класс ассоциаций представлен верблюжьеклоуково-тамариковыми (*Tamarix ramosissima – Alhagi pseudalhagi*), осоково-тамариковыми (*Tamarix ramosissima – Carex stenophylla*) и кермеково-тамариковыми (*Tamarix ramosissima – Limonium platyphyllum*) сообществами. Они приурочены к среднесолонцеватым почвам. Уровень грунтовых вод залегает глубже, чем в вышеописанных классах ассоциаций, – на 2–3 м.



Таблица 1 / Table 1

Структура формации *Tamariceta ramosissimae*  
 / The structure of the formation *Tamariceta ramosissimae*

Класс ассоциаций	Ассоциация
<b>Tamariceta ramosissimae fruticulosa</b> (кустарниково-тамариковый)	<b>Tamaricetum ramosissimae</b> (тамариковая)
	<b>Tamaricetum ramosissimae – laxae</b> (тамариковая)
	<b>Tamaricetum ramosissimae elaeagnosum angustifoliae</b> (лохово-тамариковая)
	<b>Tamaricetum ramosissimae ribeosum aurei</b> (смородиново-тамариковая)
<b>Tamariceta ramosissimae suffruticulosa</b> (полукустарничково-тамариковый)	<b>Tamaricetum ramosissimae artemisiosum santonicae</b> (сантоникопольно-тамариковая)
	<b>Tamaricetum ramosissimae artemisiosum lerchianae</b> (лерхопольно-тамариковая)
	<b>Tamaricetum ramosissimae artemisiosum tauricae</b> (тавричскопольно-тамариковая)
	<b>Tamaricetum ramosissimae artemisiosum austriacae</b> (австрийскопольно-тамариковая)
<b>Tamariceta ramosissimae herbosa</b> (разнотравно-тамариковый)	<b>Tamaricetum ramosissimae alhagiosum pseudalhagi</b> (верблюжьеколючково-тамариковая)
	<b>Tamaricetum ramosissimae limoniosum platyphylii</b> (жермеково-тамариковая)
	<b>Tamaricetum ramosissimae cariosum stenophyllii</b> (осоково-тамариковая)
<b>Tamariceta ramosissimae graminosa</b> (злаково-тамариковый)	<b>Tamaricetum ramosissimae phragmitosum australis</b> (тростниково-тамариковая)
	<b>Tamaricetum ramosissimae puccinelliosum giganteae</b> (Бескильницево-тамариковая)
	<b>Tamaricetum ramosissimae poosum bulbosae</b> (мятликово-тамариковая)
	<b>Tamaricetum ramosissimae elytrigiosum repentis</b> (пырейно-тамариковая)
	<b>Tamaricetum ramosissimae aeluroposum littoralis</b> (ажреково-тамариковая)
	<b>Tamaricetum ramosissimae festucosum vallesiacaе</b> (типчачково-тамариковая)
	<b>Tamaricetum ramosissimae festucosum beckeri</b> (типчачково-тамариковая)
<b>Tamaricetum ramosissimae bolboschoemosum maritimi</b> (клубнекамышево-тамариковая)	
<b>Tamariceta ramosissimae annulosa</b> (однолетниково-тамариковый)	<b>Tamaricetum ramosissimae petrosimoniosum oppositifoliae</b> (петросимониево-тамариковая)
	<b>Tamaricetum ramosissimae petrosimoniosum brachiatae</b> (петросимониево-тамариковая)
	<b>Tamaricetum ramosissimae suaedosum salsae</b> (сведово-тамариковая)
	<b>Tamaricetum ramosissimae suaedosum acuminatae</b> (сведово-тамариковая)
	<b>Tamaricetum ramosissimae salicorniosum perennantis</b> (солеросово-тамариковая)
	<b>Tamaricetum ramosissimae anisanthosum tectori</b> (кострово-тамариковая)

Класс ассоциаций **Tamariceta ramosissimae herbosa** является одним из самых разнообразных и имеет двухъярусную структуру. Он включает сообщества 7 ассоциаций, которые встречаются во флуктуационном и динамическом блоках экотонных систем водоёмов. Общее проективное покрытие в злаково-тамариковых сообществах – 30–40 %, в разные годы может достигать 80 %.

Наиболее распространёнными являются тростниково-тамариковые (*Tamarix ramosissima – Phragmites australis*) ценозы. Они обычны для всех наших ключевых участков.

Клубнекамышево-тамариковые (*Tamarix ramosissima – Bolboschoenus maritimus*), бескильницево-тамариковые (*Tamarix ramosissima – Puccinellia gigantea*) сообщества встречаются преимущественно в степной зоне во флуктуационном блоке экотонв вдхр. Аршань-Зельмень.

Мятликово-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Poa bulbosa*), типчаково-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Festuca valesiaca*) и пырейно-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Elytrigia repens*) ценозы нами встречены в степной зоне экотонов вдхр. Цаган-Нур во флуктуационном и динамическом блоках. Другие типчаково-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Festuca beckeri*) ценозы встречены близ вдхр. Красинское в пустынной зоне на песчаных почвах.

Класс ассоциаций **Tamariceta ramosissimae annulosa** так же, как и злаково-тростниковый, является довольно разнообразным и включает 5 ассоциаций. Они встречаются во флуктуационном, динамическом и дистантном блоках экотонов всех водоёмов. Общее проективное покрытие колеблется в пределах от 40 до 60 % в весенний период, осенью при разрастании однолетников может достигать 90 %. Ценозы приурочены к солончаковатым и солончаковым почвам. Грунтовые воды залегают на глубине от 0,5 до 1,8 м.

Наиболее характерны петросимониево-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Petrosimonia oppositifolia*) и сведово-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Suaeda salsa*) сообщества. Отмечены в основном в динамическом и дистантном блоках водоёмов степной зоны – Чограй, Цаган-Нур; и пустынной – Деед-Хулсун. Сообщества с другим видом *Suaeda acuminata* (*Tamarix ramosissima* – *Suaeda acuminata*) характерны для экотонов водоёмов Келтрикан, Киркита и Красинское в пустынной зоне.

Солеросово-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Salicornia perennans*) ценозы обычны для флуктуационного и реже динамического блоков экотонов. Такие сообщества встречаются по берегам водоёмов степной зоны Аршань-Зельмень и Цаган-Нур, часто по берегу водоёмов пустынной зоны Деед-Хулсун, Келтрикан и Киркита.

Кострово-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Anisantha tectorum*) ценозы отражают чрезмерную пастбищную нагрузку. Обычны по экотонным системам динамического блока водоёмов Цаган-Нур и Красинское.

### Ординационный и кластерный анализ сообществ *Tamarix ramosissima*

Сообщества тамариковой (*Tamariceta ramosissimae*) формации приурочены только к грунтовым водам и являются фреатофитными. Однако они нуждаются и в некотором засолении, а именно в хлоридно-сульфатном и сульфатно-хлоридном типе засоления. Ординация позволила подтвердить влияние этих факторов на сообщества *Tamarix ramosissima* (рис. 2).

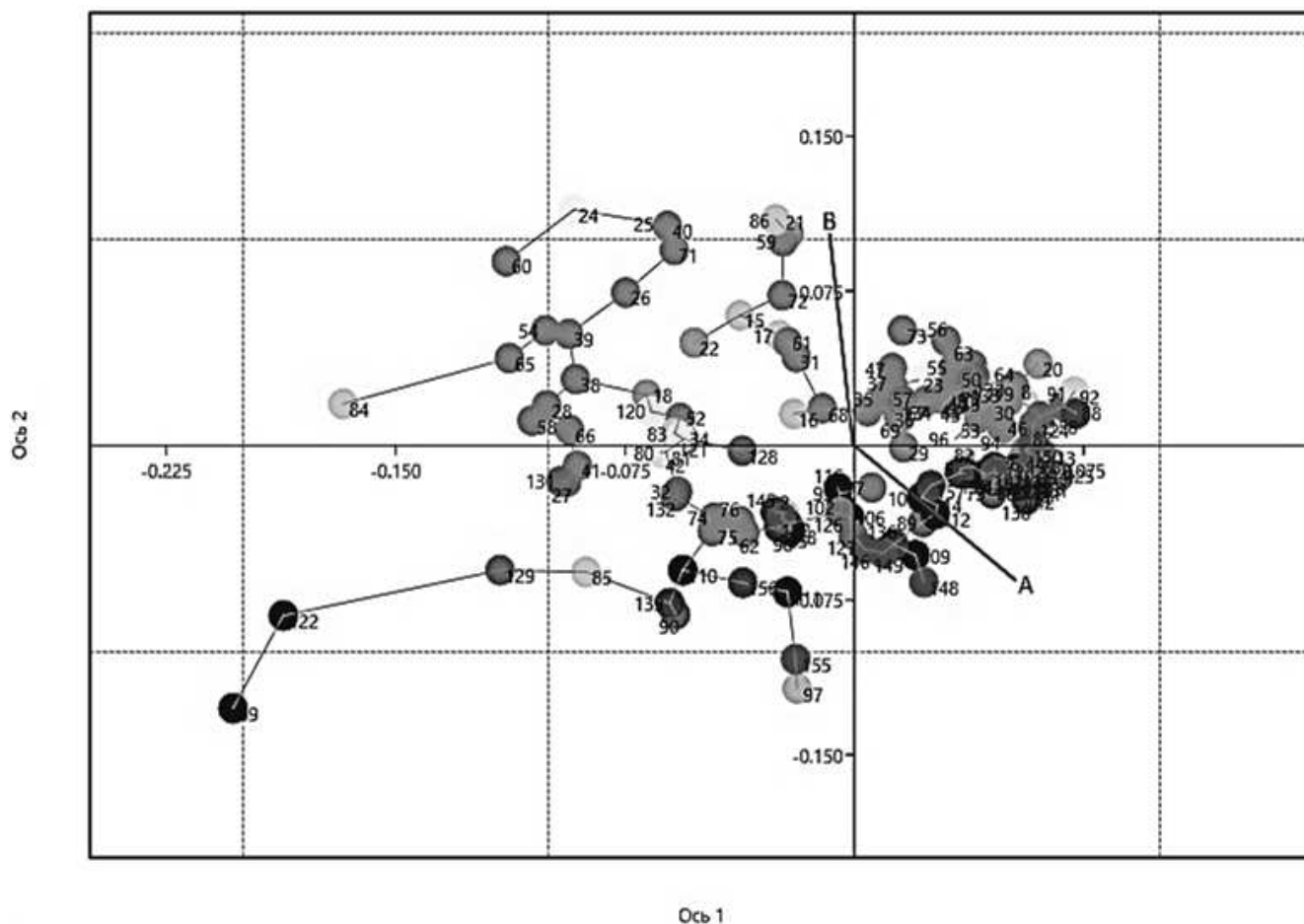
На фактор увлажнения (А) приходится 47 % нагрузки. Тростниково-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Phragmites australis*) ценозы являются самыми увлажненными, предпочитают близость грунтовых вод, периодически подтапливаются поверхностными водами. Среди других сообществ к увлажнению приурочены клубнекамышово-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Bolboschoenus maritimus*), лохово-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Elaeagnus angustifolia*), верблюжьекочуково-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Alhagi pseudalhagi*) и др.

Засоление – очень важный экологический фактор в распределении тамариковых сообществ. Под ними преобладают ионы сульфатов и хлора. Факторная нагрузка на ось В составляет 26 %. Близ оси сконцентрированы сантоникопольно-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Artemisia santonica*) и тамариковые (*Tamarix ramosissima*) ценозы. Другие сообщества с солянками на графике сконцентрированы близ фактора увлажнения. Это связано с рассолением ионов солей грунтовыми водами.

Кластерная диаграмма тамариковых сообществ образует две группы (I, II), каждая из которых состоит из двух подгрупп (рис. 3). Первая группа (I) объединяет ценозы, приуроченные к увлажненным местообитаниям. Они встречаются преимущественно в амфибиальном и динамическом блоках водоёмов. Подгруппа Ia включает сообщества с корневищными злаками, такие как пырейно-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Elytrigia repens*), бескильницево-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Puccinellia gigantea*) и тростниково-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Phragmites australis*). Подгруппа Ib состоит преимущественно из практически монодоминантных тамариковых (*Tamarix ramosissima*) ценозов. Они обычно встречаются в прибрежной полосе водоёмов из подроста.

Вторая (II) группа представлена также двумя подгруппами (IIa, IIb). Подгруппа IIa включает сантоникопольно-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Artemisia santonica*) сообщества. Они часто встречаются в динамическом и дистантном блоках водоёмов. Вторая подгруппа (IIb)

образована сведово-тамариковыми (*Tamarix ramosissima* – *Suaeda* spp), солеросово-тамариковыми (*Tamarix ramosissima* – *Salicornia perennans*) и всё теми же тростниково-тамариковыми (*Tamarix ramosissima* – *Phragmites australis*), сантоникопольнно-тамариковыми (*Tamarix ramosissima* – *Artemisia santonica*) ценозами. Эту подгруппу отличает высокое обилие в их сообществах однолетних галофитных видов.



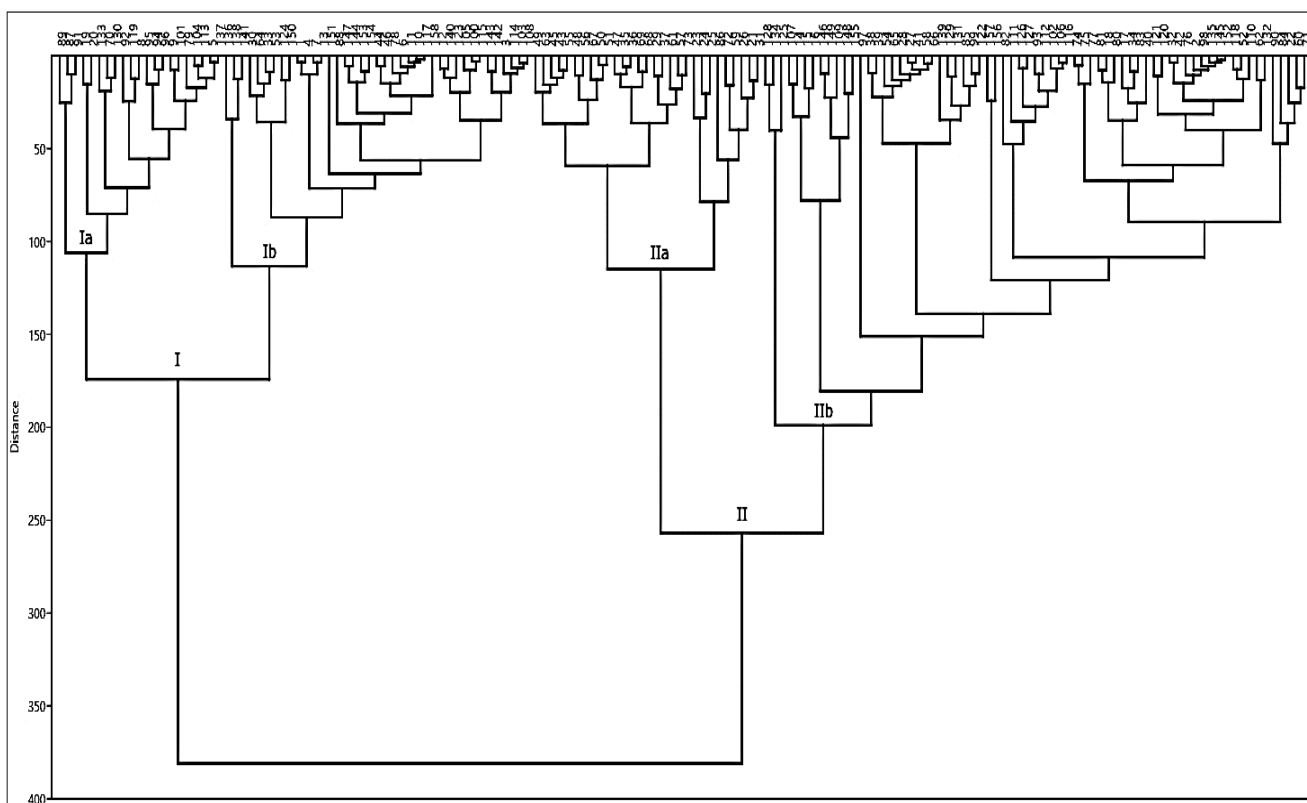
*Tamarix ramosissima* (1–17), *T. ramosissima* – *Elaeagnus angustifolia* (18–22), *T. ramosissima* – *Ribes aureum* (23–25), *T. ramosissima* – *Artemisia santonica* (26–73), *T. ramosissima* – *Artemisia lerchiana* (74–77), *T. ramosissima* – *Artemisia taurica* (78–79), *T. ramosissima* – *Artemisia austriaca* (80–81), *T. ramosissima* – *Carex stenophylla* (82), *T. ramosissima* – *Alhagi pseudalhagi* (83–84), *T. ramosissima* – *Limonium platyphyllum* (85–86), *T. ramosissima* – *Elytrigia repens* (87–91), *T. ramosissima* – *Festuca valesiaca* (92), *T. ramosissima* – *Puccinellia gigantea* (93–96), *T. ramosissima* – *Aeluropus littoralis* (97), *T. ramosissima* – *Phragmites australis* (98–118), *T. ramosissima* – *Poa bulbosa* (119–121), *T. ramosissima* – *Bolboschoenus maritimus* (122–123), *T. ramosissima* – *Petrosimonia oppositifolia* (124–134), *T. ramosissima* – *Salicornia perennans* (135–145), *T. ramosissima* – *Suaeda salsa* (146–155), *T. ramosissima* – *Anisantha tectorum* (156–158)

Рис. 2. Ординация NMDS-сообществ *Tamarix ramosissima*  
 / Fig. 2. Ordination of NMDS-communities *Tamarix ramosissima*

### Распределение ионов солей под сообществами *Tamarix ramosissima*

Известно, что тамариксы (*Tamarix* spp) являются фреатофитами, нуждающимися в обязательном питании грунтовыми водами. Их корневая система достигает грунтовых вод до 3 м и глубже [2, 4–6].

Нами были отобраны 32 пробы грунтовых вод под разными тамариковыми ценозами для определения приуроченности к ионам ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ) солей (табл. 2). Грунтовые воды колеблются на глубине от 0,5 до 3 м и глубже.



*Tamarix ramosissima* (1–17), *T. ramosissima* – *Elaeagnus angustifolia* (18–22), *T. ramosissima* – *Ribes aureum* (23–25), *T. ramosissima* – *Artemisia santonica* (26–73), *T. ramosissima* – *Artemisia lerchiana* (74–77), *T. ramosissima* – *Artemisia taurica* (78–79), *T. ramosissima* – *Artemisia austriaca* (80–81), *T. ramosissima* – *Carex stenophylla* (82), *T. ramosissima* – *Alhagi pseudalhagi* (83–84), *T. ramosissima* – *Limonium platyphyllum* (85–86), *T. ramosissima* – *Elytrigia repens* (87–91), *T. ramosissima* – *Festuca valesiaca* (92), *T. ramosissima* – *Puccinellia gigantea* (93–96), *T. ramosissima* – *Aeluropus littoralis* (97), *T. ramosissima* – *Phragmites australis* (98–118), *T. ramosissima* – *Poa bulbosa* (119–121), *T. ramosissima* – *Bolboschoemus maritimus* (122–123), *T. ramosissima* – *Petrosimonia oppositifolia* (124–134), *T. ramosissima* – *Salicornia perennans* (135–145), *T. ramosissima* – *Suaeda* spp (146–155), *T. ramosissima* – *Anisantha tectorum* 156–158

Рис. 3. Кластерная диаграмма сообществ *Tamarix ramosissima*  
 / Fig. 3. Cluster diagram of *Tamarix ramosissima* communities

Тамариковые ценозы на исследуемых нами водоёмах формируются при обязательном присутствии ионов хлора  $Cl^-$ , сульфата  $SO_4^{2-}$ , натрия  $Na^+$ , изредка карбоната  $HCO_3^-$ . Именно ион  $Cl^-$  является доминирующим под ценозами. Из 32 проб в 21 преобладает  $Cl^-$  (0,071–22,294 г/л) в таких сообществах, как сантоникопольно-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Artemisia santonica*), тамариковые (*Tamarix ramosissima*, *Tamarix ramosissima* – *Tamarix laxa*), тростниково-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Phragmites australis*), солеросово-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Salicornia perennans*) и сведово-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Suaeda salsa*).

Преобладание ионов  $SO_4^{2-}$  (0,01–14,52 г/л) отмечено под петросимониево-тамариковыми (*Tamarix ramosissima* – *Petrosimonia oppositifolia*) и бескильницево-тамариковыми (*Tamarix ramosissima* – *Puccinellia gigantea*) ценозами.

Практически равное количество ионов  $Cl^-$  и  $SO_4^{2-}$  отмечается в тамариковых (*Tamarix ramosissima*), некоторых солеросово-тамариковых (*Salicornia perennans*), кострово-тамариковых (*Tamarix ramosissima* – *Anisantha tectorum*) сообществах.

Ионы  $Na^+$  (0,014–26,176 г/л) не являются преобладающими, однако их наличие значительно практически под каждым тамариковым сообществом. Лишь в ценозе *Tamarix ramosissima* отмечено присутствие иона  $Na^+$ , в 2,5 раза превышающее показатели ионов хлора и сульфата.

Остальные ионы не являются преобладающими. Их варьирование колеблется от 0 до 1 г/л. Изредка могут достигать до 2 г/л.

Таблица 2 / Table 2

Ионы солей под сообществами *Tamarix ramosissima* / Salt ions under *Tamarix ramosissima* communities

№ пробы	Сообщество	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Сумма солей, г/л
1	<i>Tamarix ramosissima</i>	4,686	3,048	0,482	0,8	0,732	2,355	12,103
2	<i>Tamarix ramosissima</i>	15,762	14,52	0,848	0,86	2,403	11,96	46,369
3	<i>Tamarix ramosissima</i>	7,306	7,296	1,312	0,962	0,844	26,176	23,753
4	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Tamarix laxa</i>	1,136	1,128	0,519	0,26	0,18	0,828	4,051
5	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Tamarix laxa</i>	1,163	0,456	0,519	0,23	0,126	0,644	3,111
6	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Artemisia santonica</i>	0,142	0,432	0,616	0,350	0,060	0,014	1,614
7	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Artemisia santonica</i>	0,071	0,012	0,396	0,060	0,012	0,109	0,660
8	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Artemisia santonica</i>	22,294	1,56	0,305	2,07	1,122	10,776	38,127
9	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Artemisia santonica</i>	16,472	6	0,494	1,01	1,866	9,142	31,957
10	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Artemisia santonica</i>	13,774	1,92	0,421	1,45	1,23	5,985	24,789
11	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Artemisia santonica</i>	17,608	1,872	0,549	1,36	1,536	8,004	30,929
12	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Artemisia santonica</i>	8,946	0,168	0,525	1,030	0,642	3,659	14,970
13	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Artemisia santonica</i>	12,709	8,976	0,439	1,15	1,77	7,986	33,03
15	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Artemisia santonica</i>	1,42	2,688	0,482	0,35	0,228	1,55	6,718
15	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Artemisia santonica</i>	8,264	2,88	0,634	0,52	0,768	4,904	17,97
16	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Phragmites australis</i>	2,272	3,456	0,360	0,600	0,234	2,125	9,047
17	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Phragmites australis</i>	1,448	0,6	0,604	0,15	0,102	1,086	3,99
18	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Phragmites australis</i>	4,828	5,232	1,141	0,73	0,972	3,363	16,265
19	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Phragmites australis</i>	6,319	4,032	1,531	0,78	0,864	4,05	17,576
20	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Phragmites australis</i>	5,155	4,296	0,763	0,88	0,084	4,513	15,69
21	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Elytrigia repens</i>	0,639	1,296	0,409	0,55	0,168	0,235	3,297
22	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Elytrigia repens</i>	2,85	0,355	0,864	-	0,35	0,3	2,834
23	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Puccinellia gigantea</i>	5,183	7,2	1,061	0,62	2,64	1,438	18,145
24	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Salicornia perennans</i>	8,094	4,560	0,604	0,890	0,996	4,724	19,868
25	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Salicornia perennans</i>	3,479	3,744	0,262	0,38	0,504	2,744	11,113
26	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Salicornia perennans</i>	12,141	7,92	1,086	0,86	1,8	7,631	31,438
27	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Salicornia perennans</i>	3,692	0,12	0,702	0,38	0,312	1,679	6,885
28	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Suaeda salsa</i>	4,473	3,600	0,464	0,360	0,408	3,602	12,907
29	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Suaeda salsa</i>	9,23	6,312	0,488	1,25	0,348	7,084	24,712
30	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Petrosimonia oppositifolia</i>	1,704	4,704	0,897	0,500	0,564	2,040	10,409
31	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Petrosimonia oppositifolia</i>	4,824	7,597	0,805	0,42	0,822	5,479	19,947
32	<i>Tamarix ramosissima</i> – <i>Anisantha tectorum</i>	4,118	4,728	0,5	0,71	0,786	2,813	13,673

## Зональные особенности тамариковых сообществ

Тамариковые (*Tamarix ramosissima*) сообщества в Калмыкии, на Прикаспийской низменности, распределены с севера на юг и юго-восток по сети Сарпинских озер (Цаган-Нур) в степной зоне и по сети Меклетинских и Состинских озер (Келтрикан, Киркита) в пустынной зоне. Кроме этого, сообщества сосредоточены близ дельты Волги (Красинское) и на приморской равнине Каспийского моря. По возвышенности Ергени (Аршань-Зельмень) обычны по краю мелких водоёмов между балочными системами (рис. 1).

Несмотря на схожесть тамариковых ценозов в пустынной и степной зонах, нами отмечены различия в распространении ценозов и в их видовом составе.

И в пустынной, и в степной зонах встречаются полукустарничково-тамариковые (*Tamariceta ramosissima suffruticulosa*) ценозы – сантоникопольно-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Artemisia santonica*) и лерхопально-тамариковые (*Tamarix ramosissima* – *Artemisia lerchiana*).

Злаково-тамариковые (*Tamariceta ramosissima graminosa*) сообщества, такие как тростниково-тамариковые (*Tamarix ramosissima – Phragmites australis*), характерны для всех водоёмов. Однако они зависят от полноводности и близости грунтовых вод. Мятликово-тамариковые (*Tamarix ramosissima – Poa bulbosa*) ценозы формируются при сбое практически повсеместно. Петросимониево-тамариковые (*Tamarix ramosissima – Petrosimonia oppositifolia, T. ramosissima – Petrosimonia brachiata*) сообщества обычны практически для всех водохранилищ. Они образуют сочетания и комплексы со сведово-тамариковыми (*Tamarix ramosissima – Suaeda salsa*) ценозами. Реже встречаются лохово-тамариковые (*Tamarix ramosissima – Elaeagnus angustifolia*) ценозы. Обилие *Elaeagnus angustifolia* увеличивается близ дельты Волги (вдхр. Красинское).

В пустынной зоне наиболее часто встречаются сообщества тамариковых (*Tamarix ramosissima – Tamaix laxa*), таврическопольнно-тамариковых (*Tamarix ramosissima – Artemisia taurica*) и солеросово-тамариковых (*Tamarix ramosissima – Salicornia perennans*) ассоциаций. Однако они могут встречаться реже и в степной зоне. Ажреково-тамариковые (*Tamarix ramosissima – Aeluropus littoralis*) ценозы отмечены изредка.

Для степной зоны преимущественно характерны ценозы бескильничево-тамариковых (*Tamarix ramosissima – Puccinellia gigantea*) и типчаково-тамариковых (*Tamarix ramosissima – Festuca valesiaca*) ассоциаций. Редко встречаются в пустынной зоне. Клубнекамышево-тамариковые (*Tamarix ramosissima – Bolboschoenus maritimus*) сообщества встречены нами только на возвышенности Ергени по берегу водоёма Аршань-Зельмень.

В сообществах формации *Tamariceta ramosissima* принимают участие 183 вида высших сосудистых растений.

В обеих зонах экотонных систем водоёмов в ценозах равномерно встречаются такие полукустарнички, как *Artemisia santonica, Artemisia lerchiana, Halimione verrucifera, Kochia prostrata*. Среди злаков обычны корневищные *Phragmites australis, Puccinellia gigantea*, эфемероид *Poa bulbosa* и рыхлодерновинный *Aeluropus littoralis*. Из однолетников обычны *Petrosimonia oppositifolia, Petrosimonia brachiata, Soda acutifolia*. В северной части пустынной зоны отмечены полукустарничек *Camphorosma monspeliaca* и однолетник *Suaeda salsa*.

Для тамариковых ценозов степной зоны характерны злаки: плотнодерновинный *Festuca valesiaca*; корневищные *Elytrigia repens, Leymus ramosus*. Из полукустарничков встречаются *Artemisia austriaca, Limonium suffruticosum*. В кронах тамариков обильны виды подмаренников (*Galium humifusum, Galium ruthenicum, Galium verum*). Среди однолетников встречаются *Spergularia salina, Salsola tamariscina* и др.

В пустынной зоне в сообществах принимают участие такие полукустарнички, как *Caroxylon dendroides* и *Kalidium foliatum*, из многолетников – *Zygophyllum fabago*. Среди кустарников изредка присутствует *Nitraria schoberi*. Характерны и однолетники: *Suaeda acuminata, Suaeda altissima, Climacoptera crassa* и др. На песчаных почвах в ценозах может встречаться дерновинный злак *Festuca beckeri* и виды *Astragalus* spp.

### Заключение

Формация *Tamariceta ramosissima* состоит из 5 классов ассоциаций и 23 ассоциаций. Тамариковые (*Tamarix ramosissima*) сообщества встречаются по берегам всех исследуемых нами водоёмов – Аршань-Зельмень, Чограй, Цаган-Нур, Деед-Хулсун, Келтрикан, Киркита, Красинское. Они образуют полосы во флуктуационном, динамическом и дистантном блоках экотонных систем.

Сообщества *Tamarix ramosissima* северных водоёмов (Аршань-Зельмень, Цаган-Нур) являются наиболее разнообразными по фитоценолотическому и видовому составу. Самый представительный – злаково-тамариковый (*Tamariceta ramosissima graminosa*) класс ассоциаций, который образуют ценозы *Tamarix ramosissima – Festuca valesiaca, Tamarix ramosissima – Elytrigia repens* и *Tamarix ramosissima – Puccinellia gigantea*.

На экотонах водоёмов юга региона – Деед-Хулсун, Келтрикан, Киркита, Красинское – преимущественно доминируют сообщества *Tamarix ramosissima – Tamarix laxa, Tamarix ramosissima – Artemisia taurica, Tamarix ramosissima – Suaeda acuminata*.

Грунтовые воды под сообществами залегают на глубине от 0,5 до 3 м. Тип засоления под ценозами преимущественно сульфатно-хлоридный и хлоридно-сульфатный, реже может быть натриевый и карбонатный.

Видовой состав формации представлен 183 высшими сосудистыми растениями. Из них кустарников – 4 вида, полукустарничков – 15, злаков – 21, многолетнего разнотравья – 43 и одно- и двулетников – 100 видов. Главную ценообразующую роль играют кустарники, полукустарнички, злаки и однолетники.

#### Список источников

1. Левина Ф.Я. Растительность полупустынь Северного Прикаспия и её кормовое значение. Л.: Наука, 1964. 327 с.
2. Русанович И.И. Тамариксы Нижнего Поволжья // Бюл. Гл. бот. сада. 1995. Вып. 171. С.81–89.
3. Лактионов А.П. Флора Астраханской области. Астрахань: Астраханский ун-т, 2009. 296 с.
4. Уланова С.С. Эколого-географическая оценка искусственных водоёмов Калмыкии и экотонных систем вода – суша на их побережьях. М.: Ин-т водных проблем РАН, 2010. 263 с.
5. Магомедов М.М.-Р., Магомедов М.-Р.Д., Гасанова С. М. Ценотическая роль тамариковых сообществ прибрежных экосистем Северо-Западного Каспия // Вестн. Дагестанского науч. центра. 2011. № 40. С. 24–29.
6. Ясулбутаева И.В., Магомедов М.М.-Р. Биологическая активность почв экотонных сообществ тамариковых зарослей Северо-Западного Прикаспия // Юг России: экология, развитие. География и геоэкология. 2011. № 2. С. 109–114.
7. Бакташева Н.М. Конспект флоры Калмыкии. Элиста: Калмыцкий ун-т, 2012. 112 с.
8. Рухленко И.А. К вопросу о синтаксономии кл. *Nerio-Tamariceta* на территории бывшего СССР // Вестн. Волжского ун-та им. В.Н. Татищева. 2012. № 4(13). С. 100–104.
9. Флора Нижнего Поволжья / под ред. Н.М. Решетниковой. М.: Товарищество науч. изданий КМК, 2018. Ч. 2. 519 с.
10. Залетаев В.С. Структурная организация экотонов в контексте управления // Экотоны в биосфере. М.: РАСХН, 1997. С. 11–30.
11. Полевая геоботаника / под общ. ред. Е.М. Лавренко, А.А. Корчагина. М.; Л.: Наука, 1964. Т. 3. 442 с.
12. Неиштаев Ю.Н. Методы анализа геоботанических материалов. Л.: Ленинградский ун-т, 1987. 192 с.
13. Александрова В.Д. Классификация растительности. Л.: Наука, 1969. 275 с.
14. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья, 1995. 495 с.
15. Неиштаев Ю.Н. Проект Всероссийского кодекса фитоценотической номенклатуры // Растительность России. 2001. № 1. С. 62–70.
16. Серебрякова Т.И., Воронин Н.С., Еленевский А.Г., Батыгина Т.Б., Шорина Н.И., Савиных Н.П. Ботаника с основами фитоценологии: анатомия и морфология растений. М.: Академкнига, 2006. 543 с.
17. Bray J.R., Curtis J.T. An ordination of upland forest communities of southern Wisconsin // Ecological monographs. 1957. Vol. 27, № 4. P. 325–349.
18. Hammer Q. Past Paleontological Statistics. Reference manual. Oslo: University of Oslo, 2017. 257 p.
19. Борликов Г.М., Бананова В.А. Природное районирование российского Прикаспия и перспективы его освоения // Экол.-геогр. вестн. Юга России. 2001. № 3–4. С. 33–41.
20. Сафронова И.Н., Юрковская Т.К. Зональные закономерности растительного покрова равнин Европейской России и их отображение на карте // Бот. журн. 2015. Т. 100, № 11. С. 1121–1141.

#### References

1. Levina F.Ya. *Vegetation of the semi-deserts of the Northern Caspian Sea and its forage value*. Leningrad: Nauka Publ.; 1964. 327 p. (In Russ.).
2. Rusanovich I.I. Tamarisks of the lower Volga region. *Bul. Glavnogo botanicheskogo sada = Bulletin of the Main Botanical Garden*. 1995;(171):81-89. (In Russ.).
3. Laktionov A.P. *Flora of the Astrakhan region*. Astrakhan: Astrakhan University Press; 2009. 296 p. (In Russ.).
4. Ulanova S.S. *Ecological and geographical assessment of artificial reservoirs of Kalmykia and ecotone systems water-land on their coasts*. Moscow: Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences Press; 2010. 263 p. (In Russ.).
5. Magomedov M.M.-R., Magomedov M.-R. D., Gasanova S. M. The cenotic role of Tamarix communities in the coastal ecosystems of the Northwestern Caspian Region. *Vestnik Dagestanskogo nauchnogo tsentra = Bulletin of the Dagestan Scientific Center*. 2011;(40):24-29. (In Russ.).
6. Yasulbutaeva I.V., Magomedov M.M.-R. Biological activity of soils of ecotonic communities of Tamarix thickets of the Northwestern Caspian Sea. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie. Geographiya i geoekologiya = The South of Russia: Ecology, Development. Geography and Geoecology*. 2011;(2):109-114. (In Russ.).

7. Baktasheva N.M. *Summary of the flora of Kalmykia*. Elista: Kalmyk University Press; 2012. 112 p. (In Russ.).
8. Rukhlenko I.A. On syntaxonomy of Nerio-Tamaricetea in the former USSR. *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V. N. Tatishcheva = Bulletin of the Tatishchev Volga State University*. 2012;(4):100-104. (In Russ.).
9. Reshetnikova N.M., ed. *Flora of the Lower Volga region*. Moscow: The Association of scientific publications of the KMK Publ.; 2018. Part 2. 519 p. (In Russ.).
10. Zaletaev V.S. The structural organization of ecotones in the context of management. *Ecotones in the Biosphere*. Moscow: Russian Academy of Agricultural Sciences Press; 1997:11-30. (In Russ.).
11. Lavrenko E.M., Korchagin A.A., eds. *Field geobotany*. Moscow, Leningrad: Nauka Publ.; 1964. Vol. 3. 442 p. (In Russ.).
12. Neshataev Yu.N. *Methods of analysis of geobotanical materials*. Leningrad: Leningrad University Press; 1987. 192 p. (In Russ.).
13. Aleksandrova V.D. *Vegetation classification*. Leningrad: Nauka Publ.; 1969. 275 p. (In Russ.).
14. Cherepanov S.K. *Vascular plants of Russia and neighboring countries (within the former USSR)*. Saint Petersburg: Mir i sem'ya Publ.; 1995. 495 p. (In Russ.).
15. Neshataev Yu.N. The project of the All-Russian code of phytocoenological nomenclature. *Rastitel'nost' Rossii = Vegetation of Russia*. 2001;(1):62-70. (In Russ.).
16. Serebryakova T. ., Voronin N.S., Elenevskii A.G., Batygina T.B., Shorina N.I., Savinykh N.P. *Botany with the basics of phytocenology: anatomy and morphology of plants*. Moscow: Akademkniga Publ.; 2006. 543 p. (In Russ.).
17. Bray J.R., Curtis J.T. An ordination of upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecological monographs*. 1957;27(4):325-349.
18. Hammer Q. *Past Paleontological Statistics*. Reference manual. Oslo: University of Oslo, 2017. 257 p.
19. Borlikov G.M., Bananova V.A. Natural zoning of the Russian Caspian Sea and prospects for its development. *Ekologo-geograficheskii vestnik Yuga Rossii = Ecological and Geographical Bulletin of the South of Russia*. 2001;(3-4):33-41. (In Russ.).
20. Safronova I.N., Yurkovskaya T.K. Zonal regularities of vegetation cover on plains of the European Russia and their cartographic representation. *Botanicheskii zhurnal = Botanical Journal*. 2015;100(11):1121-1141. (In Russ.).

#### **Информация об авторах**

И.А. Горяев – кандидат биологических наук, научный сотрудник, лаборатория общей геоботаники.  
С.С. Уланова – кандидат географических наук, заведующая отделом экологических исследований.

#### **Information about the authors**

I.A. Goryaev – Candidate of Science (Biology), Researcher, Laboratory of General Geobotany.  
S.S. Ulanova – Candidate of Science (Geography), Head of the Department of Environmental Research.

Статья поступила в редакцию 19.05.2024; одобрена после рецензирования 01.07.2024; принята к публикации 16.10.2024.  
The article was submitted 19.05.2024; approved after reviewing 01.07.2024; accepted for publication 16.10.2024.



Научная статья  
УДК 911.6:379.85 (502.3)  
doi: 10.18522/1026-2237-2024-4-2-43-48

## ТУРИСТСКО-РЕКРЕАЦИОННОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

**Хава Шахидовна Забураева**

Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Грозный, Чеченская Республика, Россия  
eveggne@mail.ru

**Аннотация.** На основе комплексного исследования выполнено туристско-рекреационное районирование территории Чеченской Республики, учитывающее особенности географического положения, ландшафтную структуру, наличие туристско-рекреационного потенциала, обеспеченность транспортной инфраструктурой и пространственную организацию региональной рекреационной сети. В работе использовались методы анализа, синтеза, контент-анализа, статистический, сравнительный и картографический. Разработана карта-схема предлагаемого районирования. Для каждого туристско-рекреационного района выделены наиболее значимые объекты туризма и рекреации и обоснованы приоритетные направления развития отрасли. Минимальное разнообразие ресурсов и слабая рекреационная освоенность обнаружены в низменном (полупустынном) районе. В числе перспективных направлений здесь отмечены научно-познавательный, спортивный (рыболовный и охотничий) и оздоровительный туризм. Наиболее широкий спектр перспективных видов туризма в регионе выявлен в горном и высокогорном районах, характеризующихся высоким ландшафтным и биологическим разнообразием. К ним отнесены научно-познавательный, культурно-исторический, этнокультурный, геологический, экстремальный, спортивный (горнолыжный, спелеотуризм, рафтинг, охотничий, фотоохота), оздоровительный (терренкур), лечебный (климатотерапия, фитотерапия) и др. Среди лимитирующих факторов развития туризма в данных районах выделена низкая транспортная доступность.

**Ключевые слова:** туристско-рекреационный район, районирование, туризм, рекреация, потенциал, предпосылки

**Для цитирования:** Забураева Х.Ш. Туристско-рекреационное районирование Чеченской Республики // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 4-2. С. 43–48.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

## TOURIST AND RECREATIONAL ZONING OF THE CHECHEN REPUBLIC

**Khava Sh. Zaburaeva**

Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Chechen Republic, Russia  
eveggne@mail.ru

**Abstract.** On the basis of a comprehensive study, the tourism and recreation zoning of the territory of the Chechen Republic was carried out, taking into account the peculiarities of its geographical location, landscape structure, tourist and recreational potential, transport infrastructure and spatial features of the region's recreational network. The methods of analysis, synthesis, content analysis, statistical, comparative and cartographic methods were used in the work. The map-scheme of the proposed zoning was developed using CorelDRAW. For each tourist and recreational district the most significant objects of tourism and recreation are identified and the priority directions of tourism and recreation industry development are substantiated. Minimal diversity of tourist

---

© Забураева Х.Ш., 2024

and recreational resources and weak recreational development is found in the lowland (semi-desert) district. Among the promising types of tourism there are scientific-cognitive, sports (fishing and hunting) and health tourism. The widest range of promising types of tourism in the region is identified in the mountainous and high-mountainous areas characterized by high landscape and biological diversity. These include scientific and cognitive, cultural and historical, ethno-cultural, geological, extreme, sports (skiing, speleotourism, rafting, hunting, photo-hunting), health-improving (terrenekur), therapeutic (climatotherapy, phytotherapy) and others. Among the limiting factors of tourism development in these areas is low transport accessibility.

**Keywords:** tourist and recreational area, zoning, tourism, recreation, potential, prerequisites

**For citation:** Zaburaeva Kh.Sh. Tourist and Recreational Zoning of the Chechen Republic. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(4-2):43-48. (In Russ.).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

## Введение

Туристско-рекреационное районирование – актуальная и трудоемкая задача в условиях туристских дестинаций, имеющая важное научное и прикладное значение для эффективного территориального планирования и управления развитием туристско-рекреационного комплекса региона. Вопросам районирования посвящен широкий пласт научной отечественной [1, 2] и зарубежной [3, 4] литературы.

Чеченская Республика (ЧР) демонстрирует успешное формирование имиджа конкурентоспособной туристско-рекреационной дестинации, благодаря наличию богатого природно-рекреационного и культурно-исторического потенциала. Здесь наблюдается неуклонный рост туристских потоков. К примеру, в 2022 г. он составил 306 тыс. чел., превысив аналогичный показатель 2015 г. в 5 раз [5].

Несмотря на глубокую теоретико-методологическую проработку обсуждаемых вопросов, единой универсальной системы туристско-рекреационного районирования не существует. Разработано множество критериев в зависимости от характера физико-географических условий, потенциала территорий, степени освоенности и иных особенностей туристской дестинации. При этом у разных авторов прослеживается индивидуальный подход к выделению определенного набора критериев. Наряду с традиционными общегеографическими принципами и подходами, которыми руководствуются при районировании, необходимо учитывать специфику исследуемой территории. Особенно в условиях горных территорий, что подтверждает отечественный и зарубежный опыт районирования [3, 6–8].

## Материалы и методы исследования

Туристско-рекреационное районирование территории ЧР выполнено в пределах границ муниципальных районов. При районировании учитывались особенности географического положения, ландшафтная структура, наличие туристско-рекреационного потенциала, обеспеченность транспортной инфраструктурой, пространственная организация региональной рекреационной сети.

Многие из этих показателей нами анализировались в предыдущих исследованиях [9–11]. К примеру, транспортная доступность определялась по плотности дорожной сети на единицу площади, анализ рекреационной сети проводился на основе оценки размещения рекреационных учреждений (санатории, базы отдыха, реабилитационные центры, детские санатории и оздоровительные лагеря). В данной работе выполнено обобщение полученных ранее результатов в виде карты-схемы районирования. Применялся комплекс методов, включая анализ и синтез, контент-анализ, сравнительный, статистический и картографический.

Оценка биоразнообразия осуществлялась по количеству видов животных и растений, занесенных в Красную книгу ЧР. Историко-культурное наследие оценивалось по количеству памятников, занесенных в Единый государственный реестр объектов культурного наследия народов РФ. В числе особо охраняемых природных объектов учитывались объекты различного происхождения (гидрологические, ботанические, палеогеоморфологические и др.), имеющие статус памятников природы регионального значения.

### Результаты и их обсуждение

Несмотря на сложившееся разнообразие подходов к туристско-рекреационному районированию, главным критерием его реализации исследователями признается локализация ресурсного потенциала, который определяет развитие тех или иных видов туризма и рекреации. Общность районообразующих признаков и характера рекреационного использования местности позволила выделить в ЧР четыре туристско-рекреационных района (ТРР) (рисунок).

Низменный (полупустынный) ТРР включает три муниципальных района (таблица).



Муниципальные районы: 1 - Наурский; 2 - Шелковской; 3 - Надтеречный; 4 - Грозненский; 5 - Серноводский; 6 - Гудермесский; 7 - Урус-Мартановский; 8 - Ачхой-Мартановский; 9 - Шалинский; 10 - Курчалойский; 11 - Ножай-Юртовский; 12 - Веденский; 13 - Шатойский; 14 - Итум-Калинский; 15 - Шаройский

Туристско-рекреационное районирование Чеченской Республики  
 / Tourist and recreational zoning of the Chechen Republic

#### Характеристика ТРР / Characteristics of tourist and recreational districts

Тип ТРР	Муниципальный район	Биоразнообразие (флора/фауна), шт.	ПП	ПИКН	КСР	БО/ТБ
I	Наурский	20/29	2	23	1	0
	Шелковской	15/78	4	23	2	0
	Надтеречный	25/24	1	11	1	0
II	Серноводский	26/22	2	9	1	0
	Грозненский	34/41	2	49	35	2
	Гудермесский	22/19	6	17	4	0
	Урус-Мартановский	29/47	6	6	1	0
	Ачхой-Мартановский	40/36	2	97	1	1
	Шалинский	21/36	1	17	2	0
	Курчалойский	20/19	0	7	2	0
III	Ножай-Юртовский	19/31	3	32	2	3
	Веденский	46/51	4	35	2	1
	Шатойский	45/45	6	21	1	2
IV	Итум-Калинский	66/76	2	341	1	2
	Шаройский	39/34	0	62	1	0

**Примечание.** ПП – памятники природы регионального значения; ПИКН – памятники историко-культурного наследия; КСР – коллективные средства размещения; БО/ТБ – базы отдыха/туристические базы.

Большая часть территории района расположена в зоне полупустынь. Это наименее обеспеченный туристско-рекреационными ресурсами район ЧР, для которого также характерен низкий уровень транспортной доступности и вовлеченности в туристско-рекреационную сферу.

Однако нельзя утверждать, что низменный район не представляет туристско-рекреационной ценности. Здесь расположены особо охраняемые природные территории (ООПТ) регионального значения: заказники (Степной и Парабочевский) и памятники природы (урочища «Степная жемчужина» и «Киссык», озера: Карьерное и Майорское и др.). Перспективные направления туризма: научно-познавательный, спортивный (рыболовный и охотничий), оздоровительный и др. В настоящее время данный район преимущественно привлекает местных рекреантов – любителей рыболовства, охоты и иных видов досуга.

*Равнинный ТРР* занимает центральную часть ЧР, преимущественно в степной и лесостепной зонах, захватывая горные леса на самом юге. Этот район также характеризуется наличием ООПТ (заказники: Брагунский, Аргунский, Шалинский, Урус-Мартановский, зеленая зона г. Грозного; памятники природы: место первой скважины, пробуренной в Грозненском нефтеносном районе, Ахчой-Мартановская сосновая роща и др.). На базе минеральных источников функционирует санаторий «Серноводск-Кавказский». Данный район отличается высоким уровнем транспортной доступности и обеспеченностью коллективными средствами размещения (гостиницы, hostels, гостевые дома и др.). Здесь сосредоточено свыше 50 % данных объектов. Историко-культурное наследие представлено многочисленными объектами (obelisks, памятники архитектуры, археологии, религиозного назначения и др.). Наиболее популярные туристические достопримечательности: культурно-религиозный комплекс «Сердце Чечни», комплекс высотных зданий «Грозный-Сити», православный храм Архангела Михаила и др. Здесь получили развитие познавательный, культурно-исторический, этнографический и другие виды туризма.

*Горный ТРР* преимущественно занимает зону горных лесов и лугов. Данный район обладает значительным туристско-рекреационным потенциалом ввиду высокого биоразнообразия, многочисленных памятников истории и культуры. Наличие ООПТ (Веденский заказник, памятники природы: нефтяной источник в долине р. Большой Ярык-Су, парк из липы кавказской, сосновый лес Макажевский, озеро Кезеной-Ам; водопады: Вашиндаройский, Харачойский, пещера Шеки-Хех) создает предпосылки для научно-познавательного туризма. Функционирует современный санаторно-реабилитационный центр им. Кунта-Хаджи Кишиева. Главная достопримечательность района – спортивно-туристический комплекс «Кезеной-Ам» (на базе одноименного озера), включая гостиницу (96 койко-мест), который привлекает как российских, так и иностранных туристов. В числе других известных туристических баз этого ТРР – «Беной» и «Ахки-Тай» в Ножай-Юртовском районе, «Нихалойские водопады» и «Биогорец» в Шатойском районе. Однако данный ТРР характеризуется транспортной доступностью ниже средней по региону.

Для *высокогорного ТРР* характерны ландшафты горно-лесного и горно-лугового высотных поясов в сочетании с нивальным. Здесь сосредоточены ООПТ (Советский заказник, памятники природы: роща березы Радде, Башинкалинский водопад и др.), функционирует всесезонный туристско-рекреационный комплекс Ведучи, памятники истории и культуры (башенные строения, склепы, городища и др.), мусульманские святыни [12]. Это создает предпосылки для разнообразных видов туризма и рекреации, включая научно-познавательный, культурно-исторический, этнокультурный, геологический, спортивный, экстремальный и др. Данный ТРР – наиболее труднодоступная территория ЧР.

В целом по уровню биоразнообразия – количеству видов растений и животных, занесенных в региональную Красную книгу, – лидируют горный и высокогорный ТРР. В этих ТРР обнаружена и максимальная концентрация объектов, включенных в Единый государственный реестр объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов РФ на территории ЧР. Большинство баз отдыха и туристических баз также расположено в условиях горных ландшафтов, обладающих высокой степенью туристической привлекательности. Однако туристическая инфраструктура в наибольшей степени развита в равнинном ТРР.

### Выводы

Туристско-рекреационное районирование позволило выявить особенности территориальной организации туристско-рекреационной деятельности и наиболее перспективные районы ЧР. По совокупности районообразующих критериев в пределах исследуемого региона выделено четыре ТРР: низменный (полупустынный), равнинный, горный и высокогорный.

Данные районы отличаются также набором приоритетных направлений туризма и рекреации. Наименьшая обеспеченность туристско-рекреационным потенциалом, низкий уровень транспортной доступности и рекреационной освоенности обнаружены в низменном (полупустынном) районе. Тем не менее здесь имеются предпосылки для развития таких направлений туризма, как научно-познавательный, спортивный (рыболовный и охотничий), оздоровительный и др. Для равнинного ТРР характерны максимальная обеспеченность коллективными средствами размещения и высокий уровень транспортной доступности. Развиты преимущественно познавательный, культурно-исторический и этнографический виды туризма. Наиболее широкий спектр перспективных видов туризма в регионе выявлен в горном и высокогорном ТРР, характеризующихся низкой транспортной доступностью.

Полученные результаты могут способствовать решению текущих задач развития туристической отрасли и найти применение при разработке стратегии развития туризма в ЧР.

#### Список источников

1. Крыстев В.К. Туристское районирование: дискурс о методе // Вестн. Московского ун-та. Серия 5: География. 2019. № 5. С. 50–59.
2. Исаченко Т.Е. Подходы к оценке пространственной организации рекреации и туризма на различных территориальных уровнях // Изв. РГО. 2022. Т. 154, № 3. С. 47–65.
3. Mason P. *Zoning, land-use planning and tourism*. London: Routledge, 2012. 624 p.
4. Li L., Feng R., Hou G., Xi J., Gao P., Jiang X. Integrating tourism supply-demand and environmental sensitivity into the tourism network identification of ecological functional zone // *Ecological Indicators*. 2024. Vol. 158. Art. 111505.
5. Чеченская Республика в цифрах (2023): краткий стат. сб. Грозный, Чеченстат, 2023. 156 с.
6. Зеленцов М.В., Старковская Е.О., Астанин Д.М. Эколого-ориентированное районирование горных туристских территорий: статика, структура, плотность и динамика // *Современное строительство и архитектура*. 2021. № 3. С. 26–32.
7. Lukoseviciute G., Pereira L.N., Panagopoulo T. The economic impact of recreational trails: a systematic literature review // *J. of Ecotourism*. 2022. Vol. 21, iss. 4. P. 366–393.
8. Агакишиева Г.Р. Туристско-рекреационное районирование горных регионов Азербайджана (на примере Шеки-Загатальского, Губа-Хачмазского и Горно-Ширванского экономико-географических районов) // *Современные проблемы сервиса и туризма*. 2023. Т. 17, № 1. С. 113–121.
9. Забураева Х.Ш., Алиева Х.А.-В., Шаитова А.А. Природные туристско-рекреационные ресурсы Северо-Восточного Кавказа // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2023. № 3. С. 100–105.
10. Забураева Х.Ш., Забураев Ч.Ш., Седиева М.Б. Оценка туристско-рекреационного потенциала регионов Северо-Восточного Кавказа // *Грозненский естественнонауч. бюл.* 2023. Т. 8, № 4 (34). С. 32–38.
11. Забураева Х.Ш., Забураев Ч.Ш., Седиева М.Б. Геологический и этнокультурный туризм: перспективы сопряженного развития на Северо-Восточном Кавказе // *Геология и геофизика Юга России*. 2023. Т. 13, № 2. С. 149–160.
12. Саидова Л.И., Исламова И.Р. Горнолыжный курорт Ведучи: современное состояние и особенности функционирования // *Уральский науч. вестн.* 2023. Т. 8, № 2. С. 49–55.

#### References

1. Krystev V.K. Touristic zoning: discourse on the method. *Vestnik Moskovskogo un-ta. Seriya 5: Geografiya = Moscow University Bulletin. Series 5, Geography*. 2019;(5):50-59. (In Russ.).
2. Isachenko T.E. Approaches to Assessing the Spatial Organization of Recreation and Tourism at various territorial levels. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva = Bulletin of the Russian Geographical Society*. 2022;154(3):47-65. (In Russ.).
3. Mason P. *Zoning, land-use planning and tourism*. London: Routledge; 2012. 624 p.
4. Li L., Feng R., Hou G., Xi J., Gao P., Jiang X. Integrating tourism supply-demand and environmental sensitivity into the tourism network identification of ecological functional zone. *Ecological Indicators*. 2024;158:111505.
5. *Chechen Republic in figures (2023)*: brief statistical collection. Grozny: Chechenstat Press; 2023. 156 p. (In Russ.).
6. Zelentsov M.V., Starkovskaya E.O., Astanin D.M. Eco-oriented zoning for mountain tourist areas: statics, structure, density and dynamics. *Sovremennoe stroitel'stvo i arkhitektura = Modern Construction and Architecture*. 2021;(3):26-32. (In Russ.).

7. Lukoseviciute G., Pereira L.N., Panagopoulo T. The economic impact of recreational trails: a systematic literature review. *Journal of Ecotourism*. 2022;21(4):366-393.
8. Agakishieva G.R. Zoning of the mountain regions of Azerbaijan for tourism and recreation: the case of Sheki-Zagatala, Guba-Khachmaz and Mountain-Shirvan economic and geographical regions. *Sovremennye problemy servisa i turizma = Modern Problems of Service and Tourism*. 2023;17(1):113-121. (In Russ.).
9. Zaburaeva Kh.Sh., Alieva Kh.A.-V., Shaipova A.A. Natural tourist and recreation resources of the North-Eastern Caucasus. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2023;(3):100-105. (In Russ.).
10. Zaburaeva Kh.Sh., Zaburaev Ch.Sh., Sedieva M.B. Assessment of tourist and recreational potential of the regions of the North-Eastern Caucasus. *Groznenskii estestvennonauchnyi byulleten' = Grozny Natural Science Bulletin*. 2023;8(4):32-38. (In Russ.).
11. Zaburaeva Kh.Sh., Zaburaev Ch.Sh., Sedieva M.B. Geological and ethnocultural tourism: prospects for interrelated development in the North-Eastern Caucasus. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. 2023;13(2):149-160. (In Russ.).
12. Saidova L.I., Islamova I.R. Ski resort "Veduchi": current state and features of functioning. *Ural'skii nauchnyi vestnik = Ural Scientific Bulletin*. 2023;8(2):49-55. (In Russ.).

#### **Информация об авторе**

*Х.Ш. Забуреева – доктор географических наук, главный научный сотрудник.*

#### **Information about the authors**

*Kh.Sh. Zaburaeva – Doctor of Science (Geography), Main Researcher.*

*Статья поступила в редакцию 20.05.2024; одобрена после рецензирования 17.07.2024; принята к публикации 16.10.2024.  
The article was submitted 20.05.2024; approved after reviewing 17.07.2024; accepted for publication 16.10.2024.*

---

Научная статья

УДК 551.582

doi: 10.18522/1026-2237-2024-4-2-49-58

## ИЗМЕНЕНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В РЕСПУБЛИКЕ КАЛМЫКИИ ЗА ПЕРИОД 1970–2020 ГОДОВ

**Олеся Владимировна Назаренко<sup>1✉</sup>, Дмитрий Николаевич Гарькуша<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup> Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>1</sup>ovnazarenko@sfedu.ru<sup>✉</sup>, ORCID: 0000-0001-8515-4241

<sup>2</sup>gardim@sfedu.ru, ORCID: 0000-0001-5026-2103

**Аннотация.** Республика Калмыкия относится к засушливым и водodefицитным регионам в европейской части России. Аридные ландшафты здесь отличаются наибольшей уязвимостью к трансформации климатических условий. Рассмотрено изменение метеорологических условий за 1970–2020 гг. Отмечается повышение температуры по региону. Среднегодовая температура в Элисте в 2000-х гг. выросла относительно температуры предыдущего периода на 0,9 °С, в Яшкеле – на 1–1,2 °С, в Лагани – на 1 °С. Зима в последнее десятилетие теплее многолетних данных на 0,6–0,9 °С, весна – на 0,5–1, лето – на 1,2–1,5, осень – на 0,1–0,2 °С. Выявлены особенности распределения среднегодового и среднемесячного количества атмосферных осадков: по мере нарастания континентальности климата количество осадков уменьшается с 366 до 221 мм. Анализ многолетних изменений осадков с 1970 по 2020 гг. показал, что в среднем наблюдается их повышение в Элисте и незначительное снижение в последнее десятилетие в Яшкеле и Лагани. Годовые осадки в Элисте увеличились с 315 (1970–1979 гг.) до 393 мм (2010–2019 гг.). Отмечается также повышение количества осадков в зимний (с 62 до 80 мм) и весенний сезоны (с 63 до 118 мм). Таким образом, отмечается значительное увеличение в весенний период. Летний период отличается повышением количества осадков в первые десятилетия и их снижением с 2000-х гг. Аналогичная ситуация с осенними осадками, которые достигли пика в 1990–1999 гг., а потом их количество значительно уменьшилось. В пустынной зоне произошло увеличение нормы годовых осадков (282 мм) по сравнению с многолетними данными (252 мм). Рост годовых осадков продолжается до 2009 г. (292 мм), а потом идет снижение (266 мм). Количество осадков в зимний период незначительно увеличивается. Аналогичная ситуация складывается с остальными сезонами: увеличение до 1990–1999 гг., после чего – спад. Однако летне-осенние осадки незначительно превышают норму.

**Ключевые слова:** изменение климата, осадки, температура, аридные условия, Калмыкия

**Для цитирования:** Назаренко О.В., Гарькуша Д.Н. Изменение метеорологических условий в Республике Калмыкии за период 1970–2020 годов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 4-2. С. 49–58.

**Благодарности:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00038, <https://rscf.ru/project/24-17-00038/>, в Южном федеральном университете.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

## CHANGES IN THE METEOROLOGICAL CONDITIONS IN REPUBLIC OF KALMYKIA IN 1970-2020

**Olesya V. Nazarenko<sup>1✉</sup>, Dmitriy N. Gar'kusha<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup> Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>1</sup>ovnazarenko@sfedu.ru<sup>✉</sup>, ORCID: 0000-0001-8515-4241

<sup>2</sup>gardim@sfedu.ru, ORCID: 0000-0001-5026-2103

© Назаренко О.В., Гарькуша Д.Н., 2024



**Abstract.** The Republic of Kalmykia is located in the arid and water-deficient regions of the European part of Russia. Arid landscapes are most vulnerable to changes in climatic conditions. Changes in meteorological conditions between 1970 and 2020 have been considered. There has been an increase in average annual temperature across the region. In Elista, the average temperature increased by 0.9 °C compared to the previous period; in Yashkul, it increased by 1 to 1.2 °C; and in Lagan, it was 1 °C. Winters have been warmer than average by 0.6 to 0.9 °C, springs by 0.5 to 1 °C, and summers by 1.2 to 1.5 °C. Autumn has seen the lowest temperatures, with a decrease of 0.1 to 0.2 °C. The distribution of average annual and monthly precipitation is revealed: as continentality increases, precipitation decreases from 366 mm to 221 mm. An analysis of long-term precipitation changes from 1970 to 2020 showed that on average there is an increase in precipitation in Elista and a slight decrease in the last decade in Yashkul and Lagan. Annual precipitation increased from 315 mm (1970–1979) to 393 mm (2010–2019) in Elista. There is also an increase in winter (62–80 mm) and spring precipitation (63–118 mm). Thus, the spring season has seen a significant increase. The summertime is characterized by increases in the first decade and decreases since the 2000s, with a similar pattern for autumn precipitation. Peak precipitation occurred in the 1990–1999 period, after which it decreased significantly. Desert areas saw an increase in annual rainfall rates (282 mm) compared to historical data (252 mm), which continued until 2009 at 292 mm before decreasing again at 266 mm. The amount of precipitation increases slightly in winter. The situation is similar for the rest of the seasons, with an increase until the 1990s, after which there is a decline. However, summer and autumn precipitation are slightly higher than average.

**Keywords:** climate change, precipitation, temperature, arid conditions, Kalmykia

**For citation:** Nazarenko O.V., Gar'kusha D.N. Changes in the Meteorological Conditions in Republic of Kalmykia in 1970–2020. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(4-2):49–58. (In Russ.).

**Acknowledgments:** the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 24-17-00038, <https://rscf.ru/project/24-17-00038/>, at the Southern Federal University.

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Республика Калмыкия относится к южным регионам России, которые испытывают значительное влияние сложных климатических условий, аридные ландшафты наиболее уязвимы к их трансформации. Это самый засушливый и вододефицитный регион в европейской части. Трансформация природных комплексов, спровоцированных климатическими изменениями, влияет на экономику регионов [1–14].

В настоящее время активно проводятся работы, направленные на оценку перемены климата и реакцию экосистем [1–22]. Отмечается, что при сокращении осадков и повышении температуры воздуха в тёплый период развивается аридизация климата [8–11]. Исследования показывают, что это приводит к увеличению количества засушливых дней, уменьшению осадков, учащению пыльных бурь, сокращению и исчезновению водных объектов [11–13]. В то же время в работе [14] отмечается, что в слабозасушливой и засушливой зонах юга Западной Сибири и сухой зоне в Северо-Западном Прикаспии отмечен рост увлажнения.

Подробная характеристика основных климатообразующих факторов, климатических районов, а также оценка изменения климата на территории Республики Калмыкии приводятся в [9–11, 19–23]. В настоящей работе рассматриваются особенности изменения увлажнения на территории Республики Калмыкии за период с 1970 по 2020 г. Исходными данными для оценки метеорологических условий послужили архивные данные Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных по среднемесячной температуре воздуха и сумме месячных осадков на метеорологических станциях Элиста, Яшкуль, Лагань [24, 25].

## Результаты и обсуждение

Анализ изменения метеопказателей проводился по трем метеостанциям Республики Калмыкии: Элиста, Яшкуль, Лагань за период 1986–2020 гг. Элиста расположена на границе Ергенинской возвышенности и Прикаспийской низменности на высоте 155 м. Яшкуль и Лагань находятся на Прикаспийской низменности на высотах –7 и –25 м соответственно. С точки зрения сельскохозяйственного районирования территория подразделяется на три зоны: западная, центральная (Элиста) и восточная (Яшкуль и Лагань). По условиям влагообеспеченности метеостанции находятся в условиях очень засушливого (Элиста) и сухого (Яшкуль, Лагань) климатического района.

Элиста расположена на границе очень засушливых умеренно-жаркого (ГТК 0,5–0,6, осадки теплого периода 190–220 мм, сумма активных температур 3250–3400 °С, безморозный период 160–180 дней, средняя температура 23,5–24,5 °С, средняя температура зимы –8...–8,5 °С) и жаркого (ГТК 0,5–0,7, осадки теплого периода 200–250 мм, сумма активных температур 3400–3600 °С, безморозный период 170–175 дней, средняя температура 24,5–25,5 °С, средняя температура зимы –6...–7 °С) агроклиматических подрайонов с умеренно суровой зимой [23].

Яшкуль находится в пределах сухого жаркого подрайона с умеренно суровой зимой. Для этого подрайона характерны следующие условия: ГТК 0,3–0,5, осадки теплого периода 130–165 мм, сумма активных температур 3400–3600 °С, безморозный период 165–180 дней, средняя температура 24,5–25,5 °С, средняя температура зимы –6...–8 °С [23].

Лагань лежит в рамках сухого очень жаркого подрайона с умеренно мягкой зимой. Для этого подрайона характерны следующие условия: ГТК 0,3–0,4, осадки теплого периода 120–130 мм, сумма активных температур более 3600 °С, безморозный период 180–200 дней, средняя температура 25,5–26,0 °С, средняя температура зимы –4...–5 °С [23].

В данной работе рассмотрены изменения метеорологических условий за период 1970–2020 гг. При исследовании динамики атмосферных осадков рассматривались их суммы за год, по сезонам.

Сначала рассмотрим данные температурного режима в Элисте (рис. 1), где отмечается повышение среднегодовой температуры воздуха. В 1970 г. этот показатель составлял 9,8 °С, а в 2020 г. – уже 11,5 °С, т.е. произошло повышение среднегодовой температуры воздуха на 1,7 °С. Среднегодовая температура воздуха за период 1970–2020 гг. составила 9,8 °С, отличие от климатической нормы 10,2 °С (1991–2020 гг.) – 0,4 °С. Средняя годовая температура имеет положительную тенденцию. За исследуемый промежуток времени наблюдались периодические понижения и повышения показателя. Так, зафиксированы самые низкие температуры – 7,3 °С (1987 г.), 7,6 (1976 г.) и 7,8 °С (1993 г.). Самым теплым стал 2007 г., когда температура составила 11,7 °С, что соответствует данным [1, 2]. Анализ изменения среднегодовых температур показал, что в 51 % случаев за период 1970–2020 гг. зафиксирована температура выше климатической нормы. С 2011 г. не отмечается среднегодовой температуры ниже нормы (10,1 °С). Наиболее высокие значения показателя наблюдаются в июле и августе (25,3 и 24,3 °С соответственно), а наиболее низкие температуры – в январе и феврале (–3,9 и –3,6 °С соответственно).

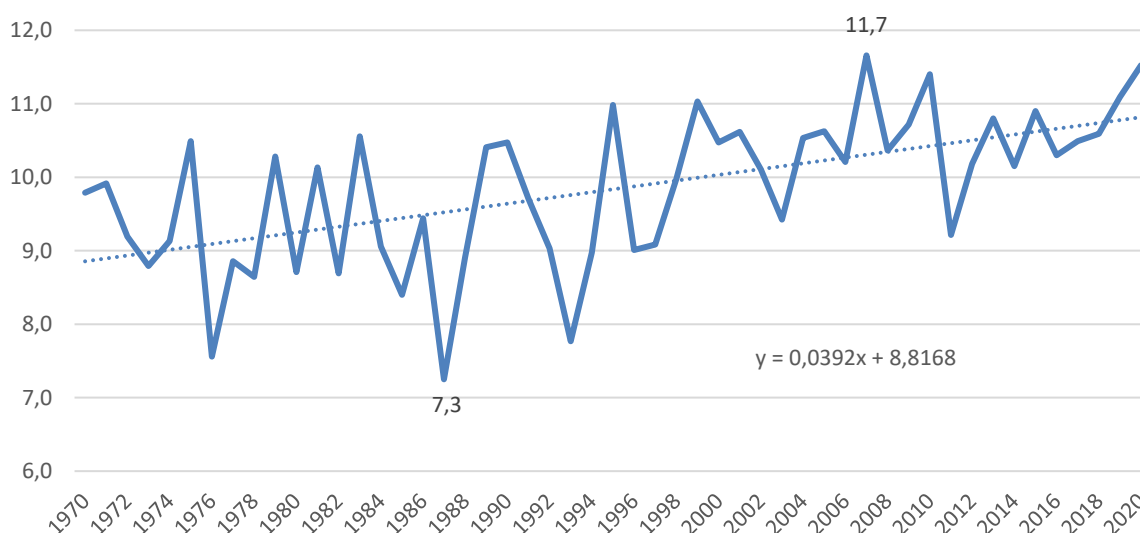


Рис. 1. Динамика среднегодовых температур воздуха, °С, за период 1970–2020 гг. (по [24]), г. Элиста  
/ Fig. 1. Dynamics of average annual temperature, °С, for the period 1970-2020 (due to [24]), Elista

Аналогичные тенденции в изменении температуры были выявлены для пунктов Яшкуль и Лагань (рис. 2, 3). В Яшкуле в 1970 г. средняя температура составляла 10,5 °С, а в 2020 г. – уже 12,7 °С, что на 2,2 °С выше. Среднегодовая температура воздуха за период 1970–2020 гг. составила 10,8 °С, отличие от современной климатической нормы (11,2 °С) – 0,4 °С. Средняя годовая температура имеет ярко выраженную положительную тенденцию. Самые низкие температуры,

как и в случае с Элистой, зафиксированы в 1987 (8,4 °С) и 1993 гг. (8,8 °С). Самыми теплыми стали 2020 и 2010 гг., когда температура составила 12,7 °С и 12,6 °С соответственно. Анализ изменения среднегодовых температур показал, что в 55 % случаев за период 1970–2020 гг. зафиксирована температура выше климатической нормы. С 2012 г. не отмечается среднегодовой температуры ниже нормы. Также следует отметить, что амплитуда между холодными и теплыми годами сократилась в 2000-х гг. Наиболее высокие значения показателя наблюдаются в июле и августе (26,5 и 25,2 °С соответственно), а наиболее низкие температуры – в январе и феврале (–3,1 и –2,9 °С соответственно).

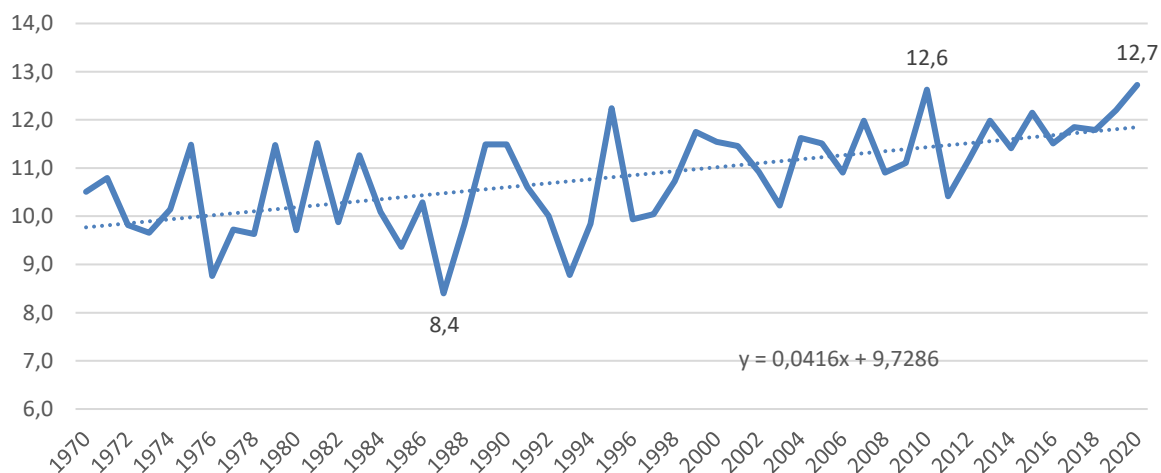


Рис. 2. Динамика среднегодовых температур воздуха, °С, за период 1970–2020 гг. (по [24]), Яшкуль / Fig. 2. Dynamics of average annual temperature, °С, for the period 1970-2020 (due to [24]), Yashkul

Город Лагань расположен на Прикаспийской низменности, в 9 км от побережья Каспийского моря. В 1970 г. среднегодовая температура составляла 10,6 °С, а в 2020 г. – 12,4 °С, произошло повышение на 1,8 °С. Средняя годовая температура имеет ярко выраженную положительную тенденцию. Самая низкая температура зафиксирована в 1993 и 1987 гг., она составила 9,22 °С и 9,36 °С. Самым теплым стал 2010 г., когда температура была 12,63 °С, и 2020 г. (12,4). В 53 % случаев за период 1970–2020 гг. отмечалась температура выше климатической нормы. С 2011 г. отмечается уменьшение амплитуды колебания среднегодовой температуры. Наиболее высокие значения показателя наблюдаются в июле и августе (25,7 и 24,4 °С соответственно), а наиболее низкие температуры – в январе и феврале (–2,3 и –2,03 °С соответственно). Таким образом, по данным рассмотренных метеостанций выявлено, что отмечается общая тенденция к повышению температуры.

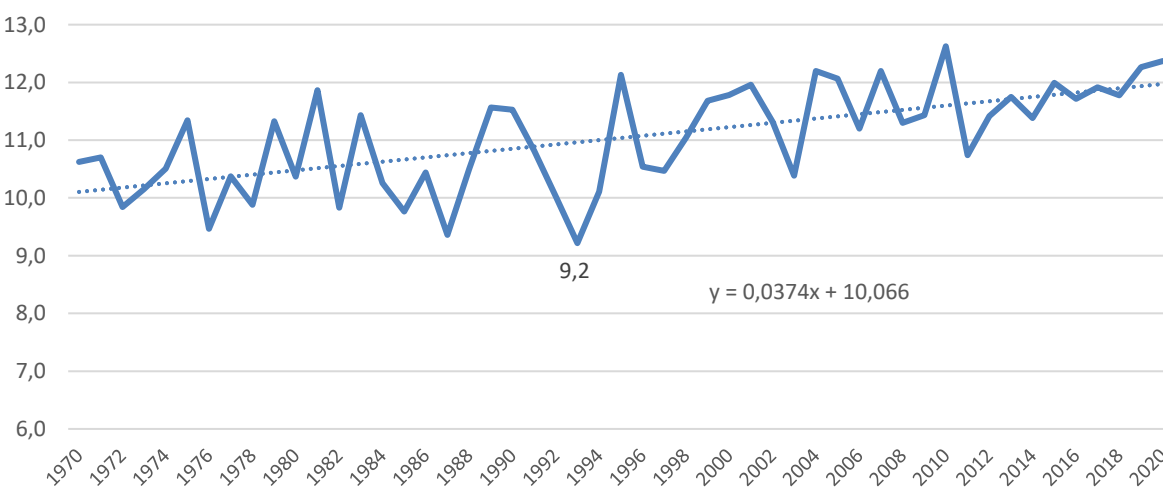


Рис. 3. Динамика среднегодовых температур воздуха, °С, за период 1970–2020 гг. (по [24]), Лагань / Fig. 3. Dynamics of average annual temperature, °С, for the period 1970-2020 (due to [24]), Lagan

Обобщенные данные представлены в табл. 1. Среднегодовая температура в Элисте относительно последнего десятилетия ниже на 0,7 °С. Для Яшкулья и Лагани эти значения составляют 0,9 и 0,8 °С. Зима в последнее десятилетие теплее многолетних данных на 0,6 – 0,9 °С, весна – на 0,5–1, лето – на 1,2–1,5, осень – на 0,1–0,2 °С.

Таблица 1 / Table 1

## Средние многолетние значения температуры воздуха, °С/ Average temperature, °C

Период	Год			Зима			Весна			Лето			Осень		
	Э	Я	Л	Э	Я	Л	Э	Я	Л	Э	Я	Л	Э	Я	Л
1970–1979	9,3	10,2	10,4	-5,2	-4,5	-3,3	9,7	10,7	10,5	22,9	24,2	23,5	9,6	10,5	10,9
1980–1989	9,2	10,2	10,5	-4,1	-3,4	-2,2	8,7	9,8	9,8	22,9	24,3	24	9,1	10,0	10,6
1990–1999	9,6	10,5	10,8	-3,7	-2,9	-2,2	9,4	10,4	10,3	23,2	24,4	23,9	9,5	10,3	11
2000–2009	10,5	11,2	11,6	-2,7	-2,1	-1,1	10,0	10,7	11	23,9	24,9	24,1	10,7	11,4	12,3
2010–2019	10,5	11,7	11,8	-3,1	-2,0	-1,4	10,3	11,7	11,5	24,9	26,4	25,4	9,9	10,9	11,5
<b>1970–2020</b>	<b>9,8</b>	<b>10,8</b>	<b>11,0</b>	<b>-3,7</b>	<b>-2,9</b>	<b>-2,0</b>	<b>9,6</b>	<b>10,7</b>	<b>10,6</b>	<b>23,6</b>	<b>24,9</b>	<b>24,2</b>	<b>9,8</b>	<b>10,7</b>	<b>11,3</b>
<b>1961–1990</b>	<b>9,3</b>	<b>10,2</b>	<b>10,5</b>	<b>-4,6</b>	<b>-3,8</b>	<b>-2,7</b>	<b>9,2</b>	<b>10,2</b>	<b>10,2</b>	<b>23,0</b>	<b>24,1</b>	<b>23,7</b>	<b>9,6</b>	<b>10,4</b>	<b>10,8</b>
<b>1991–2020</b>	<b>10,2</b>	<b>11,2</b>	<b>11,4</b>	<b>-3,2</b>	<b>-2,3</b>	<b>-1,5</b>	<b>9,9</b>	<b>10,9</b>	<b>10,9</b>	<b>24,1</b>	<b>25,3</b>	<b>24,5</b>	<b>10,1</b>	<b>10,9</b>	<b>11,6</b>

Примечание. Э – Элиста; Я – Яшкуль; Л – Лагань.

В условиях стабильно высоких температур особую важность в функционировании природных комплексов играют осадки. Важное влияние на их формирование оказывает внутриконтинентальное расположение, слаборасчлененная поверхность, антициклональный климат. Каспийское море не ослабляет континентальность климата [19].

Среднее количество осадков в Элисте составляет 385 мм, что соответствует настоящей климатической норме (1991–2020). Как 1986 г., так и 1972, 2020 гг. относятся к годам с самым низким количеством осадков – 243, 252 и 260 мм соответственно. Между ними количество осадков сильно варьировало. Выделяются 2020 и 2007 гг., которые были в числе самых сухих на юге ЕТР, в районе Элисты в этот год выпало 260 и 284 мм.

По данным [19], весна была очень короткой и перешла в лето в 2020 г. уже в марте, однако количество осадков было незначительно (около 3 мм). Максимальное количество осадков, которые носили преимущественно ливневой характер, в этот год выпало в мае и составило 62 мм. В августе и сентябре их не отмечалось.

Максимальное количество осадков пришлось на 2008 г., когда выпало 488 мм. Также выделяются 2013 г. (472 мм), 2004 г. (463 мм), 2001 г. (460 мм). Следует отметить, что с 2015 г. наблюдается постепенное уменьшение с 425 до 260 мм. Анализ показывает, что в 54 % количество осадков отмечалось выше, чем среднее и климатическая норма. Значимого тренда не наблюдается (рис. 4). Осадки выпадают неравномерно. Наибольшее количество – в тёплое время года, а именно в мае и июне (48 и 45 мм соответственно), наименьшее – в феврале и августе (21 и 25 мм). В остальное время варьирует около 32 мм.

Среднее количество атмосферных осадков в Яшкуле за период 1970–2020 гг. – 252 мм, что ниже настоящей климатической нормы (1991–2020), которая составляет 282 мм. Как 1986 г., так и 2020 г. относятся к годам с самым низким количеством осадков – 151 и 165 мм соответственно (рис. 5). Между этими годами количество осадков значительно варьировало. Выделяется 2007 г., когда в районе Яшкулья выпало 189 мм. Максимальное количество осадков пришлось на 2013 г., когда выпало 392 мм. Также выделяются 1991 г. (388 мм), 2005 г. (382 мм).

Самым сухим годом с 2000-х г. был 2020 г., когда выпало 165 мм, однако распределение осадков в течение года неравномерно. В мае аномально высокое количество составило 61 мм. Лето отличалось длительным периодом засухи, которая продолжалась с июля по октябрь, когда количество осадков было от 1 до 8 мм. В октябре – 2 мм. В конце года осадки составляли 12–17 мм, выпадали в виде сильных дождей, переходящих в снег [18].

В отличие от Элисты в Яшкуле не было периода постепенного снижения осадков. Их количество выше, чем среднее, в 51,4 % случаев. Выделяется небольшой тренд к понижению осадков (рис. 5). Наибольшее количество выпадает на данной территории в теплое время года, а именно

в мае и июне (39 и 36 мм соответственно), наименьшее – в феврале, январе и августе (12, 15 и 18 мм). В остальное время варьирует около 20 мм. Обращает на себя внимание сдвиг максимума осадков на май.

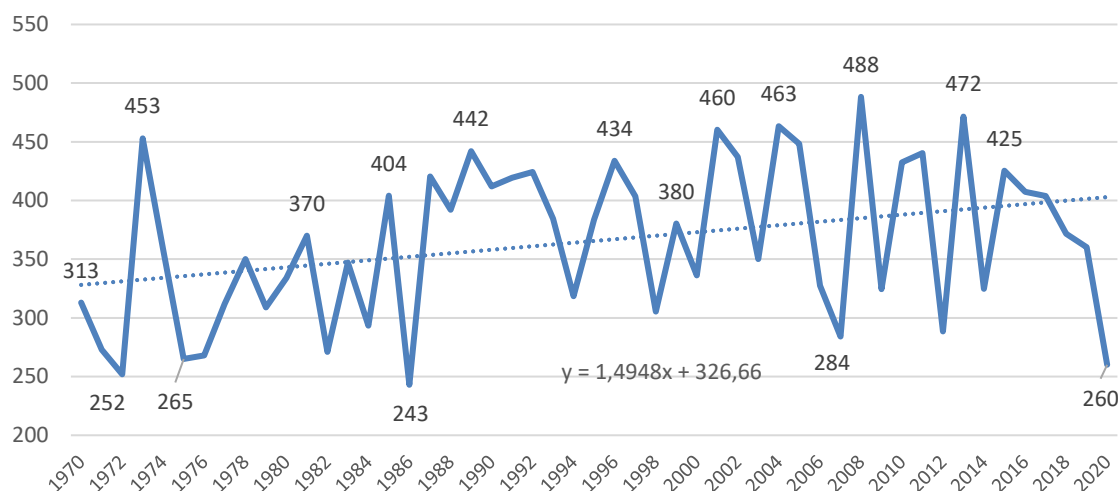


Рис. 4. Динамика сумм осадков за год, мм, за период 1970–2020 гг. (по [25]), Элиста  
 / Fig. 4. Dynamics of average annual precipitation, mm, for the period 1970-2020 (due to [25]), Elista

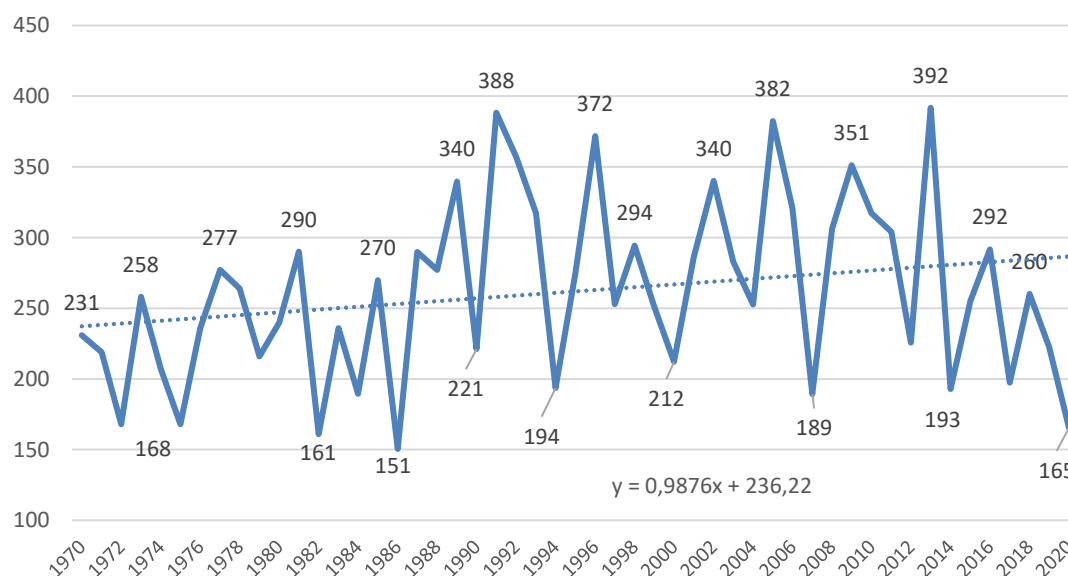


Рис. 5. Динамика сумм осадков за год, мм, за период 1970–2020 гг. (по [25]), Яшкуль  
 / Fig. 5. Dynamics of average annual precipitation, mm, for the period 1970-2020 (due to [25]), Yashkul

Среднее количество осадков за период 1970–2020 гг. в Лагани – 221 мм, что близко к действующей климатической норме (1991–2020), которая составляет 239 мм. Минимальное количество осадков отмечалось в 1972 г. – 76 мм, когда с мая по сентябрь включительно выпало максимум 2 мм. Низкие значения были в 2018 г. (112 мм), 1985 г. (114 мм), 1994 г. (125 мм) (рис. 6). Максимальное количество осадков пришлось на 2011 г., когда выпало 384 мм. Также выделяются 1997 г. (364 мм), 1991 г. (333 мм), 2002 г. (332 мм). В 52 % отмечалось количество осадков ниже среднееголетних данных. Не зафиксировано значимого тренда изменения осадков. Изменение среднееголетнего их количества в Лагани повторяет таковое в Яшкуле. Наибольшее выпадает на данной территории в теплое время года, а именно в мае и июне (30 и 28 мм соответственно), наименьшее – в феврале (12 мм), январе, сентябре и октябре (15 мм). В остальное время варьирует около 18–20 мм.

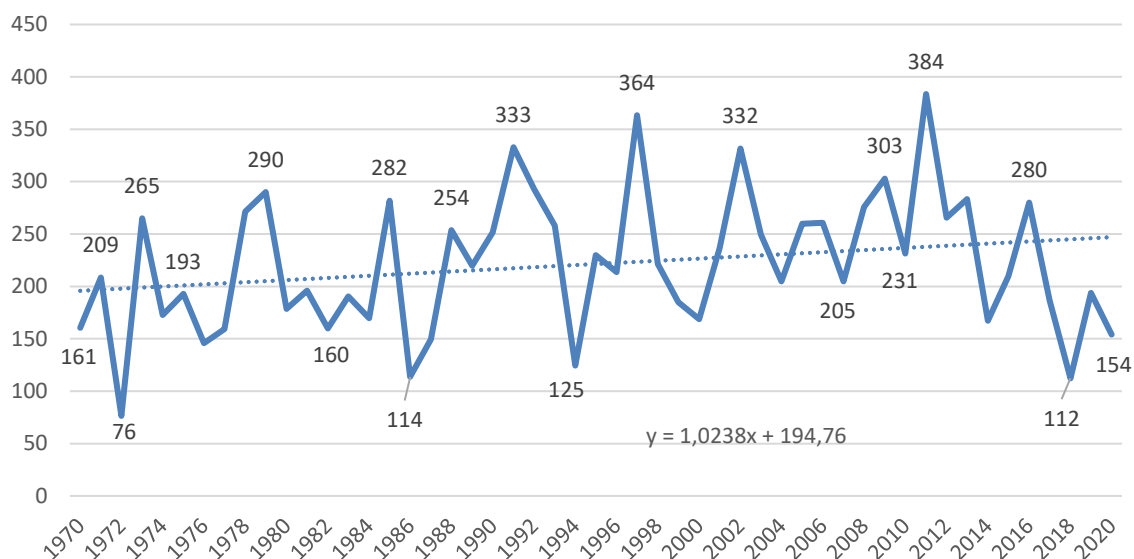


Рис. 6. Динамика сумм осадков за год, мм, за период 1970–2020 гг. (по [25]), Лагань / Fig. 6. Dynamics of average annual precipitation, mm, for the period 1970-2020 (due to [25]), Lagan

Таким образом, рассмотрев особенности распределения среднегодового и среднемесячного количества атмосферных осадков, можно выделить общие черты и индивидуальные особенности. По мере нарастания континентальности климата количество осадков уменьшается с 366 до 221 мм.

Анализ многолетних изменений осадков с 1970 по 2020 г. показал, что в среднем наблюдается их повышение в Элисте и незначительное снижение в последнее десятилетие в Яшкуле и Лагани (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Средние многолетние значения количества осадков, мм / Average precipitation, mm**

Период	Год			Зима			Весна			Лето			Осень		
	Э	Я	Л	Э	Я	Л	Э	Я	Л	Э	Я	Л	Э	Я	Л
1970–1979	315	224	194	62	42	33	63	51	65	110	79	42	81	55	54
1980–1989	352	244	191	63	37	33	79	60	48	127	87	61	82	61	49
1990–1999	387	292	247	72	47	40	103	74	67	107	105	90	104	67	50
2000–2009	392	292	250	76	45	46	111	97	81	102	77	74	102	73	48
2010–2019	393	266	231	80	48	52	118	80	80	105	69	49	89	70	50
1970–2020	366	252	221	71	41	41	95	63	68	109	89	63	91	59	50
1967–1990	338	241	193	66	41	35	72	55	55	118	85	53	82	60	52
<b>1991–2020</b>	<b>385</b>	<b>282</b>	<b>239</b>	<b>77</b>	<b>47</b>	<b>46</b>	<b>110</b>	<b>85</b>	<b>76</b>	<b>101</b>	<b>81</b>	<b>69</b>	<b>97</b>	<b>69</b>	<b>48</b>

**Примечание.** Э – Элиста; Я – Яшкуль; Л – Лагань.

Годовые осадки в Элисте увеличились с 315 (1970–1979 гг.) до 393 мм (2010–2019 гг.). Средние многолетние данные за период 1970–2020 гг. – 366 мм. Климатическая норма за 1981–2010 гг. составляет 379 мм, а за 1991–2020 гг. – 385 мм. Отмечается также повышение количества осадков в зимний (с 62 до 80 мм) и весенний сезоны (с 63 до 118 мм). Таким образом, отмечается значительное увеличение в весенний период. Летний период отличается повышением количества осадков в первые десятилетия и их снижением с 2000-х гг. Для летнего периода климатическая норма стала ниже по сравнению со средними многолетними данными, но период 2010–2019 гг. отличался небольшим превышением. Аналогичная ситуация с осенними осадками, которые достигли пика в период 1990–1999 гг., а потом их количество значительно уменьшилось. Осень 2010–2019 гг. была суше, чем в среднем за исследуемый период.

В пустынной зоне (Яшкуль) произошло увеличение нормы годовых осадков (282 мм) по сравнению с многолетними данными (252 мм). Рост годовых осадков продолжается до 2009 г. (292 мм),

а потом идет снижение (266 мм). Количество осадков в зимний период незначительно увеличивается. Аналогичная ситуация складывается с остальными сезонами: увеличение до 1990–1999 гг., после чего – спад. Однако летне-осенние осадки незначительно превышают норму.

Лагерь повторяет изменение хода осадков, характерных для Яшкулья и Элисты. Наблюдается рост значений до 2000-х гг. Отмечается их увеличение в зимний период (с 33 до 52 мм) и значительное снижение в летний (с 42 до 90 и потом падение до 49 мм).

### Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что для территории Республики Калмыкии характерно повышение температуры воздуха и смещение сезонов. Наиболее значительными стали повышения в летний период, наименьшие – осенью. Лето начинается раньше, продолжается дольше, увеличивается период с высокими температурами и частота засухи жарких периодов.

Несмотря на сухой климат, отмечается увеличение количества выпадающих осадков. Выделяется зимний период, когда происходит значительный прирост осадков в зимний и весенний сезоны. Летний период отличается повышением количества осадков в первые десятилетия и их снижением с 2000-х гг.

### Список источников

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. URL: [https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2021/doklad\\_klimat2020.pdf](https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2021/doklad_klimat2020.pdf) (дата обращения: 19.05.2024).
2. Обзор состояния и тенденций изменения климата России. М., 2008–2019. URL: <http://climatechange.igsc.ru/> (дата обращения: 19.05.2024).
3. Панов В.Д., Лурье П.М., Ларионов Ю.А. Климат Ростовской области: вчера, сегодня, завтра. Ростов н/Д.: Донской изд. дом, 2006. 487 с.
4. Лурье П.М. Особенности гидрометеорологического режима внутригорных котловин западной и центральной частей Большого Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий. 2016. Т. 8, № 2. С. 150–160.
5. Сухова М.Г., Журавлева О.В. Динамика изменения температуры воздуха и осадков в Чуйской котловине // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2017. № 1. С. 124–129.
6. Дмитриева В.А., Маскайкина С.В. Изменчивость водного режима в верховье Донского бассейна в современный климатический период // Вестн. ВГУ. География. Геоэкология. 2013. № 1. С. 17–21.
7. Назаренко О.В. Изменение некоторых метеорологических показателей в бассейне Азовского моря // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2020. № 1 (205). С. 62–70. Doi: 10.18522/1026-2237-2020-1-62-70. EDN: SXLAPB.
8. Новикова Н.М., Волкова Н.А., Уланова С.С., Шаповалова И.Б., Вышивкин А.А. Ответные реакции экосистем на изменение водного режима территорий в степной зоне // Аридные экосистемы. 2011. Т. 17, № 3 (48). С. 38–48.
9. Шумова Н.А. Анализ климатических условий в Республике Калмыкии за 1966–2017 гг. // Аридные экосистемы. 2020. Т. 26, № 3 (84). С. 23–29.
10. Шумова Н.А. Изменение структуры землепользования и орошения в современных климатических условиях в Республике Калмыкии // Экосистемы: экология и динамика. 2021. Т. 5, № 1. С. 113–131.
11. Уланова С.С. Современное состояние водных объектов Республики Калмыкии по результатам мониторинговых исследований 2017–2022 года // Вестн. Ин-та комплексных исследований аридных территорий. 2022. № 2 (45). С. 19–32.
12. Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б. Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами // Изв. РАН. Серия географическая. 2020. № 2. С. 207–217.
13. Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н. Летние климатические изменения на юге Европейской России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8, № 1. С. 107–121.
14. Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А. Динамика зон увлажнения суббореальных ландшафтов России в XX–XXI вв. // Изв. РАН. Серия географ. 2011. № 4. С. 33–41.
15. Nazarenko O.V. Temporal and spatial variability in air temperature and precipitation in the basin of Azov sea over the period 1966-2015 // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference – SGEM 2020. Albena, Bulgaria, 2020. P. 483–491. Doi: 10.5593/sgem2020/4.1/s19.060.
16. Назаренко О.В. Оценка региональных изменений метеорологических показателей и их влияния на уровень грунтовых вод (на примере г. Ростова-на-Дону) // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. С. 549.



17. Назаренко О.В. Изменение некоторых метеорологических показателей в условиях засушливой степи // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2019. № 4 (204). С. 84–90.
18. Назаренко О.В. Изменение увлажнения в Ростовской области за период 1966–2019 годов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2022. № 4-2. С. 45–52.
19. Ташинова А.А. Изменение климатических условий за 2020–2023 гг. в пределах Ергенинского кластера // Степи Северной Евразии: материалы X Междунар. симп. Оренбург: Ин-т степи Уральского отделения РАН, 2024. С. 1299–1302.
20. Ташинова А.А. Распределение атмосферных осадков в Калмыкии за 2020–2022 гидрологические годы // Вестн. Ин-та комплексных исследований аридных территорий. 2023. № 1 (46). С. 37–50.
21. Ташинова А.А. Анализ изменений основных климатических показателей в Республике Калмыкии за 2020 год // Вестн. Ин-та комплексных исследований аридных территорий. 2020. № 2(41). С. 25–30.
22. Ташинова А.А. К характеристике климатических условий за период с 2008–2018 гг. по Республике Калмыкии // Вестн. Ин-та комплексных исследований аридных территорий. 2019. № 2 (39). С. 23–26.
23. Хрусталеv Ю.П., Борликов Г.М., Хулхачиев Б.С. Эколого-географический словарь-справочник. Ростов н/Д.: СКНЦ ВШ, 2002. С. 196–230.
24. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России / О.Н. Булыгина, В.Н. Разуваев, Л.Т. Трофименко, Н.В. Швец. URL: <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных> (дата обращения: 17.05.2024).
25. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России / О.Н. Булыгина, В.Н. Разуваев, Н.Н. Коршунова, Н.В. Швец. URL: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> (дата обращения: 17.05.2024).

## References

1. *Report on the peculiarities of the climate in the territory of the Russian Federation for 2020*. Available from: [https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2021/doklad\\_klimat2020.pdf](https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2021/doklad_klimat2020.pdf) [Accessed 19th May 2024]. (In Russ.).
2. *Assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation*. Moscow, 2008-2019. Available from: <http://climate2008.igce.ru/v2008/htm/2.htm> [Accessed 19th May 2024]. (In Russ.).
3. Panov V.D., Lur'e P.M., Larionov Yu.A. *Climate of the Rostov region: yesterday, today, tomorrow*. Rostov-on-Don: Don Publishing House; 2006. 487 p. (In Russ.).
4. Lur'e P.M. Peculiarities of the hydrometeorological regime of the intra-mountain hollows in the Western and Central parts of the Greater Caucasus. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable Development of Mountain Areas*. 2016;8(2):150-160. (In Russ.).
5. Sukhova M.G., Zhuravleva O.V. Dynamics of changes in air temperature and precipitation in the Chui basin. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2017;(1):124-129. (In Russ.).
6. Dmitrieva V. A., Maskaikina S. V. Variability of the water regime in the upper reaches of the Don basin in the modern climatic period. *Vestn. VGU. Geografiya. Geoekologiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2013;(1):17-21. (In Russ.).
7. Nazarenko O.V. Variability of some meteorological parameters in the basin of Azov sea. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2020;(1):62-70. Doi: 10.18522/1026-2237-2020-1-62-70. EDN: SXLAPB. (In Russ.).
8. Novikova N.M., Volkova N.A., Shapovalova I.B., Vyshivkin A.A., Ulanova S.S. Ecosystem responses to hydrological regime changes in the steppe zone. *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2011;17(3):38-48. (In Russ.).
9. Shumova N.A. Analysis of Climatic Conditions in the Republic of Kalmykia for 1966-2017. *Arid Ecosystems*. 2020;10(3):188-193. EDN: OSRYNR.
10. Shumova N.A. Changing the structure of land use and irrigation in modern climatic conditions in the Republic of Kalmykia. *Ekosistemy: ekologiya i dinamika = Ecosystems: Ecology and Dynamics*. 2021;5(1):113-131. (In Russ.).
11. Ulanova S.S. The current state of the water bodies of the Republic of Kalmykia according to the results of monitoring studies 2017-2022. *Vestn. In-ta kompleksnykh issledovaniy aridnykh territorii = Bulletin of the Institute of Complex Studies of Arid Territories*. 2022;(2):19-32. (In Russ.).
12. Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B. Aridization of drylands in the European part of Russia: secular trends and links to droughts. *Izv. RAN. Seriya geograficheskaya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Series Geographical*. 2020;(2):207-217. (In Russ.).

13. Titkova T.B., Zolotokrylin A.N. Summer climate change in the South of European Russia. *Fundamental and Applied Climatology*. 2022;8(1):107-121. (In Russ.).

14. Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A. Dynamics aridity zones of subboreal landscapes of Russia in 20th-21st centuries. *Izv. RAN. Seriya geograficheskaya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Series Geographical*. 2011;(4):33-41. (In Russ.).

15. Nazarenko O.V. Temporal and spatial variability in air temperature and precipitation in the basin of Azov sea over the period 1966-2015. *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM 2020*. Albena, Bulgaria, 2020:483-491. Doi: 10.5593/sgem2020/4.1/s19.060.

16. Nazarenko O.V. Assessment of regional changes in meteorological indicators and their impact on the groundwater level (on the example of Rostov-on-Don). *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2013;(5):549. (In Russ.).

17. Nazarenko O.V. Variability of some meteorological parameters in the arid steppe. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2019;(4):84-90. (In Russ.).

18. Nazarenko O.V. Moisture Changes in the Rostov Region in 1966-2019. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2022;(4-2):45-52. (In Russ.).

19. Tashninova A.A. Climate change for the year 2020-2023 within the Ergeninsky cluster. *Steppes of Northern Eurasia*. Materials of the X International symposium. Orenburg: Institute of Steppes of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Press; 2024:1299-1302. (In Russ.).

20. Tashninova A.A. Distribution of atmospheric precipitation in Kalmykia for the 2020-2022 hydrological years. *Vestn. In-ta kompleksnykh issledovaniy aridnykh territorii = Bulletin of the Institute of Complex Studies of Arid Territories*. 2023;(1):37-50. (In Russ.).

21. Tashninova A.A. Analysis of changes in the main climatic indicators in the Republic of Kalmykia in 2020. *Vestn. In-ta kompleksnykh issledovaniy aridnykh territorii = Bulletin of the Institute of Complex Studies of Arid Territories*. 2020;(2):25-30. (In Russ.).

22. Tashninova A.A. On the characteristics of climatic conditions for the period from 2008-2018 in the Republic of Kalmykia. *Vestn. In-ta kompleksnykh issledovaniy aridnykh territorii = Bulletin of the Institute of Complex Studies of Arid Territories*. 2019;(2):23-26. (In Russ.).

23. Khrustalyov Yu.P., Borlikov G.M., Khulkhachiev B.S. *Ecology and geography reference book*. Rostov-on-Don: High School Scientific Research Center Press; 2002:196-230 (In Russ.).

24. Bulygina O. N., Razuvaev V. N., Trofimenko L. T., Shvets N. V. *Description of an array of data on the average monthly air temperature at stations in Russia. Certificate of State Registration of the Database No. 2014621485*. Available from: <http://meteo.ru/data/156-temperature#descriptionofthedataarray> [Accessed 17th May 2024]. (In Russ.).

25. Bulygina O. N., Razuvaev V. N., Korshunova N. N., Shvets N. V. *Description of an array of data for monthly precipitation totals at stations in Russia. Certificate of State Registration of the Database No. 2015620394*. Available from: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> [Accessed 17th May 2024]. (In Russ.).

#### **Информация об авторе**

О.В. Назаренко – кандидат географических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Д.Н. Гарькуша – кандидат географических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

#### **Information about the author**

O.V. Nazarenko – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

D.N. Gar'kusha – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Статья поступила в редакцию 10.06.2024; одобрена после рецензирования 30.06.2024; принята к публикации 16.10.2024.  
The article was submitted 10.06.2024; approved after reviewing 30.06.2024; accepted for publication 16.10.2024.

Научная статья

УДК 551.263.037

doi: 10.18522/1026-2237-2024-4-2-59-66

## ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ФОРМАЦИОННАЯ ПРИНАДЛЕЖНОСТЬ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД КОНДАКОВСКОГО ПОДНЯТИЯ (ВОСТОЧНЫЙ ДОНБАСС)

**Сергей Григорьевич Парада**

Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия  
segripa@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-5810-3438

**Аннотация.** Рудная специализация проявлений полезных ископаемых, связанных с магматическими породами, зависит от формационной принадлежности последних, так как конкретные магматические формации характеризуются определенным типом металлогении. Поэтому выявление формационной принадлежности магматических пород Кондаковского тектонического поднятия (КТП) позволяет оценить металлогеническую специализацию и осуществить прогноз оруденения. С этой целью использованы данные геологического картирования и результаты поисковых работ, 145 химических анализов магматических пород. Произведена идентификация магматических тел, выявлены особенности их морфологии, пространственных взаимоотношений, петрографического состава и петрохимических характеристик. Установлено, что в составе несветаевского магматического комплекса андезиты со всеми разновидностями составляют 82 % от всех изученных пород, что уже позволяет отнести породы этого комплекса к чисто андезитовой формации. Все геологические тела несветаевского магматического комплекса представлены малыми интрузивами, породы которых обладают особенностями, характерными для субвулканических фаций. Эти особенности в совокупности с геолого-геофизическими данными позволяют отнести их к корневым зонам андезитовой формации. Предполагается, что штоки, силлы и дайки в ретро-спективе представляли промежуточные магматические камеры и подводящие каналы ранне-среднеюрского субаэрального эффузивного магматизма. При этом субвулканические фации андезитовой формации характеризуются золотосеребряной и полиметаллической специализацией. В соответствии с полученными данными предполагается, что магматические породы несветаевского комплекса КТП, обладающие всеми признаками субвулканической фации андезитовой формации, перспективны на обнаружение золотосеребряного и полиметаллического оруденения.

**Ключевые слова:** тектоническое поднятие, магматический комплекс, андезитовая формация, субвулканическая фация, петрохимия, прогноз оруденения, золотосеребряная металлогеническая специализация, Восточный Донбасс

**Для цитирования:** Парада С.Г. Петрохимические особенности и формационная принадлежность магматических пород Кондаковского поднятия (Восточный Донбасс) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 4-2. С. 59–66.

**Благодарности:** публикация подготовлена в рамках выполнения темы НИР ГЗ ЮНЦ РАН «Исследование минералогической системы Восточного Донбасса на основе новой геолого-геофизической информации», № гос. регистрации 122020100345-8.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

## PETROCHEMICAL FEATURES AND FORMATION AFFILIATION OF IGNEOUS ROCKS OF THE KONDAKOV UPLIFT (EASTERN DONBASS)

**Sergei G. Parada**

*Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia  
segripa@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-5810-3438*

**Abstract.** *The ore specialization of mineral manifestations associated with igneous rocks depends on the formation affiliation of the latter, since specific igneous formations are characterized by a certain type of metallogeny. Therefore, the identification of the formation affiliation of igneous rocks of the Kondakov tectonic uplift (KTU) makes it possible to assess metallogenic specialization and make a forecast of mineralization. For this purpose, geological mapping data and the results of prospecting works, 145 chemical analyses of igneous rocks were used. The identification of magmatic bodies was carried out, the features of their morphology, spatial relationships, petrographic composition and petrochemical characteristics were revealed. It has been established that andesites with all varieties in the Nesvetaevsky magmatic complex make up 82 % of all studied rocks, which already makes it possible to attribute the rocks of this complex to a purely andesite formation. All geological bodies of the Nesvetaevsky magmatic complex are represented by small intrusions, the rocks of which have features characteristic of subvolcanic facies. These features, combined with geological and geophysical data, make it possible to attribute them to the root zones of the andesite formation. It is assumed that the rods, forces and dikes in retrospect represented intermediate magmatic chambers and supply channels of the Early-Middle Jurassic subaerial effusive magmatism. At the same time, the subvolcanic facies of the andesite formation are characterized by gold-silver and polymetallic specialization. According to the data obtained, it is assumed that the igneous rocks of the Nesvetaevsky KTU complex, which have all the signs of a subvolcanic facies of the andesite formation, are promising for the detection of gold-silver and polymetallic mineralization.*

**Keywords:** *tectonic uplift, magmatic complex, andesite formation, subvolcanic facies, petrochemistry, mineralization forecast, gold-silver metallogenic specialization, Eastern Donbass*

**For citation:** Parada S.G. Petrochemical Features and Formation Affiliation of Igneous Rocks of the Kondakov Uplift (Eastern Donbass). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(4-2):59-66. (In Russ.).

**Acknowledgments:** *the publication was prepared as part of the implementation of the research topic of the State assignment of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences "Research of the mineralogenic system of Eastern Donbass based on new geological and geophysical information", state registration No. 122020100345-8.*

*This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).*

### Введение

Проведенные в Восточном Донбассе поисковые работы открыли множество признаков золотоносных и полиметаллических минерализаций [1, 2]. Анализ результатов этих работ показал тесную пространственную связь между ними и магматическими породами региона [3]. Также установлено, что узлы сосредоточения магматических пород и проявлений рудных минерализаций располагаются в контурах локальных тектонических поднятий и изометричных аномалий магнитного поля и что эти аномалии соответствуют магматическим очагам. По совокупности этих данных обосновано выделение рудных узлов (РУ), являвшихся в ретроспективе рудно-магматическими системами (РМС) [4]. Наиболее крупный и изученный – Кондаковский РУ, приуроченный к одноименному тектоническому поднятию.

Специализация проявлений полезных ископаемых, связанных с магматическими породами, зависит от формационной принадлежности последних, так как конкретные магматические формации характеризуются определенным типом металлогении [5, 6]. Поэтому выяснение формационной принадлежности в пределах Кондаковского тектонического поднятия (КТП) магматических пород – основа дальнейшей оценки его металлогенической специализации и прогноза конкретного вида оруденения.

## Материал и методы

Определение формационной принадлежности магматических пород КТП осуществляется на основе данных геологического картирования и включает идентификацию конкретных магматических тел, выявление их морфологии, пространственных взаимоотношений, петрографических и петрохимических особенностей в соответствии с известными принципами и методами, изложенными в [7, 8]. Результаты химических анализов магматических пород заимствованы из отчетов по геологической съемке и поискам полезных ископаемых, выполненных Южным производственным объединением «Ростовская геолого-разведочная экспедиция». Учтены результаты 145 химических анализов, из которых составлены 42 выборки магматических пород несветаевского комплекса, соответствующих 42 интрузивным телам различной формы – штоки, силлы, дайки. Петрохимический анализ осуществлен в соответствии с общепринятой методикой на основе диагностической диаграммы  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  [9].

## Результаты и обсуждение

КТП расположено в южной части структурной зоны крупных линейных складок Восточного Донбасса [10]. Основные черты геологического строения КТП приведены на рис. 1.

Тектоническую основу КТП составляет эпигерцинский складчатый комплекс осадочных пород среднего и верхнего отделов каменноугольной системы.

Структурные элементы палеозойского комплекса представлены Главной и Южной антиклиналями, разделенными Новозолотовско-Висловской синклинальной полосой, состоящей из Новозолотовской и Висловской синклинальных структур, соприкасающихся по осевой линии КТП. На севере Главная антиклиналь граничит с синклинальной структурой – Сулино-Садкинской котловиной, заходящей на исследуемую территорию своим южным крылом.

В пределах КТП широко распространены интрузивные породы, представленные малыми интрузивными телами: штоками, силлами и дайками. Скопления интрузивных тел приурочены, как правило, к центральной части КТП. С ними ассоциируют проявления золоторудных и полиметаллических минерализаций.

Вдоль осевой части КТП проявления магматической деятельности прослеживаются в виде интрузивных тел в полосе северо-восточного направления протяженностью 20 км и шириной 2–4 км. В этой полосе фиксируются локальные магнитные аномалии, отвечающие отдельным интрузивным телам [11].

В КТП, так же как и на всей территории южной части Восточного Донбасса, интрузивные образования представлены двумя магматическими комплексами. Выделяются ранне-среднеюрский несветаевский андезит-трахиандезитовый и средне-позднеюрский миусс-керчикский лампрофировый комплексы [12, 13]. В пределах КТП интрузивные породы лампрофирового комплекса не так распространены и представлены единичными дайками.

Все проявления интрузивных пород несветаевского комплекса можно разделить на 4 пространственные группы (с юго-запада на северо-восток): страховская, кондаковская, чернореченская и кастырская (рис. 1).

Страховская группа объединяет три интрузивных штока. Выходы штоков на эрозионную поверхность каменноугольных отложений имеют округлую форму и составляют в поперечнике 0,5–1 км. Буровыми скважинами они вскрыты на глубину 50–200 м от поверхности карбона. Страховские интрузии представлены андезитами с вариациями составов до андезидацитов и дацитов.

Кондаковская группа представлена относительно крупным интрузивным штоком размером до 1,5–2,0 км в поперечнике. Интрузивное тело вскрыто в центральной части буровыми скважинами на глубину до 600 м. Породы, слагающие центральную часть штока, представлены андезидацитами. Шток сопровождается серией послонных и секущих магматических тел, отличающихся по составу повышенной основностью и щелочностью. Так, с южной и северной сторон штока вскрыты по три силла мощностью от 11 до 75 м каждый, а с западного фланга штока скважинами вскрыты мощные (105–186 м) силлообразные магматические тела, представленные, как считается, трахиандезитами. Секущие дайковые тела мощностью по 5–15 м, вскрытые в двух скважинах, представлены наиболее основными породами комплекса, отвечающими по составу трахиандезит-базальтам.

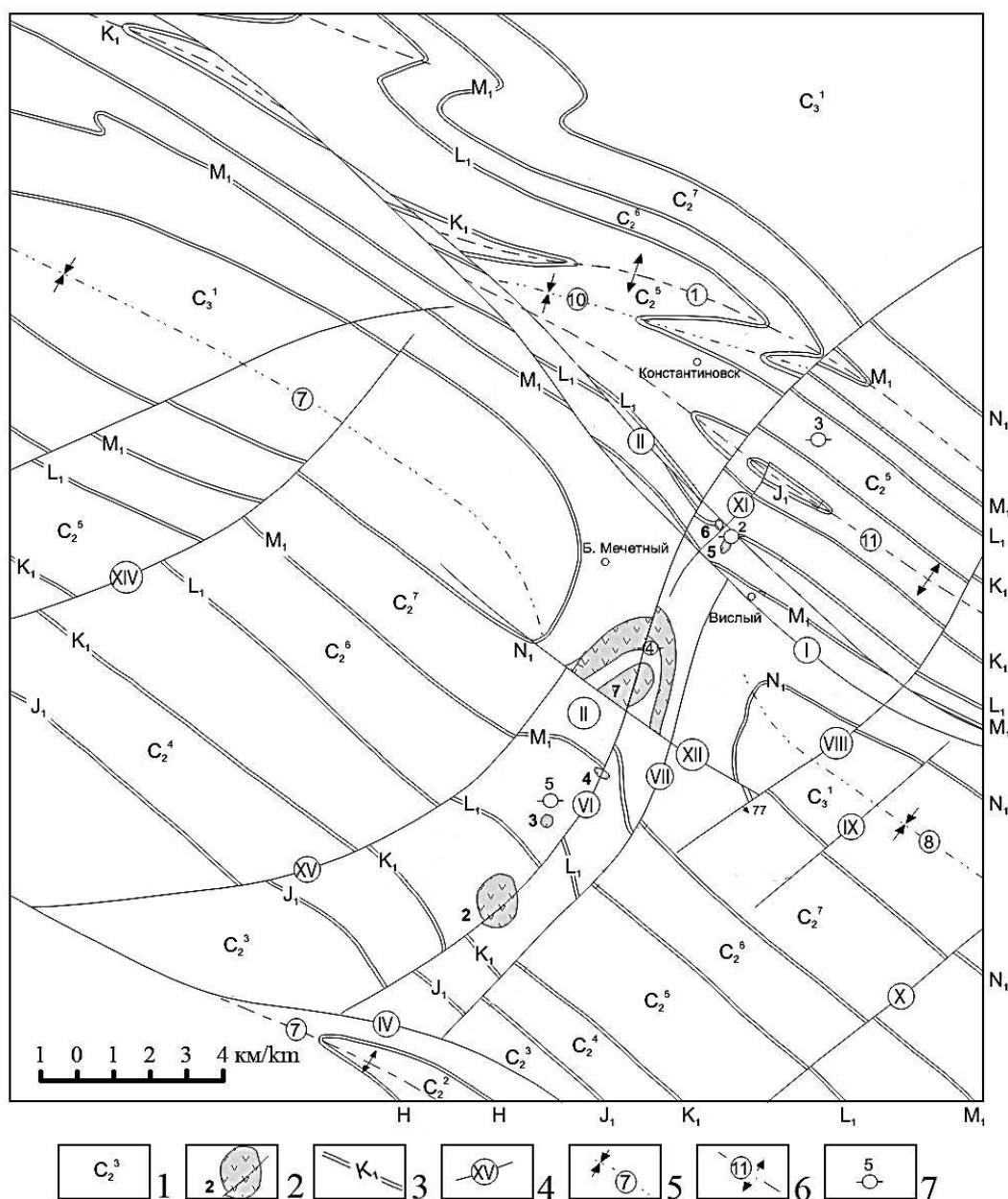


Рис. 1. Карта-схема КТП: 1 – осадочные породы среднего и верхнего отделов каменноугольной системы:  $C_{2-3is}$ ,  $C_{2gr}$ ,  $C_{2al}$ ,  $C_{2km}$  – исаевская, горловская, алмазная, каменная свиты московского яруса;  $C_{2bk}$  – белокалитвенская свита башкирского яруса; 2 – интрузивные штоки магматических пород юрского возраста и их номера: 2 – Южный, 3 – Центральный, 4 – Северный (Страховская группа); 5 – Чернореченский южный, 6 – Чернореченский северный (Чернореченская группа); 7 – Кондаковская группа интрузивных штоков и связанные с ними силлы и дайки; 3 – маркирующие горизонты известняков Н, J<sub>1</sub>, K<sub>1</sub>, L<sub>1</sub>, M<sub>1</sub>, N<sub>1</sub>; 4 – разломы и их номера: I – Сулино-Константиновский; II – Северный оперяющий; III – Южный оперяющий сброс; IV – Персияновский; V – Керчикский; VI – Кондаковский; VII – Висловский первый; VIII – Висловский второй; IX – Средний; X – Восточный; XI – Короткий; XII – Нижний; XIII – Кочетовский; XIV – Семикаракорский; XV – Мечетновский; 5 – оси синклиналей и их номера: 8 – Висловская; 10 – Кондаковская; 6 – оси антиклиналей и их номера: 1 – Главная; 2 – Южная; 11 – Кондаковская; 7 – проявления золоторудной минерализации: 2 – Чернореченское; 3 – Северное; 4 – Центральное; 5 – Астаховское / Fig. 1. Structural diagram of the Kondakov tectonic uplift: 1 - sedimentary rocks of the middle-upper sections of the carboniferous system:  $C_{2-3is}$ ,  $C_{2gr}$ ,  $C_{2al}$ ,  $C_{2km}$  - Isaevskaya, Gorlovskaya, Almaznaya, Kamenskaya formations of the Moscow tier,  $C_{2bk}$  - Belokalitvenskaya formation of the Bashkir tier; 2 - intrusive stocks of igneous rocks of Jurassic age and their numbers: 2 - Southern, 3 - Central, 4 - Northern (Strahovskaya group); 5 - Chernorechenskiy Southern, 6 - Chernorechenskiy Northern (Chernorechenskaya group); 7 - Kondakovskaya intrusion group and related sills and dykes; 3 - marking horizons of limestone H, J<sub>1</sub>, K<sub>1</sub>, L<sub>1</sub>, M<sub>1</sub>, N<sub>1</sub>; 4 - faults and their numbers: I - Sulino-Konstantinovsky, II - Northern, III - Southern, IV - Persianovsky, V - Kerchiksky, VI - Kondakovsky, VII - Vislovsky first, VIII - Vislovsky second, IX - Middle, X - Oriental, XI - Short, XII - Lower, XIII - Kochetovsky, XIV - Semikarakorsky, XV - Mechetnovsky; 5 - axes of synclines and their numbers: 8 - Vislovskaya, 10 - Kondakovskaya; 6 - axes of anticlines and their numbers: 1 - Main, 2 - Southern, 11 - Kondakovskaya; 7 - manifestations of gold mineralization: 2 - Chernorechenskoye, 3 - Northern, 4 - Middle, 5 - Astakhovskoye



Чернореченская группа представлена интрузивными телами трех различных форм залегания: штоки, силлы и дайки. Скважинами вскрыты два небольших штока, не превышающих в поперечнике 200 м. Штоки чернореченской группы интрузий, так же как и штоки двух ранее описанных групп, сложены андезидацитами. Верхняя зона штока в пределах его восточного фланга отличается повышенным содержанием кварца, и породы по составу переходят в дациты. Силлы по результатам бурения имеют мощность 5–25 м и представлены андезидацитами и андезитами, а дайки имеют мощность от 7 до 18 м и представлены андезибазальтами.

В 18 км к северо-востоку от Чернореченской группы малых интрузий располагается Кастырский интрузивный шток. Ему, так же как и другим штокам КТП, соответствует локальная изометричная магнитная аномалия. Шток в плане имеет форму эллипса, длинная ось которого вытянута на 3,5 км в северо-западном направлении. Ширина штока 1,8 км. К северо-западу и юго-востоку шток переходит в силлы. Протяженность силлов достигает 1 км. Контакты магматических пород неровные, но четкие, без следов изменений вмещающих пород.

Интрузивные породы миусско-керчикского лампрофирового комплекса в Донбассе обычно представлены дайками основного, реже ультраосновного состава. Они характеризуются субмеридиональным простиранием, поперечным по отношению к основным структурам Донбасса. Почти все вскрытые скважинами лампрофировые дайки отвечают по составу спессартитам, производным магмы основного состава, и лишь одна дайка может быть отнесена к ультраосновным породам и соответствует по минеральному и химическому составу камптонитам.

Все породы несветаевского андезит-трахиандезитового комплекса имеют ясно выраженную порфириовидную структуру и могут быть отнесены к субвулканической фации. Основная ткань пород микрозернистая или микрофельзитовая (для андезидацитов и андезитов) и призматически-зернистая (для андезибазальтов). При этом содержание вкрапленников преобладает над основной микрокристаллической тканью пород и составляет 60–80 %. Главные породообразующие минералы представлены плагиоклазом и роговой обманкой. Всё разнообразие пород обусловлено главным образом соотношением этих двух минералов и степенью основности плагиоклаза. Так, если в андезидацитах и дацитах содержание плагиоклаза в составе вкрапленников составляет преимущественно 40–60 %, а роговой обманки – 10–20 % (при этом состав плагиоклаза отвечает андезину и олигоклаз-андезину), то в андезибазальтах количество вкрапленников плагиоклаза снижается до 30–35 % с увеличением их основности до андезин-лабрадора и лабрадора, а содержание роговой обманки увеличивается до 30–40 %. Андезидациты и дациты отличаются наличием вкрапленников кварца (3–10 %). В отдельных случаях увеличивается содержание роговой обманки до 10–15 % и появляется биотит в количестве до 10–15 %.

Химический состав определен для 145 образцов магматических пород несветаевского комплекса. Сформированы 42 выборки, соответствующие 42 выявленным интрузивным телам.

Все представленные разности магматических пород обладают повышенным содержанием  $\text{Na}_2\text{O}$  при нормальном содержании  $\text{K}_2\text{O}$ , в связи с чем представляют натриевую серию магматических образований. При этом отмечаются различия в содержании других оксидов для магматических пород, слагающих разные по морфологии тела. Так, породы, слагающие штоки и большинство силлов, характеризуются пониженным содержанием  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ , в то время как породы, слагающие дайки, – нормальным для андезитов содержанием этих оксидов. Практически все породы, в особенности дайки, содержат повышенное количество потерь при прокаливании, основную долю в которых составляет  $\text{H}_2\text{O}^+$ . Это обусловлено характерными для корневых зон андезитовых формаций процессами автометаморфизма, свидетельствующего о неглубоком залегании магматических очагов, застывших под тонкой кровлей.

На классификационной диаграмме для магматических пород в координатах  $\text{SiO}_2$  –  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  в составе интрузий КТП подтверждается наличие кислых, средних и основных пород (рис. 2). Выделяются 10 петрохимических типов: дациты, трахидациты, низкощелочные дациты, андезиты, трахиандезиты, андезибазальты, трахиандезибазальты, щелочные базальты. Подавляющее большинство из них по содержанию  $\text{SiO}_2$  относится к классу средних.

Таким образом, в составе пород несветаевского магматического комплекса КТП значительно преобладают андезиты с вариациями состава от андезибазальта до андезидацита. Такие вариации состава могут быть связаны с кристаллизацией андезитов в верхних частях вулканических каналов [14, 15], в связи с чем на формационную принадлежность магматического комплекса не влияют.



## Выводы

1. В составе несветаевского магматического комплекса Кондаковского тектонического поднятия андезиты со всеми их разновидностями составляют 82 % от всех изученных пород, что уже позволяет отнести магматические породы этого комплекса к чисто андезитовой формации.

2. Все образования несветаевского магматического комплекса являются интрузивными телами и в соответствии с порфирированными структурами, особенностями минерального и химического состава представлены субвулканической фацией андезитовой формации. Указанные особенности в совокупности с геолого-геофизическими данными позволяют отнести их к корневым зонам андезитовой формации. Предполагается, что штоки, силлы и дайки в ретроспективе представляли промежуточные магматические камеры и подводящие каналы раннесреднеюрского субаэрального эффузивного магматизма.

3. Субвулканические фации андезитовой формации характеризуются золото-серебряно-полиметаллической металлогенией. В соответствии с полученными данными есть основания полагать, что магматические породы несветаевского комплекса Кондаковского тектонического поднятия, обладающие всеми признаками субвулканической фации андезитовой формации, перспективны на обнаружение золотосеребряного и полиметаллического оруденения, что подтверждается фактическими данными по металлогении изученной территории.

## Список источников

1. Зеленицков Г.В., Курбанов Н.К., Кучеревский П.Г., Радаева Т.П. Перспективы золотоносности Припятско-Днепровско-Донецкого авлакогена // Руды и металлы. 2001. № 2. С. 26–35.
2. Невалённый Ю.В. Ресурсы металлических полезных ископаемых // Проблемы и перспективы комплексного освоения минеральных ресурсов Восточного Донбасса / гл. ред. Г.Г. Матишов. Ростов н/Д.: Изд-во ЮНЦ РАН, 2005. С. 71–84.
3. Парада С.Г., Давыденко Д.Б., Мохов А.В., Рыбин И.В., Троценко В.В., Гамбург К.Ю. Металлогенический анализ Донбасса на основе современных геофизических данных // Тр. ЮНЦ РАН. 2022. Т. 10. С. 78–93.
4. Парада С.Г., Гамбург К.Ю. Рудно-магматические системы Восточного Донбасса // Геология и геофизика Юга России. 2023. Т. 13, № 2. С. 95–105. Doi: 10.46698/VNC.2023.84.41.008.
5. Гусев Г.С., Зайков В.В., Зайкова Е.В., Ковалев А.А., Леоненко Е.И., Межеловский Н.В., Миц М.В., Рундквист Д.В. Основы минерагенического анализа при геологическом картировании. Минерагения геодинамических обстановок. М.: Изд-во МАНПО, 1995. 468 с.
6. Хомичев В.Л. Петрологическая основа гранитоидных рудно-магматических систем. Новосибирск: СНИИГГиМС, 2016. 286 с.
7. Бурикова И.А., Фролова Т.И. Магматические формации современных геотектонических останков. М.: Изд-во МГУ. 1997. 317 с.
8. Чернов В.И. О принципах и методах формационного анализа вулканических серий // Изв. вузов. Геология и разведка. 1983. № 11. С. 127–138.
9. Ефремова С.В., Стафеев К.Г. Петрохимические методы исследования горных пород. М.: Недра, 1985. 511 с.
10. Погребнов Н.И., Очеретенко И.А., Троценко В.В. Структурная геология Донецкого бассейна. М.: Недра, 1985. 149 с.
11. Давыденко Д.Б., Парада С.Г. Опыт разделения потенциальных полей Донбасса на фоновую, остаточную и локальную составляющие и некоторые результаты интерпретации // Геология и геофизика Юга России. 2021. Т. 11, № 1. С. 22–37.
12. Лихачев В.А. Петрологические особенности магматических пород Восточного Донбасса в связи с вопросами его рудоносности // Геология и полезные ископаемые Нижнего Дона / под ред. Н.П. Терещенко. Ростов н/Д.: Изд-во РГУ, 1983. С. 13–17.
13. Granovsky A.G. Magmatism and stages of the tectonic evolution in the Donets folded structure, Eastern Donets basin // Geotectonics. 2018. Vol. 52, № 4. P. 485–498. Doi:10.1134/S0016852118040039.
14. Богдавленская Г.Е., Дубик Ю.М., Кирсанов И.Т. Кристаллизация андезитов в верхних частях вулканического канала // Вулканизм и глубины Земли: материалы III Всесоюз. вулканол. совещания. М.: Наука, 1971. С. 161–162.
15. Кадик А.А., Максимов А.П., Иванов Б.В. Физико-химические условия кристаллизации и генезис андезитов. М.: Наука, 1986. 158 с.
16. Анфилогов В.Н. Происхождение андезитов и риолитов комплементарных магматических серий // Литосфера. 2010. № 1. С. 37–46.
17. Шер С.Д. Металлогения золота (Евразия, Африка, Южная Америка). М.: Недра, 1974. 250 с.

18. Хомич В.Г., Иванов В.В., Фатьянов И.И. Типизация золотосеребряного оруденения. Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. 292 с.

## References

1. Zelenshchikov G.V., Kurbanov N.K., Kucherevsky P.G., Radaeva T.P. Prospects of the gold content of the Pripyat-Dnieper-Donetsk avlakogen. *Rudy i metally = Ores and Metals*. 2001;(2):26-35. (In Russ.).
2. Nevalenny Yu.V. Resources of metallic minerals. *Problems and prospects of integrated development of mineral resources of Eastern Donbass*. Ed. by G.G. Matishov. Rostov-on-Don: Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Press; 2005:71-84. (In Russ.).
3. Parada S.G., Davydenko D.B., Mokhov A.V., Rybin I.V., Troshchenko V.V., Hamburg K.Yu. Metallogenic analysis of Donbass based on modern geophysical data. *Tr. YUNTS RAN = Proceedings of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2022;10:78-93. (In Russ.).
4. Parada S.G., Hamburg K.Yu. Ore-magmatic systems of the Eastern Donbass. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii = Geology and geophysics of the South of Russia*. 2023;13(2):95-105. Doi: 10.46698/VNC.2023.84.41.008. (In Russ.).
5. Gusev G.S., Zaikov V.V., Zaikova E.V., Kovalev A.A., Leonenko E.I., Mezhelovsky N.V., Mints M.V., Rundquist D.V. *Fundamentals of mineragenic analysis in geological mapping. Mineralogy of geodynamic settings*. Moscow: International Academy of Sciences of Pedagogical Education Publishing House; 1995. 468 p. (In Russ.).
6. Khomichev V.L. *Petrological basis of granitoid ore-magmatic systems*. Novosibirsk: Siberian Scientific Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources Press; 2016. 286 p. (In Russ.).
7. Burikova I.A., Frolova T.I. *Magmatic formations of modern geotectonic stops*. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 1997. 317 p. (In Russ.).
8. Chernov V.I. On principles and methods of formation analysis of volcanic series. *Izv. vuzov. Geologiya i razvedka = Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration*. 1983;(11):127-138. (In Russ.).
9. Efremova S.V., Stafëev K.G. *Petrochemical methods of rock research*. Moscow: Nedra Publ.; 1985. 511 p. (In Russ.).
10. Pogrebnov N.I., Ocheretenko I.A., Troshchenko V.V. *Structural geology of the Donetsk basin*. Moscow: Nedra Publ.; 1985. 149 p. (In Russ.).
11. Davydenko D.B., Parada S.G. The experience of dividing potential fields of Donbass into background, residual and local components and some interpretation results. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2021;11(1):22-37. (In Russ.).
12. Likhachev V.A. Petrological features of igneous rocks of Eastern Donbass in connection with issues of its ore content. *Geology and minerals of the Lower Don*. Ed. by N.P. Tereshchenko. Rostov-on-Don: Publishing House of Rostov State University; 1983:13-17. (In Russ.).
13. Granovsky A.G. Magmatism and stages of the tectonic evolution in the Donets folded structure, Eastern Donets basin. *Geotectonics*. 2018;52(4):485-498. Doi: 10.1134/S0016852118040039.
14. Bogoyavlenskaya G.E., Dubik Yu.M., Kirsanov I.T. Crystallization of andesites in the upper parts of the volcanic channel. *Volcanism and the depths of the Earth*. Materials of the III All-Union Volcanological Meeting. Moscow: Nauka Publ.; 1971:161-162. (In Russ.).
15. Kadik A.A., Maksimov A.P., Ivanov B.V. *Physical and chemical conditions of crystallization and genesis of andesites*. Moscow: Nauka Publ.; 1986. 158 p. (In Russ.).
16. Anfilogov V.N. The origin of andesites and rhyolites of complementary magmatic series. *Litosfera = Lithosphere*. 2010;(1):37-46. (In Russ.).
17. Sher S.D. *Metallogeny of gold (Eurasia, Africa, South America)*. Moscow: Nedra Publ.; 1974. 250 p. (In Russ.).
18. Khomichev V.G., Ivanov V.V., Fatyanov I.I. *Typification of gold and silver mineralization*. Vladivostok: Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences Press; 1989. 292 p. (In Russ.).

### Информация об авторе

С.Г. Парада – доктор геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией региональной геологии.

### Information about the author

S.G. Parada – Doctor of Science (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Head of the Laboratory of Regional Geology.

Статья поступила в редакцию 18.06.2024; одобрена после рецензирования 05.07.2024; принята к публикации 16.10.2024.  
The article was submitted 18.06.2024; approved after reviewing 05.07.2024; accepted for publication 16.10.2024.

Научная статья

УДК 549.322

doi: 10.18522/1026-2237-2024-4-2-67-76

## ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ХРОМИТИТОВ ИЗ УЛЬТРАМАФИТОВ ОБРАМЛЕНИЯ СЫСЕРТСКОГО КОМПЛЕКСА (ГОРА КРОН, СРЕДНИЙ УРАЛ)

**Владимир Сергеевич Пономарев<sup>1✉</sup>, Юрий Викторович Ерохин<sup>2</sup>,  
Анатолий Владимирович Захаров<sup>3</sup>, Надежда Николаевна Фаррахова<sup>4</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Институт геологии и геохимии Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>1</sup>p123v@yandex.ru✉, ORCID: 0000-0002-1651-1281

<sup>2</sup>erokhin-yu@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-0577-5898

<sup>3</sup>zakharov-zav@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-8790-7892

<sup>4</sup>atlantida21@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3067-4044

**Аннотация.** Приводятся результаты исследования минералогии хромититов из старинного рудника, расположенного на склоне горы Крон возле деревни Раскуиха на Среднем Урале. В геологическом отношении исследуемые хромититы слагают небольшие линзовидные тела в аподунитовых и апогарцбургтовых серпентинитах раннего и среднего ордовика. Ультрабазиты представляют собой линейные тела, приуроченные к зоне меланжа, развитой в северо-западном экзоконтакте Сысертского метаморфического комплекса. Установлено, что хромититы представлены первичным глиноземистым магнезиохромитом, который в условиях зеленосланцевой фации метаморфизма преобразовался в магнезиальный и железистый хромит. Микронзондовым анализом определено, что зеленый гранат, слагающий цемент в хромититах, и щетки кристаллов на нем является уваровитом с содержанием 53–63 % уваровитового минала, до 28 % гроссулярового минала и до 22 % андрадитового минала. В хромититах установлено девять сульфидов: годлевскит, никелистый пентландит, хизлевудит, миллерит, халькопирит, пирит, борнит, галенит и джирит. Образование такой богатой минерализации связано с метаморфизмом хромититов и их последующей гидротермальной проработкой.

**Ключевые слова:** хромититы, магнезиохромит, хромит, сульфиды, уваровит, гора Крон, Средний Урал

**Для цитирования:** Пономарев В.С., Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Фаррахова Н.Н. Вещественный состав хромититов из ультрамафитов обрамления Сысертского комплекса (гора Крон, Средний Урал) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 4-2. С. 67–76.

**Благодарности:** работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00027, <https://rscf.ru/project/22-17-00027/>.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

## COMPOSITION OF CHROMITITES FROM ULTRAMAFITES FRAMING THE SYSERT COMPLEX (MOUNT KRON, MIDDLE URALS)

**Vladimir S. Ponomarev<sup>1✉</sup>, Yuriy V. Erokhin<sup>2</sup>, Anatoly V. Zakharov<sup>3</sup>, Nadezhda N. Farrakhova<sup>4</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

<sup>1</sup>p123v@yandex.ru✉, ORCID: 0000-0002-1651-1281

<sup>2</sup>erokhin-yu@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-0577-5898

<sup>3</sup>zakharov-zav@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-8790-7892

<sup>4</sup>atlantida21@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3067-4044

© Пономарев В.С., Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Фаррахова Н.Н., 2024

**Abstract.** *The paper presents the results of a study of the mineralogy of chromitites from an ancient mine located on the slope of Mount Kron near the village of Raskuikha in the Middle Urals. Geologically, the studied chromitites form small lens-shaped bodies in apodunite and apoharzburgite serpentinites of the Early and Middle Ordovician. Ultrabasites are linear bodies confined to the melange zone developed in the northwestern exo-contact of the Sysert metamorphic complex. It has been established that chromitites are represented by primary aluminous magnesiochromite, which, under the conditions of the greenschist facies of metamorphism, was transformed into magnesian and ferruginous chromite. Microprobe analysis determined that the green garnet that makes up the cement in chromitites and the brushes of crystals on it is uvarovite with a content of 53-63 % uvarovite end-member, up to 28 % grossular end-member and up to 22 % andradite end-member. Nine sulfides have been identified in chromitites: godlevskite, nickel pentlandite, heazlewoodite, millerite, chalcopyrite, pyrite, bornite, galena and geerite. The formation of such rich mineralization is associated with the metamorphism of chromitites and their subsequent hydrothermal development.*

**Keywords:** *chromitites, magnesiochromite, chromite, sulfides, uvarovite, Mount Kron, Middle Urals*

**For citation:** Ponomarev V.S., Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Farrakhova N.N. Composition of Chromitites from Ultramafites Framing the Sysert Complex (Mount Kron, Middle Urals). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(4-2):67-76. (In Russ.).

**Acknowledgments** *the work was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 22-17-00027, <https://rscf.ru/project/22-17-00027/>.*

*This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).*

## Введение

Хромитовый рудник расположен на западном склоне горы Крон, приблизительно в 1 км северо-западнее деревни Раскуиха, вблизи р. Чусовая, в Полевском городском округе Свердловской области (Средний Урал). Когда был открыт рудник – неизвестно, предположительно в середине – конце XIX в., так как в книге Н.П. Барбота де Марни, опубликованной в 1910 г. [1], уже упоминается о месторождении хромистого железняка с уваровитом, залегающего большими штоками в змеевиках на Нижне-Исетской даче в 33 верстах от г. Екатеринбургa. Кроме того, описывалось, что рядом с коренным месторождением на берегу р. Чусовая разрабатывается и россыпь хромита [1]. При этом название хромитового рудника не указывалось, хотя, скорее всего, речь шла именно о руднике, расположенном на горе Крон. На известном минералогическом интернет-ресурсе [2] приводятся данные о том, что в 1928 г. месторождение хромита на горе Крон было обследовано геологической партией и составлен отчет о его запасах. Там же указывается, что руднику присвоено название «Хромовая гора». Интересно, что данные по этому руднику не попали в известный реестр хромитовых рудопоявлений Урала [3]. О минеральном составе хромититов горы Крон ничего не известно, никаких литературных источников авторам не удалось найти. В настоящей работе приводится первое детальное изучение минералогии хромититов из рудника на горе Крон.

## Методы исследования

Аналитические исследования, представленные в данной работе, проведены в лаборатории физико-химических методов исследований Института геологии и геохимии УрО РАН (Екатеринбург). Химический состав минералов проанализирован в полированных шлифах на электронно-зондовом микроанализаторе САМЕСА SX 100 с пятью волновыми спектрометрами (аналитик Н.Н. Фаррахова). Изучение акцессорной и сульфидной минерализации проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV фирмы Jeol с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (аналитик Н.Н. Фаррахова). На этом же приборе получены фотографии минералов в режиме обратно рассеянных электронов.

## Объект исследования

В геологическом отношении исследуемые хромититы слагают небольшие линзовидные тела в аподунитовых и апогарцбургитовых серпентинитах раннего и среднего ордовика. Ультрабазиты представляют собой линейные тела, приуроченные к зоне меланжа, развитой в северо-западном экзоконтакте Сысертского метаморфического комплекса (рис. 1). Серпентиниты обрамлены метаморфическими породами девона и силура и принадлежат альпинотипной дунит-



гарц-бургитовой формации. Они характеризуются примерно одинаковым составом и хромитомосны. Контакты ультрабазитов с вмещающими породами повсеместно тектонические [4]. В настоящее время хромитовый рудник на горе Крон представляет собой несколько небольших карьеров и ям глубиной до 10 м и их отвалов (рис. 2). В двух местах отмечаются полузаваленные штольни. Образцы хромитита для исследования отбирались нами как в отвалах, так и в стенках карьеров.

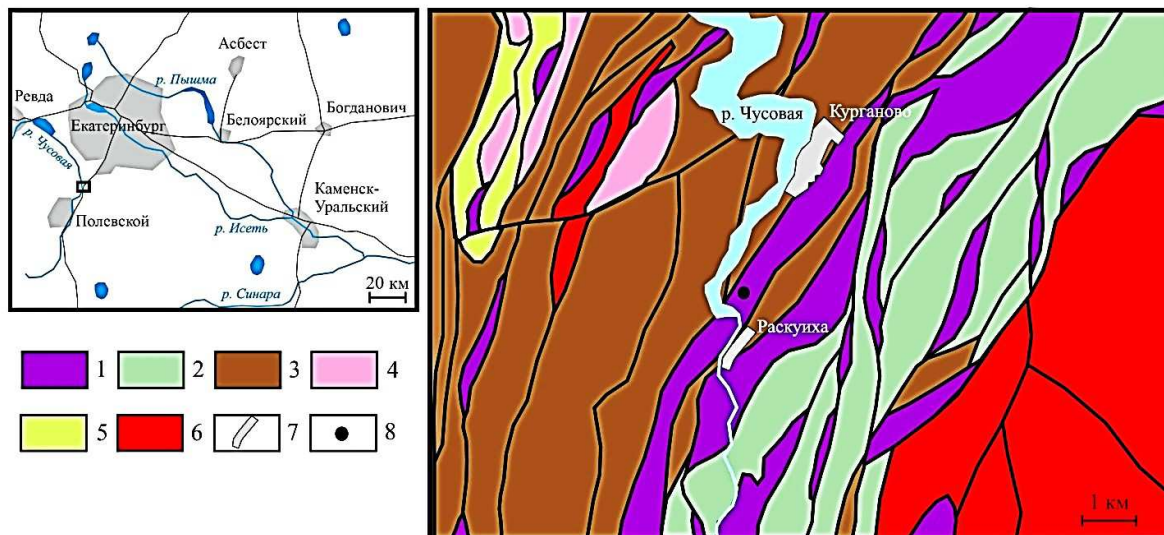


Рис. 1. Место хромитового рудника на горе Крон в окрестностях деревни Раскуиха: а – схема расположения, б – геологическая схема, дано по [4]: 1 – серпентиниты, тальк-карбонатные породы ( $O_{1-2}$ ); 2 – кремнисто-терригенная метаморфическая толща ( $S_{1-2}$ ); 3 – базальты, андезитобазальты, туфопесчаники основного состава (нижнекунгурковская свита,  $D_1$ ); 4 – диориты, плагиограниты (Новоалексеевский комплекс,  $D_1$ ); 5 – габбро, габбро-диориты (Новоалексеевский комплекс,  $D_1$ ); 6 – граниты Сысертского метаморфического комплекса ( $C_{1-2}$ ); 7 – населенные пункты; 8 – хромитовый рудник / Fig. 1. Location of the chromite mine on Mount Kron in the vicinity of the village of Raskuikha: a - location diagram, b - geological diagram, given from [4]: 1 - serpentinites, talc-carbonate rocks ( $O_{1-2}$ ); 2 - siliceous-terrigenous metamorphic sequence ( $S_{1-2}$ ); 3 - basalts, basaltic andesites, tuffaceous sandstones of basic composition (Nizhnekungurkovskaya formation,  $D_1$ ); 4 - diorites, plagiogranites (Novoalekseevsky complex,  $D_1$ ); 5 - gabbro, gabbro-diorites (Novoalekseevsky complex,  $D_1$ ); 6 - granites of the Sysert metamorphic complex ( $C_{1-2}$ ); 7 - settlement; 8 - chromite mine



Рис. 2. Карьер хромитового рудника на горе Крон (Средний Урал). 2021 г. (фото А.В. Захарова) / Fig. 2. Chromite mine quarry on Mount Kron (Middle Urals). 2021 (Photo by A.V. Zakharov)

### Результаты исследования



Рис. 3. Хромитит (фото и образец В.С. Пономарева)  
/ Fig. 3. Chromitite (Photo and sample by V.S. Ponomarev)

Хромититы представлены плотными сливными породами черного цвета с белыми прожилками (рис. 3). Иногда поверхность хромититов покрыта уваровитом. В минеральном составе хромитовых руд отмечаются магнезиохромит, хромит, клинохлор, уваровит, годлевскит, пентландит, хизлевудит, миллерит, халькопирит, пирит, борнит, галенит, джирит.

Хромититы состоят из зерен изометричной или полигональной формы размером до 7 мм. Многие зерна разбиты трещинами. В шлифах хромшпинелиды просвечивают и имеют коричневую окраску. В хромититах наблюдаются линзовидные агрегаты хромшпинелидов с зонами дробления, в которых

встречаются прожилки, выполненные хлоритовым агрегатом мощностью до 1,5 см с включениями раздробленных и идиоморфных зерен хромшпинелидов, окаймленных тонкой корочкой уваровита. По данным микронзондовых анализов, хромитит сложен первичным магнезиохромитом (табл. 1, анализ 4–9) и вторичным хромитом (табл. 1, анализ 1–3). Визуально в шлифах они не отличаются между собой. Под электронным микроскопом в обратно отраженных электронах заметно, что более железистые разновидности хромшпинелидов выглядят немного ярче, чем менее железистые. Содержание хрома, алюминия, магния и железа в хромшпинелидах сильно варьирует. Максимальное содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  отмечается в хромите – 63,06 мас. % (табл. 1, анализ 4), минимальное – 42,63 мас. % (табл. 1, анализ 2) – также в хромите. Во всех хромшпинелидах при пересчете на кристаллохимические формулы отмечается  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – от 0,02 до 0,70 к.ф. В магнезиохромите примеси:  $\text{FeO}$  – до 16,35 мас. % (0,43 к.ф.);  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – до 23,45 мас. % (0,84 к.ф.). В двух анализах магнезиохромита (табл. 1, анализ 8, 9) зафиксировано высокое содержание  $\text{NiO}$  – до 3,90 мас. %, что соответствует  $\approx 10$  мол. % треворитового минала ( $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ). В хромите присутствуют примеси:  $\text{MgO}$  – до 9,47 мас. % (0,47 к.ф.);  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – до 14,24 (0,55 к.ф.). Иногда по краям хлоритовых прожилков и в пустотах зерен хромита замечен хромит, содержащий  $\text{FeO}$  до 22,24 мас. % и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  до 27,24 мас. % (табл. 1, анализ 3). В таком хромите отмечается минимальное количество примеси:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (1,96 мас. %). Близкие по составу хромшпинелиды встречаются на Уфалейском массиве (Южный Урал) [5]. Часто в анализах хромшпинелидов присутствуют примеси  $\text{MnO}$  – до 1,62;  $\text{TiO}_2$  – до 0,31;  $\text{ZnO}$  – до 0,30;  $\text{CoO}$  – до 0,06 мас. %.

Хлорит присутствует во всех образцах в хромититах (рис. 3, 4В – F). Наблюдается в виде цемента и прожилков мощностью 0,1–2,0 мм. В зонах дробления хлоритовый агрегат образует прожилки мощностью до 1 см, в которых наблюдаются отдельные индивиды хромшпинелида с оторочкой уваровита. Выполняет полости в хромшпинелидах. Прожилки хлорита в основном бесцветные, но встречается хлорит, окрашенный в ярко-зеленый цвет. По химическому составу соответствует клинохлору (табл. 2, анализ 1–4). Ярко-зеленый клинохлор имеет в своем составе примесь  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – до 4,50 мас. % (табл. 2, анализ 1).

Уваровит образует прожилки мощностью до 0,5 мм и щетки кристаллов ромбододекаэдрического габитуса темно-зеленого цвета размером до 0,3 мм на хромитите (рис. 4D, F, G, I). Поверхность граней кристаллов блестящая. В зонах дробления в хромитите уваровит образует цемент между зернами хромшпинелида. Химический состав уваровита и его эмпирические формулы представлены в табл. 2 (анализ 5–8). Минерал содержит 53–63 % уваровитового минала, 20–28 % гроссулярового минала и 13–22 % андрадитового минала. Из примесей в минерале присутствует:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – до 5,30;  $\text{TiO}_2$  – до 3,43;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – до 6,83 и  $\text{FeO}$  – до 0,46 мас. %.

Таблица 1 / Table 1

Химический состав в хромшпинелидах, мас. % / Chemical composition of chrome spinels, wt. %

Примесь	№ анализа								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO <sub>2</sub>	0,04	0,01	0,87	0,38	0,04	0,03	0,03	0,10	0,14
TiO <sub>2</sub>	0,30	–	–	–	–	–	0,31	–	0,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,80	14,24	1,96	6,84	23,38	23,45	18,02	10,24	18,12
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	56,10	54,51	42,63	63,06	45,27	46,12	52,31	55,20	47,69
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,13	0,19	0,15	0,19	0,21	0,22	0,19	0,15	0,20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,19	2,01	27,24	0,98	4,10	2,40	0,26	3,41	4,39
FeO	23,88	20,87	22,24	19,18	12,17	14,48	16,35	15,03	12,40
MgO	5,25	7,93	7,68	9,47	15,34	13,87	12,11	9,21	12,05
MnO	1,62	1,23	–	–	0,12	0,19	0,17	0,24	0,11
CoO	0,02	0,02	–	–	–	0,02	0,03	0,06	0,02
NiO	0,12	0,04	–	–	0,17	0,16	0,08	3,47	3,90
ZnO	0,29	0,30	–	–	0,06	0,01	0,04	0,07	–
Сумма	101,74	101,35	102,77	100,10	100,86	100,95	99,90	97,18	99,04
Кристаллохимические формулы									
1	(Fe <sub>0,68</sub> Mg <sub>0,27</sub> Mn <sub>0,05</sub> ) <sub>Σ1,00</sub> (Cr <sub>1,51</sub> Al <sub>0,31</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0,16</sub> Ti <sub>0,01</sub> ) <sub>Σ1,99</sub> O <sub>4</sub>								
2	(Fe <sub>0,57</sub> Mg <sub>0,39</sub> Mn <sub>0,03</sub> ) <sub>Σ0,99</sub> (Cr <sub>1,41</sub> Al <sub>0,55</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0,05</sub> ) <sub>Σ2,01</sub> O <sub>4</sub>								
3	(Fe <sub>0,64</sub> Mg <sub>0,39</sub> ) <sub>Σ1,04</sub> (Cr <sub>1,16</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0,70</sub> Al <sub>0,08</sub> Si <sub>0,03</sub> ) <sub>Σ1,98</sub> O <sub>4</sub>								
4	(Fe <sub>0,54</sub> Mg <sub>0,47</sub> ) <sub>Σ1,01</sub> (Cr <sub>1,68</sub> Al <sub>0,27</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0,02</sub> Si <sub>0,01</sub> ) <sub>Σ1,98</sub> O <sub>4</sub>								
5	(Mg <sub>0,69</sub> Fe <sub>0,31</sub> ) <sub>Σ1,00</sub> (Cr <sub>1,08</sub> Al <sub>0,83</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0,09</sub> ) <sub>Σ2,00</sub> O <sub>4</sub>								
6	(Mg <sub>0,63</sub> Fe <sub>0,37</sub> ) <sub>Σ1,00</sub> (Cr <sub>1,10</sub> Al <sub>0,84</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0,05</sub> ) <sub>Σ1,99</sub> O <sub>4</sub>								
7	(Mg <sub>0,57</sub> Fe <sub>0,43</sub> ) <sub>Σ1,00</sub> (Cr <sub>1,30</sub> Al <sub>0,67</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0,01</sub> Ti <sub>0,01</sub> ) <sub>Σ1,99</sub> O <sub>4</sub>								
8	(Mg <sub>0,47</sub> Fe <sub>0,43</sub> Ni <sub>0,10</sub> Mn <sub>0,01</sub> ) <sub>Σ1,01</sub> (Cr <sub>1,49</sub> Al <sub>0,41</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0,09</sub> ) <sub>Σ1,99</sub> O <sub>4</sub>								
9	(Mg <sub>0,57</sub> Fe <sub>0,33</sub> Ni <sub>0,10</sub> ) <sub>Σ1,00</sub> (Cr <sub>1,20</sub> Al <sub>0,68</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0,11</sub> ) <sub>Σ1,99</sub> O <sub>4</sub>								

Примечание. 1–4 – хромит; 5–9 – магнезиохромит; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – дано по стехиометрии.

Таблица 2 / Table 2

Химический состав минералов, мас. % / Chemical composition of minerals, wt. %

Примесь	№ анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO <sub>2</sub>	29,37	31,42	30,85	31,28	36,15	35,74	36,97	36,43
TiO <sub>2</sub>	–	0,01	0,01	0,01	0,24	0,30	3,43	2,58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,14	18,54	20,11	19,89	5,30	4,17	4,18	5,25
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,50	1,12	0,28	0,67	16,46	18,91	17,65	16,53
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	–	–	–	6,83	6,13	4,00	3,80
FeO	0,89	1,80	2,31	1,99	–	–	0,46	0,38
MgO	31,64	32,34	31,77	31,98	0,06	0,08	–	–
MnO	–	0,02	0,08	–	–	–	–	–
CaO	0,02	0,02	0,04	0,07	34,90	34,73	33,97	33,16
Сумма	85,54	85,25	85,41	85,82	99,94	100,06	100,66	98,13
Кристаллохимические формулы								
1	(Mg <sub>4,56</sub> Al <sub>0,36</sub> Fe <sub>0,07</sub> ) <sub>Σ4,99</sub> (Al <sub>0,66</sub> Cr <sub>0,34</sub> ) <sub>Σ1,00</sub> [(Si <sub>2,84</sub> Al <sub>1,16</sub> ) <sub>Σ4,00</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> ]							
2	(Mg <sub>4,64</sub> Al <sub>0,21</sub> Fe <sub>0,15</sub> ) <sub>Σ5,00</sub> (Al <sub>0,91</sub> Cr <sub>0,09</sub> ) <sub>Σ1,00</sub> [(Si <sub>3,02</sub> Al <sub>0,98</sub> ) <sub>Σ4,00</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> ]							
3	(Mg <sub>4,55</sub> Al <sub>0,26</sub> Fe <sub>0,19</sub> ) <sub>Σ5,00</sub> (Al <sub>0,98</sub> Cr <sub>0,02</sub> ) <sub>Σ1,00</sub> [(Si <sub>2,96</sub> Al <sub>1,04</sub> ) <sub>Σ4,00</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> ]							
4	(Mg <sub>4,56</sub> Al <sub>0,28</sub> Fe <sub>0,16</sub> Ca <sub>0,01</sub> ) <sub>Σ5,01</sub> (Al <sub>0,95</sub> Cr <sub>0,05</sub> ) <sub>Σ1,00</sub> [(Si <sub>2,99</sub> Al <sub>1,01</sub> ) <sub>Σ4,00</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> ]							
5	(Ca <sub>3,04</sub> Mg <sub>0,01</sub> ) <sub>Σ3,05</sub> (Cr <sub>1,06</sub> Al <sub>0,46</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0,42</sub> Ti <sub>0,01</sub> ) <sub>Σ1,95</sub> [(Si <sub>2,95</sub> Al <sub>0,05</sub> ) <sub>Σ3,00</sub> O <sub>12</sub> ]							
6	(Ca <sub>3,05</sub> Mg <sub>0,01</sub> ) <sub>Σ3,06</sub> (Cr <sub>1,22</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0,38</sub> Al <sub>0,32</sub> Ti <sub>0,02</sub> ) <sub>Σ1,94</sub> [(Si <sub>2,92</sub> Al <sub>0,08</sub> ) <sub>Σ3,00</sub> O <sub>12</sub> ]							
7	(Ca <sub>2,97</sub> ) <sub>Σ3,00</sub> (Cr <sub>1,14</sub> Al <sub>0,40</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0,25</sub> Ti <sub>0,21</sub> ) <sub>Σ2,00</sub> [Si <sub>3,00</sub> O <sub>12</sub> ]							
8	(Ca <sub>2,95</sub> Fe <sub>0,03</sub> ) <sub>Σ2,98</sub> (Cr <sub>1,09</sub> Al <sub>0,51</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>0,24</sub> Ti <sub>0,16</sub> ) <sub>Σ2,00</sub> [Si <sub>3,02</sub> O <sub>12</sub> ]							

Примечание. 1–4 – клинохлор; 5–8 – уваровит; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – дано по стехиометрии уваровита.



### Сульфидная минерализация хромититов

В хромититах нами установлены следующие рудные минералы: годлевскит, пентландит, хизлевудит, миллерит, халькопирит, пирит, борнит, галенит и джирит.

*Годлевскит* – наиболее часто встречающийся сульфид в хромититах (рис. 4С). Образует призматические и вытянутые зерна размером до 5 мкм в виде включений в хромшпинелиде и зерна неправильной формы размером до 15 мкм в прожилках уваровита и клинохлора (рис. 4F). Содержание железа в минерале – 1,99 мас. % (табл. 3, анализ 1). В химическом составе отмечаются примеси: Co – 0,38; Zn – 0,07 и Se – 0,04 мас. %.

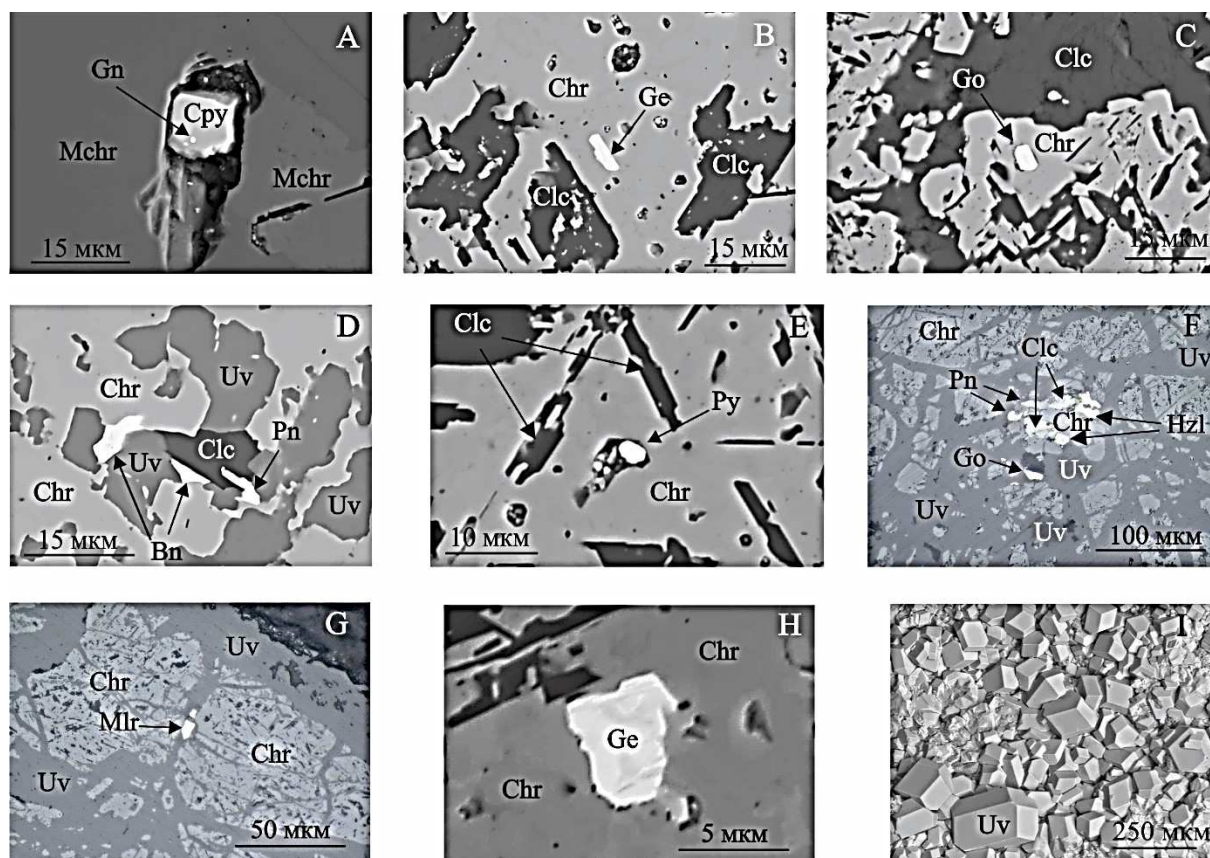


Рис. 4. Морфология аксессуарных минералов из хромититов: А – изометричное зерно халькопирита (Cpy) с субмикронными включениями галенита (Gn) в магниохромите (Mchr); В – призматический индивид джирита (Ge) в хромите (Chr); С – короткопризматический индивид годлевскита (Go) в хромите; D – зерна борнита (Bn) и пентландита (Pn) неправильной формы в клинохлор-уваровитовом цементе (Uv) в хромитите; E – изометричное зерно пирита (Py) в хромите; F – ксеноморфные зерна хизлевудита (Hzl), годлевскита и пентландита в цементе уваровита в хромитите; G – раздробленный индивид миллерита (Mlr) в уваровитовом цементе в хромитите; H – субизометричное зерно джирита со структурой распада в хромите; I – ромбододекаэдрические кристаллы уваровита на хромитите; Clc – клинохлор; А-Е, H, I – BSE-фото; F, G – фото в отраженном свете / Fig. 4. Morphology of accessory minerals from chromitites. A - isometric grain of chalcopyrite (Cpy) with submicron inclusions of galena (Gn) in magnesiochromite (Mchr); B - prismatic individual of geerite (Ge) in chromite (Chr); C - short-prismatic individual of godlevskite (Go) in chromite; D - grains of bornite (Bn) and pentlandite (Pn) of irregular shape in clinocllore-uvarovite cement (Uv) in chromitite; E - isometric grain of pyrite (Py) in chromite; F - xenomorphic grains of heazlewoodite (Hzl), godlevskite and pentlandite in uvarovite cement in chromitite; G - crushed millerite individual (Mlr) in uvarovite cement in chromitite; H - subisometric grain of geerite with a decay structure in chromite; I - crystals of uvarovite on chromitite. Clc – clinocllore; A-E, H, I - BSE-photo; F, G - photo in reflected light

*Хизлевудит* встречается в зоне дробления в хромититах, выполненных тонкозернистым агрегатом уваровита и клинохлора (рис. 4F). Химический состав минерала стехиометричен. Из примесей в минерале отмечается Fe – 0,83; Co – 0,05 и Zn – 0,08 мас. % (табл. 3, анализ 3).

*Борнит* встречается по краям полостей в хромите, которые выполнены уваровитом и клинохлором (рис. 4D). Минерал образует зерна вытянутой и неправильной формы размером до 10 мкм. В химическом составе борнита (табл. 3, анализ 7) отмечается небольшой дефицит меди и избыток железа.

*Миллерит* образует единичные вытянутые желтые зерна размером до 20 мкм в прожилках клинохлора (рис. 4G). Минерал содержит примесь Fe (10,19 мас. %) и Co (2,42 мас. %) (табл. 3, анализ 4).

*Пирит* – редкий минерал в хромититах (рис. 4E). Образует изометричные зерна размером до 5 мкм в полостях, выполненных хлоритом в хромите. Химический состав пирита отвечает теоретическому (табл. 3, анализ 6).

*Халькопирит* встречается в виде единичных изометричных зерен размером до 30 мкм в магнезиохромите (рис. 4A). Халькопирит иногда содержит изометричные включения *галенита* (рис. 4A; определен по спектру ЭДС) размером до 0,5 мкм. Состав халькопирита (табл. 3, анализ 5) отвечает теоретическому.

*Пентландит* образует зерна неправильной формы размером до 30 мкм в прожилках уваровита и клинохлора (рис. 4D, F). По химическому составу минерал относится к никелистому пентландиту (табл. 3, анализ 2). В химическом составе пентландита отмечается примесь Co – 1,34 мас. %.

*Джирит* – редкий сульфид меди в хромититах (рис. 4B, H). Отмечается в виде коротко- и длиннопризматических индивидов размером до 10 мкм, встречается непосредственно в хромите. Химический состав минерала близок к стехиометрической формуле джирита (табл. 3, анализ 2).

Таблица 3 / Table 3

Химический состав сульфидов, мас. % / Chemical composition of sulfides, wt. %

Элемент	№ анализа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Cu	–	–	0,02	0,04	33,94	–	62,18	75,43
Ni	64,31	40,99	73,37	49,81	–	–	–	–
Fe	1,99	24,79	0,83	10,19	30,58	46,95	12,04	–
Co	0,38	1,34	0,05	2,42	–	–	–	–
Zn	0,07	0,01	0,08	0,05	–	–	–	–
S	32,30	32,02	26,40	36,44	35,48	53,05	25,78	24,57
Se	0,04	0,01	–	–	–	–	–	–
Сумма	99,09	99,16	100,75	98,95	100,00	100,00	100,00	100,00
Кристаллохимические формулы								
1	(Ni <sub>8,68</sub> Fe <sub>0,28</sub> Co <sub>0,05</sub> Zn <sub>0,01</sub> )Σ <sub>9,02</sub> S <sub>7,98</sub> – годлевскит							
2	(Ni <sub>5,49</sub> Fe <sub>3,49</sub> Co <sub>0,18</sub> )Σ <sub>9,16</sub> S <sub>7,84</sub> – пентландит							
3	(Ni <sub>2,99</sub> Fe <sub>0,04</sub> )Σ <sub>3,03</sub> S <sub>1,97</sub> – хизлевудит							
4	(Ni <sub>0,77</sub> Fe <sub>0,17</sub> Co <sub>0,05</sub> )Σ <sub>3,03</sub> S <sub>1,97</sub> – миллерит							
5	Cu <sub>0,98</sub> Fe <sub>1,00</sub> S <sub>2,02</sub> – халькопирит							
6	Fe <sub>1,01</sub> S <sub>1,99</sub> – пирит							
7	Cu <sub>4,90</sub> Fe <sub>1,08</sub> S <sub>4,02</sub> – борнит							
8	Cu <sub>7,90</sub> S <sub>5,10</sub> – джирит							

### Обсуждение результатов

В результате нашего исследования установлено, что для хромититов с горы Крон характерна обильная трещиноватость и значительное количество цемента (хлоритового, уваровитового и смешанного хлорит-уваровитового). Зерна хромшпинелидов имеют неоднородный химический состав и в основном отвечают по составу хромиту, который занимает основной объем зерен и развивается вдоль трещин в минерале. В меньшем количестве в центральных частях зерен присутствует первичный магнезиохромит. Нередко в периферийной зоне зерен хромита отмечаются каймы с высоким содержанием трехвалентного железа (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – до 27,24 мас. %). На известной петрологической классификационной диаграмме Al – Cr – Fe<sup>3+</sup> [6] большая часть полученных анализов исследуемых хромшпинелидов попала в поле алюмохромита (рис. 5). Два анализа попа-

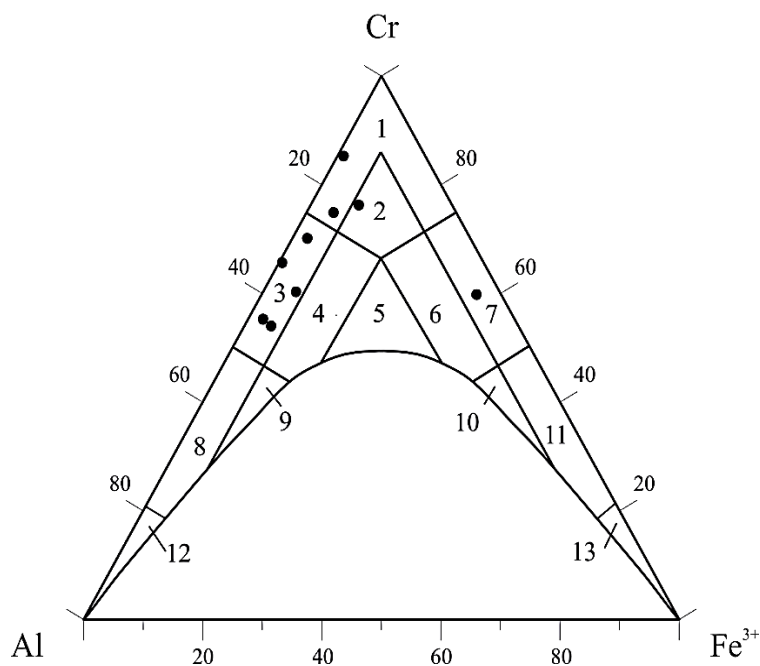


Рис. 5. Диаграмма составов хромшпинелидов хромитового рудника. Поля составов по классификации Н.В. Павлова и др. [6]:  
 1 – хромит; 2 – субферрихромит; 3 – алюминохромит;  
 4 – субферриалюмохромит; 5 – ферриалюмохромит;  
 6 – субалюмоферрихромит; 7 – феррихромит; 8 – хромпикотит;  
 9 – субферрихромпикотит; 10 – субалюмохроммагнетит;  
 11 – хроммагнетит; 12 – пикотит; 13 – магнетит / Fig. 5. Diagram of the composition of chrome spinels from a chromite mine. Composition fields according to N.V. Pavlov classification [6]:  
 1 - chromite; 2 - subferrichromite; 3 - aluminum chromite;  
 4 - subferrialuminumchromite; 5 - ferrialuminumchromite;  
 6 - subaluminum ferrichromite; 7 - ferrichromite; 8 - chromepicotite;  
 9 - subferrichromepicotite; 10 - subaluminum-chromium magnetite;  
 11 - chromium magnetite; 12 - picotite; 13 - magnetite

практически не содержит железо, тогда как в исследуемом гранате оно присутствует во всех анализах в значительном количестве ( $Fe_2O_3$  до 6,83 мас. %). Кристаллы уваровита из горы Крон содержат больше примеси  $TiO_2$  (до 3,43 мас. %), чем уваровит (до 1,44 мас. % [12]; до 2,1 мас. % [10]) из Сарановского месторождения.

Сульфидная минерализация в хромититах представлена девятью минералами, которые в основном тяготеют к зонам дробления хромшпинелидов: халькопирит и галенит встречены нами в магнезиохромите; джирит – в хромите; пентландит – как в чисто уваровитовом, так и клинхлор-уваровитовом цементе хромититов; хизлеудит, миллерит – в уваровитовом цементе сильнодеформированных хромититов; годлевскит отмечается как в виде включений в хромите, так и в уваровитовом цементе; борнит установлен в хлорит-уваровитовом цементе хромититов. Таким образом, в первичном магнезиохромите в хромититах установлен только халькопирит с включениями галенита, остальные минералы встречаются в хромите и хлорит-уваровитовом или чисто уваровитовом цементе хромититов. Подобное минеральное разнообразие для хромититов не редкость и отмечается в хромититах Карабашского массива (Южный Урал) [9], на Кемпирсайском массиве (Южный Урал) [13], Харчерузском массиве (Полярный Урал) [14], в хромититах Эргакского массива (Западный Саян) [15] и др. Образование такой богатой минерализации в достаточно убогих хромитовых рудах связано с их метаморфизмом и последующей гидротермальной проработкой под влиянием рядом расположенного крупного Сысертского метаморфического комплекса, формирование которого происходило в течение долгого времени – в пределах 435–254 млн лет [16]. При этом возраст последнего этапа метаморфизма нами датируется ранней пермью [17].

ли в поле хромита, один – в поле субферрихромита и один – в поле феррихромита. Близкий состав к хромшпинелидам с горы Крон имеют хромшпинелиды из Центрального месторождения и рудопроявления Енгайское-1 на массиве Рай-Из на Приполярном Урале [7], а также хромиты рядом расположенного Каменноозерского проявления хромититов Шабровского рудного поля [8] и хромшпинелиды Поклонной горы Карабашского гипербазитового массива на Южном Урале [9].

Уваровит с хромитового рудника на склоне горы Крон отличается от уваровита известного Сарановского месторождения, расположенного в Пермском крае, где уваровит образует щетки и отдельные кристаллы ромбододекаэдрического габитуса размером до 1,5 см на хромите [10]. По литературным данным, содержание  $Cr_2O_3$  в уваровите из хромититов Главного Сарановского месторождения варьирует в широких пределах – от близких значений с уваровитом с горы Крон ( $Cr_2O_3$  16,46–18,91 мас. %) до более хромистых разностей ( $Cr_2O_3$  15,34–24,36 мас. % [11];  $Cr_2O_3$  24,81–26,64 мас. % [12]). Также сарановский уваровит в своем составе



## Выводы

Таким образом, нами получены первые данные по минералогии хромититов из старинного рудника, расположенного на склоне горы Крон возле деревни Раскуиха на Среднем Урале. Наши исследования показали, что первичный глиноземистый магнезиохромит из хромититов в условиях зеленосланцевой фации метаморфизма преобразовался в магнезиальный и железистый хромит. Микронзондовым анализом определено, что зеленый гранат на хромититах представлен уваровитом с содержанием 53–63 % уваровитового минала, до 28 % гроссулярового минала и до 22 % андрадитового минала. В хромититах установлено девять аксессуарных рудных минералов: годлевскит, никелистый пентландит, хизлевудит, миллерит, халькопирит, пирит, борнит, галенит и джирит. Образование такой богатой минерализации связано с метаморфизмом хромититов и их последующей гидротермальной проработкой.

## Список источников

1. Барбот де Марни Н.П. Урал и его богатства. Екатеринбург: Изд. П.И. Певина, Тип. газ. «Уральская жизнь», 1910. 413 с.
2. URL: <https://webmineral.ru/deposits/item.php?id=5064> (дата обращения: 12.04.2024).
3. Перевозчиков Б.В., Булыкин Л.Д., Попов И.И., Орфаницкий В.Л., Андреев М.И., Сначев В.И., Даниленко С.А., Черкасов В.Л., Ченцов А.М., Жарикова Л.Н., Ключко А.А. Реестр хромитопоявлений в альпинотипных ультрабазитах Урала. Пермь: КамНИИКИГС, 2000. 474 с.
4. Калугина Р.Д., Копанев В.Ф., Стороженко Е.В., Лукин В.Г., Степанов А.Е., Михалева Е.Н., Рапорт М.С., Ильясова Г.А., Суслов Д.Л., Шуб И.З., Михайлов А.П., Глазырина Н.С., Герасименко Б.Н. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. М.: Московский филиал ВСЕГЕИ, 2017. 180 с.
5. Савельев Д.Е. Хромититы Уфалейского ультрамафитового массива (Южный Урал) // Георесурсы. 2022. Т. 24, № 3. С. 197–209.
6. Павлов Н.В., Кравченко Г.Г., Чупрынина И.И. Хромиты Кимперсайского плутона. М.: Наука, 1968. 178 с.
7. Вахрушева Н.В., Ширяев П.Б., Степанов А.Е., Богданова А.Р. Петрология и хромитоносность ультраосновного массива Рай-Из (Полярный Урал). Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 2017. 265 с.
8. Бакшеев И.А., Ерохин Ю.В., Екименкова И.А., Захаров А.В., Григорьев В.В., Япаскурт В.О., Кошлякова Н.Н. Хромистый турмалин и Cr-Sb-W-содержащий рутил Каменноозерского проявления хромититов, Средний Урал, Россия // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4: Геология. 2023. № 3. С. 63–76.
9. Попова В.И., Белогуб Е.В., Рассомахин М.А., Попов В.А., Хворов П.В. Минералогия хромититов Поклонной горы Карабашского массива на Южном Урале // Минералогия. 2022. Т. 8, № 4. С. 15–33.
10. Иванов О.К. Минералогия Сарановского хромитового месторождения, Урал // Минерал. альманах. 2016. Т. 21, вып. 2. 128 с.
11. Иванов О.К., Бушмакин А.Ф. Уваровит Сарановского хромитового месторождения // Уральский геол. журн. 1998. № 1. С. 3–18.
12. Вахрушева Н.В., Ерохин Ю.В., Ширяев П.Б. Высокохромистые силикаты в хромититах главного Сарановского месторождения (Пермский край) // Вестн. УрО РМО. 2021. № 18. С. 5–11.
13. Юричев А.Н. Аксессуарные сульфиды Кемпирсайского ультрамафитового массива, Южный Урал // Руды и металлы. 2018. № 4. С. 67–75.
14. Юричев А.Н. Аксессуарные сульфиды из хромититов Харчерузского ультрамафитового массива, Полярный Урал // Руды и металлы. 2020. № 4. С. 54–64.
15. Юричев А.Н. Аксессуарные сульфиды и арсениды из хромититов Эргакского ультрамафитового массива, Западный Саян // Руды и металлы. 2019. № 3. С. 71–79.
16. Echtler H.P., Ivanov K.S., Ronkin Yu.L., Karsten L.A., Hetzel R., Noskov A.G. The tectono-metamorphic evolution of gneiss complexes in the Middle Urals, Russia: a reappraisal // Tectonophysics. 1997. Vol. 276. P. 229–251.
17. Пономарев В.С., Хиллер В.В., Ерохин Ю.В. Th-U-Pb датирование монацита из кианитовых гнейсов Сысертского метаморфического комплекса (Средний Урал) // Вестн. ВГУ. Серия: Геология. 2017. № 3. С. 61–65.

## References

1. Barbot de Marny N.P. *The Urals and its riches*. Ekaterinburg: Ed. by P. I. Pevin, Newspaper “Ural Life” Printing House; 1910. 413 p. (In Russ.).
2. Available from: <https://webmineral.ru/deposits/item.php?id=5064> [Accessed 12th April 2024]. (In Russ.).

3. Perevozchikov B.V., Bulykin L.D., Popov I.I., Orfanitsky V.L., Andreev M.I., Snachev V.I., Danilenko S.A., Cherkasov V.L., Chentsov A.M., Zharikova L.N., Klochko A.A. *Register of chromite occurrences in alpine-type ultrabasites of the Urals*. Perm: Kama Scientific Research Institute for Integrated Research of Deep and Ultra-Deep Wells Press; 2000. 474 p. (In Russ.).
4. Kalugina R.D., Kopanev V.F., Storozhenko E.V., Lukin V.G., Stepanov A.E., Mikhaleva E.N., Rapoport M.S., Ilyasova G.A., Suslov D.L., Shub I.Z., Mikhailov A.P., Glazyrina N.S., Gerasimenko B.N. *State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000*. Moscow: Moscow branch of the All-Russian Scientific Research Geological Institute Press; 2017. 180 p. (In Russ.).
5. Savelyev D.E. Chromitites of the Ufaley ultramafic massif (Southern Urals). *Georesursy = Georesources*. 2022;24(3):197-209. (In Russ.).
6. Pavlov N.V., Kravchenko G.G., Chuprynina I.I. *Chromites of the Kimpersai pluton*. Moscow: Nauka Publ.; 1968. 178 p. (In Russ.).
7. Vakhrusheva N.V., Shiryayev P.B., Stepanov A.E., Bogdanova A.R. *Petrology and chromite content of the ultrabasic massif Rai-Iz (Polar Ural)*. Ekaterinburg: Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Press; 2017. 265 p. (In Russ.).
8. Baksheev I.A., Erokhin Yu.V., Ekimenkova I.A., Zakharov A.V., Grigoriev V.V., Yapaskurt V.O., Koshlyakova N.N. Chromium tourmaline and Cr-Sb-W-containing rutile from the Kamennoozersk chromitite occurrence, Middle Urals, Russia. *Vestn. Mosk. un-ta. Seriya 4: Geologiya = Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2023;(3):63-76. (In Russ.).
9. Popova V.I., Belogub E.V., Rassomakhin M.A., Popov V.A., Khvorov P.V. Mineralogy of chromitites of Poklonnaya Gora of the Karabash massif in the Southern Urals. *Mineralogiya = Mineralogy*. 2022;8(4):15-33. (In Russ.).
10. Ivanov O.K. Mineralogy of the Saranovsk chromite deposit, Ural. *Mineral. al'manakh = Mineralogical Almanac*. 2016;21(2). 128 p. (In Russ.).
11. Ivanov O.K., Bushmakin A.F. Uvarovite from the Saranovsk chromite deposit. *Ural'skii geologicheskii zhurnal = Ural Geological Journal*. 1998;(1):3-18. (In Russ.).
12. Vakhrusheva N.V., Erokhin Yu.V., Shiryayev P.B. High-chromium silicates in chromitites of the main Saranovskoye deposit (Perm region). *Vestn. UrO RMO = Bulletin of the Ural branch of Russian Mineralogical Society*. 2021;(18):5-11. (In Russ.).
13. Yurichev A.N. Accessory sulfides of the Kempirsay ultramafic massif, Southern Urals. *Rudy i metally = Ores and Metals*. 2018;(4):67-75. (In Russ.).
14. Yurichev A.N. Accessory sulfides from chromitites of the Kharcheruz ultramafic massif, Polar Urals. *Rudy i metally = Ores and Metals*. 2020;(4):54-64. (In Russ.).
15. Yurichev A. N. Accessory sulfides and arsenides from chromitites of the Ergak ultramafic massif, Western Sayan. *Rudy i metally = Ores and Metals*. 2019;(3):71-79. (In Russ.).
16. Echtler H.P., Ivanov K.S., Ronkin Yu.L., Karsten L.A., Hetzel R., Noskov A.G. The tectono-metamorphic evolution of gneiss complexes in the Middle Urals, Russia: a reappraisal. *Tectonophysics*. 1997;276:229-251.
17. Ponomarev V.S., Khiller V.V., Erokhin Yu.V. Th-U-Pb dating of monazite from kyanite gneisses of the Sysert metamorphic complex (Central Urals). *Vestn. VGU. Seriya: Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2017;(3):61-65. (In Russ.).

#### **Информация об авторах**

В.С. Пономарев – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник.

Ю.В. Ерохин – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник.

А.В. Захаров – научный сотрудник.

Н.Н. Фаррахова – научный сотрудник.

#### **Information about the authors**

V.S. Ponomarev – Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Senior Researcher.

Yu.V. Erokhin – Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Leading Researcher.

A.V. Zakharov – Researcher.

N.N. Farrakhova – Researcher.

Статья поступила в редакцию 18.04.2024; одобрена после рецензирования 17.05.2024; принята к публикации 16.10.2024.  
The article was submitted 18.04.2024; approved after reviewing 17.05.2024; accepted for publication 16.10.2024.

Научная статья

УДК 551.510.5

doi: 10.18522/1026-2237-2024-4-2-77-92

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СУТОЧНОЙ ОСЦИЛЛЯЦИИ ПЛОТНОСТИ ДЛЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НОЧНЫХ НИЗКОУРОВНЕВЫХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ

**Анатолий Анатольевич Радионов**

Южный математический институт – филиал Владикавказского научного центра РАН, Владикавказ,  
Республика Северная Осетия – Алания, Россия  
aar200772@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6934-6873

**Аннотация.** Рассматривается задача возникновения ночных низкоуровневых струйных течений в пограничном слое атмосферы. Учитываются суточные изменения температуры и плотности воздуха над равнинной поверхностью. Система нелинейных уравнений аэродинамики сводится к системе линейных уравнений при упрощенном рассмотрении математической модели динамики струйных течений без использования приближения Буссинеска. Приближенное аналитическое решение системы уравнений позволяет описать механизм суточной осцилляции плотности, под действием которой усиление горизонтальных компонент скорости ветра происходит за счет резонанса, развивающегося при достаточно малом коэффициенте усиления. Резонанс возникает при взаимодействии силы Кориолиса и суточных периодических изменений плотности воздуха. Обсуждается зависимость решения от параметров модели. Горизонтальные скорости ветра в струйном течении усиливаются и могут превышать значение геострофического ветра. Основные свойства суточной осцилляции плотности похожи на свойства инерциальной осцилляции, но скорость усиления ветра может быть существенно выше.

**Ключевые слова:** аналитическая модель, сжимаемый воздух, ночные низкоуровневые струйные течения, резонанс, суточная осцилляция плотности

**Для цитирования:** Радионов А.А. Аналитическая модель суточной осцилляции плотности для возникновения ночных низкоуровневых струйных течений // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 4-2. С. 77–92.

**Благодарности:** автор благодарит М.А. Каллистратову и Е.С. Каменецкого за указание интересной исследовательской области и полезное обсуждение, а также анонимных рецензентов журнала *Boundary-Layer Meteorology* за полезную дискуссию.

Статья опубликована на условиях лицензии *Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)*.

Original article

## ANALYTICAL STUDY OF THE LOW LEVEL JET FORMATION IN A DIURNAL DENSITY OSCILLATION MODEL

**Anatoly A. Radionoff**

Southern Mathematical Institute – Branch of Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,  
Vladikavkaz, Republic of North Ossetia-Alania, Russia  
aar200772@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6934-6873

**Abstract.** A problem of nocturnal low-level jet (LLJ) formation taking into account the diurnal density variations in the atmospheric boundary layer is studied analytically. The system of nonlinear partial differential equations of hydrodynamics is reduced to a system of linear differential equations for a simplified consideration of the LLJ phenomenon. This model does not use the Boussinesq approximation. An analytical solution of this system of equations shows that LLJ can develop due to the resonance mechanism at a small coefficient of amplification, the value of

© Радионов А.А., 2024

which determines an amplification of wind speed. The resonance occurs due to the interaction of rotation forces and diurnal density variations. This diurnal density oscillation mechanism amplifies only the horizontal components of wind velocity, which can be supergeostrophic. The diurnal density oscillation mechanism is capable to amplify the horizontal components of the wind speed over a shorter time compared to the inertial oscillation mechanism. The basic properties of the solution extend the inertial oscillation mechanism and have some additional behaviour.

**Keywords:** analytical model, compressible air, nocturnal low-level jet, resonance, diurnal density oscillation

**For citation:** Radionoff A.A. Analytical Study of the Low Level Jet Formation in a Diurnal Density Oscillation Model. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(4-2):77-92. (In Russ.).

**Acknowledgments:** the author thanks M.A. Kallistratova and E.S. Kamenetsky for pointing out an interesting research area and useful discussions, and the author is also grateful to the anonymous reviewers of the *Boundary-Layer Meteorology Journal* for useful discussions.

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

## Введение

Вертикальный профиль горизонтальной скорости ветра над равнинными участками поверхности изменяется во время ночного выхолаживания и формирует довольно острый максимум приблизительно на высоте, где расположена ночная инверсия температуры. При этом в пограничном слое атмосферы не возникает заметных вертикальных движений воздуха. Этот максимум скорости ветра называется ночным низкоуровневым струйным течением, в англоязычной литературе используется термин nocturnal low-level jet (LLJ), являющийся общепринятым. Особенно ярко явление LLJ выражается при ясном ночном небе, когда выхолаживание поверхности происходит наиболее интенсивно. Точной связи с инверсией температуры не отмечается, и в измерениях наблюдаются сложные профили модуля горизонтальной скорости ветра, зачастую имеющие ярко выраженный максимум.

Ночные низкоуровневые струйные течения оказывают значительное влияние на погоду и региональный климат [1, 2]. Важность LLJ для изучения закономерностей ночного пограничного слоя атмосферы отмечена в работах [3–7], где указывается, что LLJ могут быть источником сдвиговой турбулентности и причиной распространения загрязняющих веществ на неожиданно большие расстояния. LLJ необходимо учитывать при анализе закономерностей миграции птиц и насекомых [8, 9], для обеспечения безопасности авиационных полетов, а также при планировании энергетических объектов ветрогенерации.

Общепринятое теоретическое объяснение этого физического явления представлено в работе А. Блакадара [10], где развитие явления LLJ объясняется инерциальной осцилляцией. Принимается, что в дневное время в пограничном слое атмосферы движение воздуха сбалансировано действием трех факторов: силы Кориолиса, барического градиента и сил турбулентного трения. После захода солнца в вечернее и ночное время суток турбулентное трение значительно уменьшается из-за понижения температуры. В результате баланс, существовавший в дневное время, нарушается, а разность между геострофическим ветром и дневным профилем ветра (максимальная вблизи поверхности) вращается в горизонтальной плоскости, что приводит к увеличению скорости ветра на высоте, где ранее имелось заметное трение. Ближе к утру скорость ветра превышает геострофическую и формирует максимум скорости ветра, который управляется силой Кориолиса. Вблизи максимума на профиле скорости ветер вращается в горизонтальной плоскости антициклонически в Северном полушарии с периодом вращения  $2\pi/f$ , где  $f$  – параметр Кориолиса. Такой физический механизм называется инерциальной осцилляцией. И хотя имеют значение различные факторы (блокировка, влияние поверхности, сезона [11–13]), механизм инерциальной пульсации считается основным для формирования LLJ.

По указанным причинам внимание исследователей сосредоточено на дальнейшем развитии всестороннего понимания феномена LLJ. В работе [14] учитывается зависимость геострофического ветра от высоты, часто возникающая в измерениях, и анализируются особенности инерциальной осцилляции в этом случае. Предлагается объяснение механизма возникновения нижней

обратной пульсации, часто наблюдаемой в нижней части прямой пульсации основного потока LLJ и вращающейся с ней в противофазе.

В классических работах [15, 16] представлено аналитическое решение для профиля ветра в пограничном слое атмосферы при постоянной турбулентной вязкости воздуха и его детальный анализ. В работе [17] рассматривается аналитическое решение, описывающее внезапное уменьшение турбулентной вязкости воздуха и дальнейшее развитие инерциальной осцилляции в пограничном слое атмосферы. Зависимость вязкости от высоты и влияние конвективных слагаемых на описание инерциальной пульсации представлены в аналитическом исследовании [18]. Полученное здесь решение показывает более реалистичные профили горизонтальной скорости ветра в дневное время по сравнению с решением В. Экмана [15]. Сравнение некоторых теоретических моделей представлено в работе [19].

Множество работ посвящено описанию полевых измерений характеристик пограничного слоя атмосферы, в частности профилей скорости ветра при LLJ [12, 20–22]. Наиболее цитируемым является Вангара-эксперимент, проведенный специально для измерения характеристик LLJ над плоской подстилающей поверхностью [23]. В цикле работ Т. Ямады и Дж. Меллора [24] описаны вычислительные алгоритмы, позволяющие исследовать геофизическую турбулентность с использованием моделей различной степени сложности и детальности. При моделировании LLJ для случаев измерений Вангара-эксперимента показано хорошее соответствие с результатами вычислений. Работа [25] посвящена математическому моделированию нестационарного пограничного слоя атмосферы и анализу развития явлений турбулентности.

Относительно близкие значения частот суточных изменений турбулентной вязкости воздуха и инерциальной частоты позволяют предполагать возможность возникновения резонансных явлений в пограничном слое атмосферы. Несколько работ посвящено описанию возможного механизма резонансного усиления скорости ветра при LLJ. Если имеется гармоническая во времени составляющая потока импульса в уравнениях движения, то возможно резонансное усиление компонент скорости ветра, что показано в [26]. В [27] при помощи методов математического моделирования задач аэродинамики с использованием LES-модели турбулентности выявлена возможность формирования LLJ как результата действия некоторого резонансного механизма. Описано усиление ветра при LLJ в зависимости от геострофического ветра и географической широты.

Влияние суточных изменений турбулентной вязкости воздуха и изменений во времени циклонической/антициклонической циркуляции атмосферы на формирование LLJ рассматривается в работе [28], резонансное усиление скорости ветра, временная и пространственная изменчивость турбулентной вязкости воздуха и циклоническая/антициклоническая циркуляция атмосферы при возникновении LLJ – в аналитической работе [29]. Здесь показана аналитическая зависимость профиля скорости ветра в LLJ от географической широты и времени, подробно обсуждается влияние циклонической циркуляции, которая может быть одной из причин резонансного усиления ветра при LLJ.

Во всех цитируемых работах, применяющих как аналитические методы описания, так и методы математического моделирования, используется приближение Буссинеска [30], которое позволяет упростить уравнения движения. В соответствии с этим приближением плотность воздуха в правой части уравнений движения может быть принята константой (за исключением слагаемых, описывающих силы плавучести). Приближение Буссинеска является работоспособным для множества задач геофизики.

Модель инерциальной осцилляции не описывает механику возникновения некоторых свойств наблюдаемых LLJ (возникновение нижней обратной пульсации, быстрое увеличение скорости ветра). Эти явления анализируются в п. 1 настоящей работы на основе данных Вангара-эксперимента [23].

Если отказаться от приближения Буссинеска при описании LLJ, то в правой части уравнений движения появляются дополнительные слагаемые, пропорциональные плотности атмосферного воздуха и значению геострофического ветра. Эти слагаемые малы в сравнении с основными в уравнениях, но они периодически зависят от времени, изменяются с суточной частотой и не связаны с периодическими изменениями турбулентной вязкости воздуха. Малость этих слагаемых не доказывает малость их влияния на решение, и при резонансном усилении они могут быть сравнимыми с основным течением. В этом случае пренебрегать малыми слагаемыми нельзя, что и показывает полученное в настоящей работе решение.

С учетом суточных изменений плотности при помощи приближенных аналитических методов исследования показано, что возникновение LLJ управляется резонансным усилением скорости ветра при достаточно малых и отрицательных значениях коэффициента усиления. В этом механизме усиления, который назван суточной осцилляцией плотности, возникновение LLJ является результатом резонансного взаимодействия силы Кориолиса и суточных изменений плотности атмосферного воздуха.

### 1. Анализ аналитических моделей LLJ

Обратимся к данным измерений профилей скорости ветра в Вангара-эксперименте, чтобы обосновать необходимость дальнейшего развития математических моделей явления LLJ. Турбулентное трение в пограничном слое атмосферы учитывается посредством турбулентной вязкости [15]. В приближении Буссинеска уравнения движения принимают вид

$$\frac{\partial u}{\partial t} = fv + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_0 \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad \frac{\partial v}{\partial t} = -fu + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_0 \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где  $(x, y)$  – горизонтальные координаты;  $(u, v)$  – горизонтальный вектор отклонения скорости ветра от геострофического ветра  $(u_g, v_g) = Const$ ;  $z$  – высота;  $t$  – время;  $f = 2\Omega \sin(\varphi) \approx 10^{-4}$  1/с – параметр Кориолиса;  $\Omega \approx 7,292 \cdot 10^{-5}$  1/с – частота вращения Земли;  $\varphi$  – географическая широта;  $\mu_0$  – турбулентная вязкость воздуха;  $\rho_0$  – плотность воздуха.

Начальные и граничные условия для (1):

$$\begin{aligned} u(z, t = 0) = u_s(z), \quad v(z, t = 0) = v_s(z), \quad u(z = 0, t) = -u_g, \\ v(z = 0, t) = -v_g, \quad \frac{\partial u}{\partial z}(z = \infty, t) = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial z}(z = \infty, t) = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $u_s, v_s$  – начальное отклонение скорости ветра от геострофического ветра.

Для случая постоянной турбулентной вязкости  $\mu_0 = Const$ . Для задачи (1), (2) можно записать аналитическое решение

$$\begin{aligned} u(z, t) = u_E(z, t) + u_B(z, t), \\ v(z, t) = v_E(z, t) + v_B(z, t), \end{aligned} \quad (3)$$

где справа – сумма решений Экмана  $u_E, v_E$  [15] и Блакадара  $u_B, v_B$  [10].

$$\begin{cases} u_E(z, t) = \exp(-\xi z) [u_g \cos(\xi z) + v_g \sin(\xi z)], \\ v_E(z, t) = \exp(-\xi z) [u_g \sin(\xi z) - v_g \cos(\xi z)], \\ u_B(z, t) = u_s \cos(ft) + v_s \sin(ft), \\ v_B(z, t) = u_s \sin(ft) - v_s \cos(ft). \end{cases} \quad \xi = (f/(2\mu_0))^{1/2},$$

Воспользуемся решением (3), чтобы интерпретировать наблюдательные данные для 33-го и 34-го дней Вангара-эксперимента. Для этих же дней построено поле турбулентной вязкости при помощи математического моделирования [24]. Днем турбулентная вязкость достигает максимума 100 Па·с приблизительно на высоте 500 м, далее уменьшается с высотой и составляет менее 1 Па·с выше 1000 м. Ночные значения турбулентной вязкости составляют  $0,01 \div 1$  Па·с.

На рис. 1 показаны профили амплитуды горизонтальной скорости ветра, измеренные для 6 моментов времени на 33-й и 34-й дни Вангара-эксперимента. Примем в качестве начального профиля  $(u_s, v_s)$  кривую, изображенную на рис. 1а сплошной кривой, характеризующей дневной профиль ветра, используется восточное стандартное время (Eastern Standard Time, EST), две первые цифры которого означают часы, а последние две цифры – минуты. Выбранный профиль модуля скорости является инвариантом при вращении в горизонтальной плоскости для (1). Согласно решению Блакадара, этот профиль должен оставаться неизменным в течение всего времени суток, по крайней мере на высоте выше 1000 м. Решение Экмана также не позволяет считать, что этот профиль может измениться выше 1000 м.

Сплошная и пунктирная кривые имеют приблизительно одинаковый профиль ниже 800 м, выше – имеются различия. Нижняя часть этих профилей, вероятно, характеризует дневной баланс между трением, силой Кориолиса и барическим ветром. Штрихпунктирная кривая рис. 1а, измеренная на 3 ч позже пунктирной, показывает изменение модуля скорости ветра (более чем на 2 м/с) от поверхности и вплоть до высоты около 1200 м, где эта кривая имеет острый минимум, который отсутствует на предыдущих кривых. Еще через 3 ч профиль ветра меняется: максимум скорости ветра поднимается вверх, а значения модуля скорости ветра ниже 800 м уменьшаются (на 2–3 м/с). Ночные, штрихпунктирная и пунктирная кривые рис. 1б показывают сложные изменения профиля



скорости ветра, особенно выше 1200 м. Небольшой максимум скорости ветра формируется на высоте около 200 м к трём часам ночи и исчезает в 6-часовой кривой.

Только на 9-часовой кривой (сплошная кривая, рис. 1б) наблюдается развитый LLJ с максимальными скоростями в интервале высоты от 300 до 1200 м. При этом за 3 ч в слое от 200 до 1200 м модуль скорости ветра увеличивается на 3–4 м/с. Там же хорошо просматривается и нижняя обратная пульсация, вращающаяся в противофазе с основным потоком и видимая как острый минимум на высоте около 150 м. За промежуток времени 3 ч происходят сложные изменения модуля скорости ветра на всех высотах (рис. 1), что противоречит механизму инерциальной пульсации. Решение (3) показывает приблизительно вертикальные профили выше 1000 м и не может объяснить изменений модуля скорости на этих высотах.

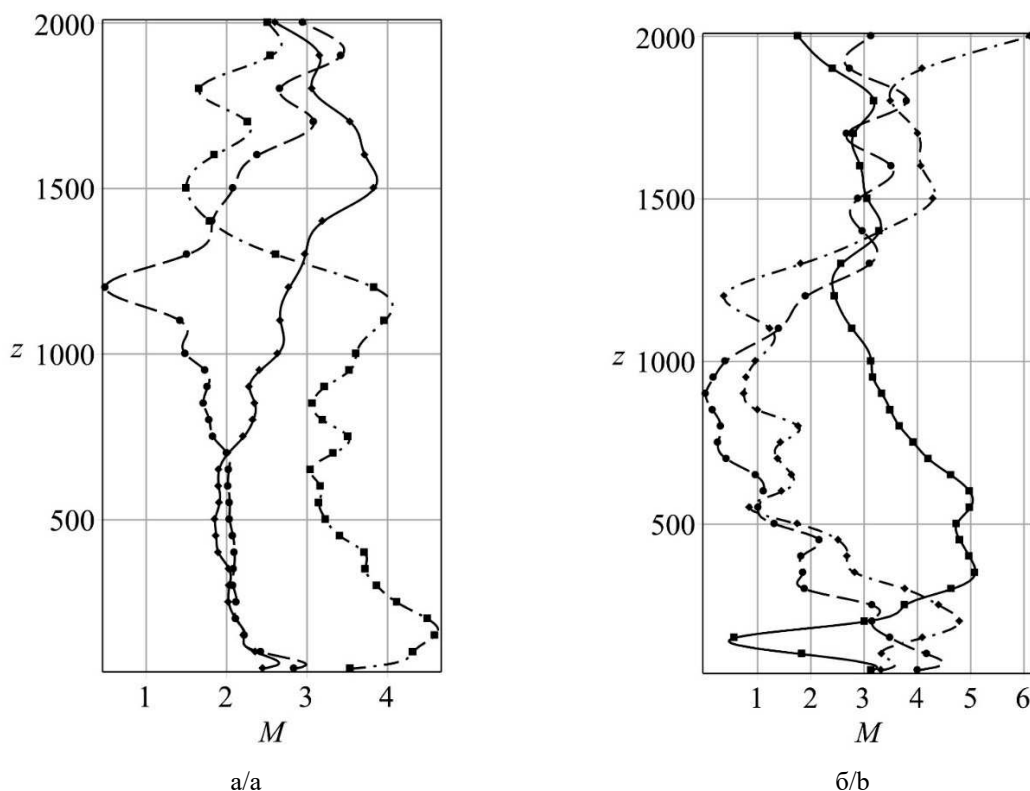


Рис. 1. Вертикальные профили модуля  $M^2 = (u_m - u_g)^2 + (v_m - v_g)^2$ , м/с, горизонтальной скорости ветра  $(u_m, v_m)$  в Вангара-эксперименте для высот 50 ÷ 2000 м: а – сплошная кривая представляет измерения в 33-й день в момент времени 1601 EST; пунктирная – 33-й день, 1904 EST; штрихпунктирная – 33-й день, 2200 EST; б – штрихпунктирная кривая – 34-й день, 0302 EST; пунктирная – 34-й день, 0603 EST; сплошная – 34-й день, 0901 EST / Fig. 1. Vertical profiles of the module  $M^2 = (u_m - u_g)^2 + (v_m - v_g)^2$ , m/s, of the horizontal wind speed  $(u_m, v_m)$  in the Wangara experiment for heights of 50 ÷ 2000 m: a - the solid curve represents measurements on the 33rd day at time 1601 EST; the dotted line - the 33rd day, 1904 EST; the dash-dotted line - the 33rd day, 2200 EST; b - the dash-dotted line - the 34th day, 0302 EST; the dotted line - the 34th day, 0603 EST; the solid line - the 34th day, 0901 EST

Ниже 1000 м суточные изменения турбулентной вязкости могут резонансно усиливать скорость ветра [29]. Вероятно, максимум ночного роста скорости ветра, резонирующей с  $\mu_0(z, t)$ , должен приходиться на область высот, где изменения во времени  $\mu_0(z, t)$  максимальны. Действительно, на высоте около 500 м, где вязкость днем максимальна, формируется максимум скорости LLJ к 9 ч утра (сплошная кривая, рис. 1б). Но наблюдаемый рост модуля скорости ветра выше 1000 м, где вязкость почти постоянна во времени, не соответствует максимуму суточных изменений вязкости  $\mu_0(z, t)$ .

Хотя механизм инерциальной осцилляции удовлетворительно описывает возникновение LLJ, все же изменения происходят зачастую быстрее, чем предсказывается (3), а также гораздо сложнее.

## 2. Управляющие уравнения

В модели геострофический ветер принимается постоянным, т.е. атмосферные течения синоптического масштаба в свободной атмосфере являются стационарными на протяжении нескольких суток.

Уравнения движения пограничного слоя атмосферы без приближения Буссинеска имеют вид

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_0}{\partial x} \rho + f v + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_0 \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_0}{\partial y} \rho - f u + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_0 \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (4)$$

где  $\rho_0, p_0$  – плотность и давление основного состояния (приложение А);  $\rho$  – суточные изменения плотности воздуха. Начальные и граничные условия для уравнений (4) сформулированы в (2).

Для основного состояния принимаются гидростатическое равновесие и геострофический баланс:  $\left( \frac{\partial p_0}{\partial x}, \frac{\partial p_0}{\partial y}, \frac{\partial p_0}{\partial z} \right) = (p_{0x}, p_{0y}, -\rho_0 g)$ , где  $p_{0x} = -f v_g = \text{Const}$ ,  $p_{0y} = f u_g = \text{Const}$ .

Первые слагаемые в правых частях уравнений (4) описывают влияние суточных изменений плотности на динамику LLJ. Они пропорциональны геострофической скорости ветра, и ими пренебрегают в приближении Буссинеска.

Решение уравнений (4) ищется в виде суммы решения однородных уравнений (4) с ненулевыми начальными и граничными условиями (2) и неоднородных (4) с нулевыми начальными и граничными условиями. Задача нахождения решения однородных уравнений (4) с условиями (2) рассмотрена в [29]. Далее в тексте приводится решение неоднородных уравнений (4) с нулевыми начальными и граничными условиями.

Уравнение, которому подчиняется возмущение плотности при суточных изменениях (приложение А), имеет вид

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + \chi \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_0}{\partial z} \frac{\partial \rho}{\partial z} - \alpha \rho, \quad (5)$$

где  $p$  – давление возмущенного состояния,

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial^2 p_0}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho_0^2} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} \frac{\partial p_0}{\partial z}, \quad \chi = \frac{3\mu_0}{\rho_0} \left( \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial^2 \rho_0}{\partial z^2} - \frac{2}{\rho_0^2} \left( \frac{\partial \rho_0}{\partial z} \right)^2 \right) + \frac{4}{\rho_0^2} \frac{\partial \mu_0}{\partial z} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial^2 \mu_0}{\partial z^2}.$$

Уравнение (5) описывает динамику суточных изменений плотности, происходящих вследствие суточных изменений температуры. Решение уравнения (5) ищется при нулевых начальных условиях. Суточные изменения плотности  $\psi(t)$  в атмосфере вблизи поверхности вычисляются из суточных изменений температуры вблизи поверхности. Граничное условие для уравнения (5) имеет вид

$$\rho(z=0, t) = \psi(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \psi_i \sin(\omega_i t), \quad \psi_i = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \psi(t) \sin(\omega_i t) dt, \quad (6)$$

где  $\psi(t)$  – периодическая функция;  $\psi_i$  – амплитуда гармоники  $\omega_i$  в Фурье-разложении функции  $\psi(t)$ . Использование (6) означает, что изменения плотности в пограничном слое атмосферы определяются только граничным условием, которое задается на поверхности Земли.

Используя уравнение состояния для адиабатических процессов  $dp = c_0^2 d\rho$ , уравнение (5) можно переписать для одной зависимой переменной:

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + \chi \frac{\partial \rho}{\partial t} = c_0^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} - \beta \frac{\partial \rho}{\partial z} - \alpha \rho, \quad (7)$$

где  $c_0$  – скорость звука в воздухе,  $\beta = (c_0^2/\rho_0) \partial \rho_0/\partial z - g$ .

Принимая  $\chi = \text{Const}$  и  $\beta = \text{Const}$ , подстановку [31]

$$\rho(z, t) = \varrho(z, t) \exp\left(-\frac{\chi}{2} t\right) \exp\left(\frac{\beta}{2c_0^2} z\right), \quad (8)$$

из (7) получим уравнение Клейна – Гордона

$$\frac{\partial^2 \varrho}{\partial t^2} = c_0^2 \frac{\partial^2 \varrho}{\partial z^2} - b \varrho, \quad (9)$$

где  $\varrho(z, t)$  – новая искомая переменная,  $b = \frac{\beta^2}{4c_0^2} - \frac{\chi^2}{4} + \alpha$ .

Использование постоянных значений  $\chi$  и  $\beta$  накладывает некоторые ограничения на искомое решение, что обсуждается в п. 5.

## 3. Решение

В этой работе рассматривается случай  $b = 0$  ( $b$  имеет порядок  $0,001 \text{ 1/c}^2$ , и в первом приближении соответствующим слагаемым в (9) можно пренебречь). Аналитическое решение уравнения (9) с нулевыми начальными условиями и граничным условием (6) в области  $z \geq 0$  получим при помощи подстановки  $\varrho = \sigma - \psi(t - z/c_0)$  в (9). Новое уравнение  $\partial^2 \sigma/\partial t^2 = c_0^2 \partial^2 \sigma/\partial z^2$  решается

при нулевых начальных и граничных условиях. Его решение  $\varrho = \psi(t - z/c_0)$  [31] допускает нечетное продолжение в область  $z \leq 0$  и справедливо для всех  $t > z/c_0$ .

$$\varrho(z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \psi_i \sin\left(\omega_i \left(t - \frac{z}{c_0}\right)\right). \quad (10)$$

Отличим величины  $\exp(\beta z/(2c_0^2))$  от единицы на высоте до 2000 м пренебрегаем. В этом приближении аналитическое решение  $(u_R, v_R)$  уравнений (4) при постоянной турбулентной вязкости с нулевыми начальными и граничными условиями имеет вид

$$\begin{aligned} u_R(z, t) &= e^{-\frac{\chi t}{2}} \sum_{i=1}^{\infty} U_i \cos(ft) + V_i \sin(ft), \\ v_R(z, t) &= e^{-\frac{\chi t}{2}} \sum_{i=1}^{\infty} V_i \cos(ft) - U_i \sin(ft) - \frac{p_{0x} \psi_i}{f \rho_0^2} \sin\left(\omega_i t - \frac{\omega_i z}{c_0}\right), \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} U_i &= \psi_i \frac{C_{1i} \cos((\omega_i - f)t - \omega_i z/c_0) + 2C_{2i} \sin((\omega_i - f)t - \omega_i z/c_0)}{4f \rho_0^2 (\chi^2/4 + (\omega_i - f)^2)} + \psi_i \frac{D_{1i} \cos((\omega_i + f)t - \omega_i z/c_0) + 2D_{2i} \sin((\omega_i + f)t - \omega_i z/c_0)}{4f \rho_0^2 (\chi^2/4 + (\omega_i + f)^2)}, \\ V_i &= \psi_i \frac{2C_{2i} \cos((\omega_i - f)t - \omega_i z/c_0) - C_{1i} \sin((\omega_i - f)t - \omega_i z/c_0)}{4f \rho_0^2 (\chi^2/4 + (\omega_i - f)^2)} + \psi_i \frac{2D_{2i} \cos((\omega_i + f)t - \omega_i z/c_0) + D_{1i} \sin((\omega_i + f)t - \omega_i z/c_0)}{4f \rho_0^2 (\chi^2/4 + (\omega_i + f)^2)}, \\ C_{1i} &= (\chi p_{0y} + 2\omega_i p_{0x})f - 2p_{0x}(\omega_i^2 + \chi^2/4); \quad C_{2i} = ((f - \omega_i)p_{0y} - \chi p_{0x}/2)f; \\ D_{1i} &= (\chi p_{0y} - 2\omega_i p_{0x})f - 2p_{0x}(\omega_i^2 + \chi^2/4); \quad D_{2i} = ((f + \omega_i)p_{0y} - \chi p_{0x}/2)f. \end{aligned}$$

Решение (11) является приближенным математическим представлением механизма суточной осцилляции плотности формирования LLJ в пограничном слое атмосферы.  $U_i$  и  $V_i$  имеют физический смысл горизонтальных компонент скорости ветра.

Решение (11) описывает результат взаимодействия двух физических процессов: горизонтального вращения скорости ветра силой Кориолиса с частотой  $f$  и суточных изменений плотности с частотой  $\Omega$ . Как видно из (11), результат совместного действия этих двух факторов может приводить к резонансному усилению амплитуд горизонтальных компонент скорости ветра. Максимально выраженным резонанс является при совпадении частот  $f \approx \omega_i$ , с которыми действуют эти две силы и при малых и отрицательных значениях  $\chi$ . Усиление ветра (11) пропорционально географическому ветру и зависит от амплитуд  $\psi_i$ .

Решение системы уравнений (4), (9) с граничными и начальными условиями (2), (9) будет иметь вид

$$u(z, t) = u_E(z, t) + u_B(z, t) + u_R(z, t), \quad v(z, t) = v_E(z, t) + v_B(z, t) + v_R(z, t). \quad (12)$$

Первые два слагаемых в правой части (12) могут быть уточнены, если воспользоваться результатами работы [29].

#### 4. Оценка значений параметров

При нейтральной стратификации величина  $\alpha \approx 0$ , а в устойчивых слоях атмосферы может заметно возрастать. Примем оценки для весовых характеристик столба атмосферы:

$$\partial^2 p_0 / \partial z^2 \approx \rho_0 g^2 / c_0^2 \text{ и } \partial p_0 / \partial z \approx -\rho_0 g, \text{ тогда } \alpha = \frac{g^2}{c_0^2} + \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho_0}{\partial z}.$$

При анализе устойчивых атмосферных слоев обычно используется потенциальная температура  $\theta_0$ , которая вводится при помощи соотношения  $\rho_0^{-1} \partial \rho_0 / \partial z = -g/c_0^2 - \theta_0^{-1} \partial \theta_0 / \partial z$  и часто непосредственно измеряется. Выразим через потенциальную температуру  $\alpha$ ,  $\chi$ ,  $b$ :  $\alpha = -\frac{g}{\theta_0} \frac{\partial \theta_0}{\partial z}$ ,

$$\chi = -\frac{3\mu_0}{\rho_0} \left( \frac{g^2}{c_0^4} + \frac{2g}{\theta_0 c_0^2} \frac{\partial \theta_0}{\partial z} + \frac{1}{\theta_0} \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial z^2} \right) - \frac{4}{\rho_0} \frac{\partial \mu_0}{\partial z} \left( \frac{g}{c_0^2} + \frac{1}{\theta_0} \frac{\partial \theta_0}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial^2 \mu_0}{\partial z^2}, \quad b = \frac{g^2}{c_0^2} + \frac{c_0^2}{4} \left( \frac{1}{\theta_0} \frac{\partial \theta_0}{\partial z} \right)^2 - \frac{\chi^2}{4},$$

$\alpha$  совпадает с выражением для частоты Вейселя – Брента с противоположным знаком.

Из измерений в Вангара-эксперименте выбирались профили потенциальной температуры в ночные и утренние моменты времени: день 34, 0327 EST; день 34, 0603 EST; день 34, 0900 EST. Зависимость коэффициента усиления  $\chi$  от времени для высоты 150 и 500 м показана на рис. 2. В Вангара-эксперименте не измерялись характеристики турбулентности и при вычислении зависимости  $\chi$  от времени не учитывались изменения во времени производных  $\partial \mu_0 / \partial z$ ,  $\partial^2 \mu_0 / \partial z^2$ . Максимум турбулентной вязкости ( $\approx 100$  Па·с) отмечается в дневное время на высоте около 500 м. На высоте 150 м турбулентная вязкость уменьшается ( $\approx 50$  Па·с) [24]. Рост вязкости начинается около

9 ч утра, максимум приходится на 14–15 ч, далее вязкость уменьшается. В ночное время турбулентная вязкость минимальна ( $\approx 0,5-0,01$  Па·с). С учетом такой зависимости на двух высотах получена грубая оценка коэффициента  $\chi$ : в ночное время суток  $\chi \sim \pm 5 \cdot 10^{-5}$  1/с, в дневное время – значение меньше по модулю. Наибольшие изменения  $\chi$  происходят в нижних слоях (200 м) и далее с высотой уменьшаются. Величина  $b$  в ночное время составляет 0,003–0,0003 1/с<sup>2</sup>. Величина  $\beta$  выше 400 м  $\approx -20$  м/с<sup>2</sup>, а ниже 400 м изменяется от  $-50$  до  $-15$  м/с<sup>2</sup>. Экспонента  $\exp(\beta z / (2c_0^2))$  меняется от 0,7 до 1,4 на высоте ниже 2000 м.

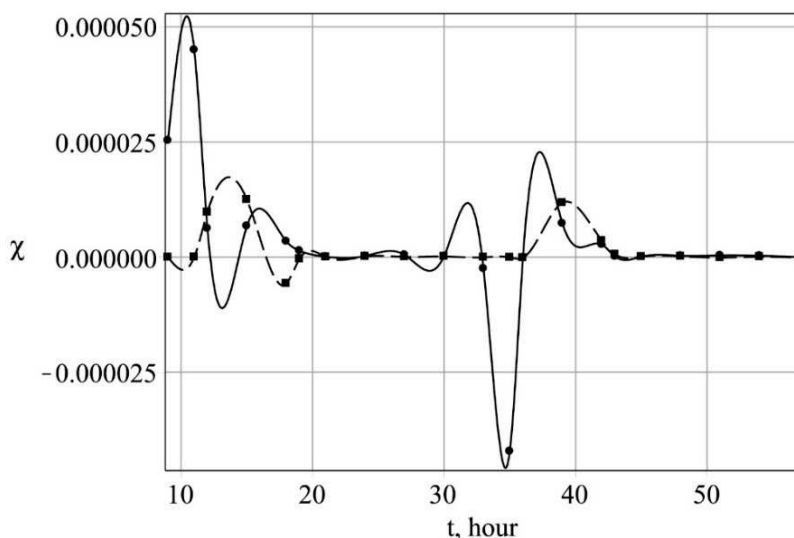


Рис. 2. Зависимость от времени  $t$ , ч, коэффициента усиления  $\chi$  в Вангара-эксперименте (от день 32, 0018 EST до день 35, 1247 EST). Сплошная кривая – изменение на высоте 150 м, пунктирная кривая – на высоте 500 м / Fig. 2. Dependence on time  $t$ , h, of the amplification coefficient  $\chi$  in the Wangara experiment (from DAY 32, 0018 EST to DAY 35, 1247 EST). The solid curve shows the change at altitude of 150 m, the dotted curve - at altitude of 500 m

## 5. Результаты и обсуждение

Математическая модель (4), (5) с граничными условиями (2), (6) используется для описания динамики формирования LLJ в пограничном слое атмосферы над плоской поверхностью. Аналитическое решение (12) показывает, что механика возникновения LLJ может описываться не только механизмом инерциальной осцилляции (при  $\rho = 0$ ), но также и механизмом суточной пульсации плотности (при  $\rho \neq 0$ ). Последний представлен в решении (11) слагаемым, которое показывает возможность резонансного усиления скорости ветра при LLJ.

### 5.1. Анализ влияния упрощений

Аналитическое решение (12) получено в предположении постоянной турбулентной вязкости воздуха. Приближенное аналитическое решение уравнений (1) с учетом изменений турбулентной вязкости в пространстве и во времени также возможно [29], но все же такой учет требует знания функции  $\mu_0(z, t)$ . Это можно реализовать при помощи численного решения уравнений (4), (5), что не требуется при упрощенном рассмотрении.

Для решения уравнения (7) принимаются упрощения:  $\chi = Const$ ,  $\beta = Const$ . Эти величины (рис. 2) зависят от высоты и от времени, что в некоторых случаях сказывается на динамике решения (4), например при отрицательных значениях  $\chi$ , когда возможно экспоненциальное усиление решения. Измерения показывают, что параметры  $\chi$ ,  $\beta$  меняются достаточно медленно и при решении уравнения (7) могут быть приняты постоянными, поскольку за время порядка 10 с существенно не меняются.

При интегрировании уравнений (4) (время – несколько суток) коэффициент усиления  $\chi(z, t)$  существенно влияет на решение уравнения (4), (10) на малых высотах, а выше 500 м – слабее. При

помощи численного решения уравнения (4), (9) с  $\chi(z = 500, t)$  (сплошная кривая на рис. 2) можно подобрать постоянное значение  $\chi_0$  так, чтобы (11) приблизительно соответствовало численному решению: эта величина –  $\chi = \chi_0 \approx 3 \cdot 10^{-7}$  1/с. Значения  $\chi_0$  для решения (4), (9) с  $\chi(z = 150, t)$  подобрать не удастся, поскольку наблюдаются значительные отрицательные  $\chi$ .

Точный учет изменчивости этих величин возможен при численном решении уравнений (4), (9). Он требует знания массивов  $\chi(z, t)$ ,  $\beta(z, t)$ ,  $b(z, t)$ ,  $\mu_0(z, t)$ , полученных в рамках математического моделирования. Аналитическое рассмотрение позволяет провести анализ механизма суточной осцилляции плотности в упрощенной постановке.

## 5.2. Основные свойства решения (11)

Решение (11) получено при нулевых начальных условиях для плотности и скорости ветра, не содержит произвольных констант, описывает резонансное усиление горизонтальных компонент скорости ветра и может применяться для описания динамики LLJ. Усиливающиеся горизонтальные компоненты ветра (11) определяются граничным условием (6) для изменений плотности воздуха вблизи поверхности, коэффициентом  $\chi$ , значением геострофического ветра и зависят от географической широты.

Скорость усиления ветра (11) в основном определяется коэффициентом усиления  $\chi$ : для малых по модулю и отрицательных  $\chi$  ветер усиливается сильнее. Профиль коэффициента усиления  $\chi$  зависит от профилей потенциальной температуры и турбулентной вязкости. При больших отрицательных значениях  $\chi$  (рис. 2, 35-й ч) ветер может усиливаться быстро, за несколько десятков минут.

Выражение (11) – это горизонтальный вектор  $(u_R, v_R)$ , который вращается в горизонтальной плоскости с инерциальной частотой  $f$ . Для субтропических и умеренных широт Фурье-разложение (6) содержит основной член  $\omega_i \approx \Omega \approx 7,292$  1/с, который описывает суточную частоту изменений температуры поверхности. Эта частота совпадает с  $f$  на географической широте  $\varphi = 30^\circ$ , и резонансное усиление ветра наиболее выражено при  $\varphi = 30^\circ$ . Аналогичный вывод сделан в работе [27] при анализе результатов математического моделирования задач аэродинамики с использованием LES-модели турбулентности. В этом численном исследовании также установлен факт пропорциональности модуля ветра в LLJ с геострофической скоростью ветра. Эта пропорциональность также очевидна из (11).

Параметр Кориолиса  $f$  изменяется от 0 до  $2\Omega$  при росте географической широты от 0 до 90. При этом значение  $\psi_k$  для гармоники  $\omega_k$ , соответствующей частоте Кориолиса, также изменяется. Гармоника  $\omega_d$ , соответствующая суточным изменениям плотности, и ее амплитуда  $\psi_d$  остаются относительно постоянными при изменении географической широты (за пределами полярного круга). Максимальная амплитуда  $\psi_k$  достигается при  $\varphi = 30^\circ$ , где  $\psi_d$  максимальна. Соответственно, и модуль скорости ветра (11) максимален на этой широте. При приближении к географическим полюсам  $\omega_d \rightarrow 0$  и амплитуда суточных изменений плотности также уменьшается, что препятствует резонансному усилению ветра. На экваторе  $\omega_k \rightarrow 0$  и резонансного совпадения частот не происходит.

## 5.3. Коэффициент усиления

Действие механизма суточной пульсации плотности в течение нескольких дней привносит добавочные скорости ветра в дополнение к механизму инерциальной пульсации. За первые сутки действия этого механизма дополнительная компонента скорости ветра мала и ею можно пренебречь, но добавка возрастает через несколько дней. Она не всегда мала относительно геострофического ветра и может быстро трансформировать профиль скорости ветра в зависимости от значения  $\chi$ .

Зависимость профиля модуля скорости, вычисленная из (11), от коэффициента усиления  $\chi$  показана на рис. 3. Значения модуля скорости приведены для момента времени  $t = 108$  ч. Они отражают амплитуды скорости, которые могут быть при заданном коэффициенте усиления. При отрицательных значениях  $\chi$  модуль скорости ветра  $M$  возрастает экспоненциально во времени.

Как видно из рис. 3, модулю скорости ветра  $M = 4$  м/с соответствуют два значения коэффициента усиления:  $\chi = +1,0 \cdot 10^{-6}$  1/с и  $\chi = -2,0 \cdot 10^{-6}$  1/с. Максимальное значение модуля скорости в LLJ в Вангара-эксперименте составляет  $M \approx 5,1$  м/с. Имеет значение интервал времени, в течение которого действует механизм суточной пульсации плотности: чем больше интервал, тем

больше усиление ветра. Вероятно, слишком долго этот механизм не действует вследствие изменения внешних условий, например циклонической циркуляции.

Зависимость профиля модуля скорости, вычисленная согласно (11), от частоты  $\omega$  при нескольких значениях коэффициента усиления  $\chi$  показана на рис. 4. Резонансное усиление модуля скорости ветра происходит в узком интервале частот. Усиливающийся ветер может достигать больших амплитуд и превышать скорость геострофического ветра, но остается ограниченным для любого значения коэффициента усиления  $\chi_0$ . Значения модуля скорости приведены по (11) для момента времени  $t = 108$  ч и положительных значений  $\chi_0$ .

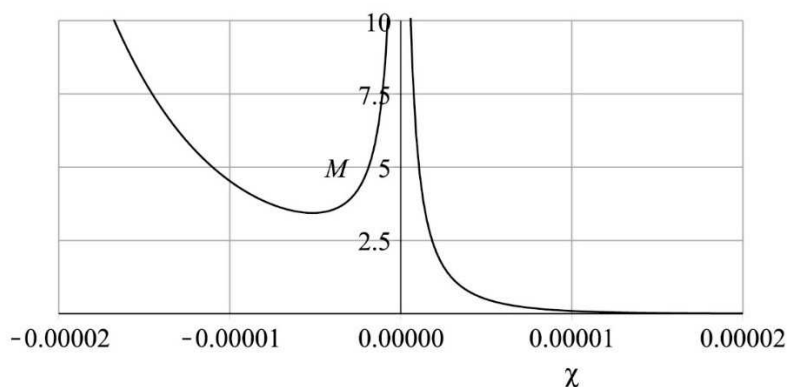


Рис. 3. Зависимость модуля скорости ветра  $M$ , м/с, от коэффициента усиления  $\chi$  ( $t = 108$  ч,  $f = \omega_i = 7,2921 \cdot 10^{-5}$  1/с,  $p_{0x} = -7,6f$  Па/м,  $p_{0y} = -4,72f$  Па/м,  $\psi_i = 0,01$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu_0 = 0,5$  Па·с)  
 / Fig. 3. Dependence of the wind speed module  $M$ , m/s, on the amplification coefficient  $\chi$  ( $t=108$  h,  $f = \omega_i = 7.2921 \cdot 10^{-5}$  1/s,  $p_{0x} = -7.6f$  Pa/m,  $p_{0y} = -4.72f$  Pa/m,  $\psi_i = 0.01$  kg/m<sup>3</sup>,  $\mu_0 = 0.5$  Pa·s

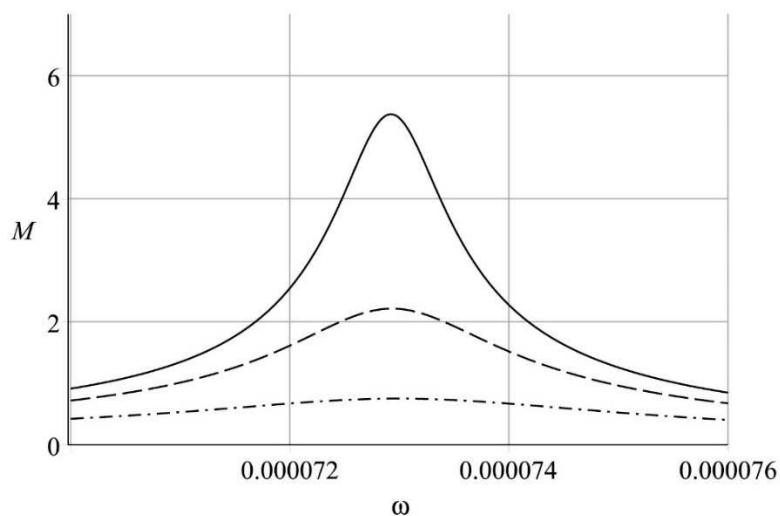


Рис. 4. Зависимость модуля скорости ветра в LLJ от частоты при разных значениях коэффициента усиления  $\chi$ . Сплошная кривая соответствует  $\chi = 1,0 \cdot 10^{-6}$  1/с, пунктирная –  $\chi = 2,0 \cdot 10^{-6}$  1/с, штрихпунктирная –  $\chi = 4,0 \cdot 10^{-6}$  1/с. Вычисления проводились по (11) с параметрами:  $t = 108$  ч;  $\omega_i = f = 7,2921 \cdot 10^{-5}$  1/с;  $p_{0x} = -7,6$  м/с;  $p_{0y} = -4,72$  м/с;  $\chi_0 = 1,0 \cdot 10^{-7}$  1/с;  $\psi_i = 0,01$  кг/м<sup>3</sup>  
 / Fig. 4. Dependence of the wind speed modulus in LLJ on frequency for different values of the amplification coefficient  $\chi$ . The solid curve corresponds to  $\chi = 1.0 \cdot 10^{-6}$  1/s, the dotted curve -  $\chi = 2.0 \cdot 10^{-6}$  1/s, the dash-dotted curve -  $\chi = 4.0 \cdot 10^{-6}$  1/s. The calculations were carried out according to (11) with the parameters:  $t=108$  h;  $\omega_i = f = 7.2921 \cdot 10^{-5}$  1/s;  $p_{0x} = -7.6$  m/s;  $p_{0y} = -4.72$  m/s;  $\chi_0 = 1.0 \cdot 10^{-7}$  1/s;  $\psi_i = 0,01$  kg/m<sup>3</sup>

Модуль скорости ветра в LLJ также зависит от амплитуды  $\psi_i$  гармоники  $\omega_i$ , даже при условии, что  $\omega_i = f$ . Вот некоторые оценки. Для усиления скорости ветра до 5,0 м/с требуется величина  $\psi_m \approx 0,00077$  кг/м<sup>3</sup> при значениях остальных параметров расчета по (11):  $\omega_i = f = 7,2921 \cdot 10^{-5}$  1/с;

$p_{0x} = -7,6$  м/с;  $p_{0y} = -4,72$  м/с;  $\chi = 1,0 \cdot 10^{-7}$  1/с. Резонансное усиление ветра развивается слабее при малых значениях амплитуды  $\psi_d$  суточных изменений температуры, например в облачную погоду, когда суточные перепады температуры малы.

Эти свойства решения (11) показывают, что механизм суточной осцилляции плотности является важным дополнением к механизму инерциальной осцилляции.

#### 5.4. Механизм обратной связи

Вертикальный профиль коэффициента усиления  $\chi(z, t)$  подвержен значительному влиянию вертикального распределения турбулентной вязкости  $\mu_0(z, t)$  вблизи приподнятых инверсионных слоев, а также вблизи поверхности в утренние и вечерние часы. Кроме того,  $\chi(z, t)$  зависит от профиля потенциальной температуры, существенные изменения которого характерны для приземного и инверсионных слоев. В этих слоях наблюдаются как положительные, так и отрицательные значения производных  $\partial^2 \mu_0 / \partial z^2$  и  $\partial^2 \theta_0 / \partial z^2$ . Соответственно, и коэффициенты  $\chi$  в этих слоях могут принимать как отрицательные, так и положительные значения. Эти изменения коэффициента усиления  $\chi$ , особенно отрицательные значения, приводят к быстрому усилению скорости ветра (речь идет о десятках минут), что, в свою очередь, приводит к генерации сдвиговой или перемежающейся турбулентности и последующему трансформированию профилей  $\mu_0(z, t)$  и  $\theta_0(z, t)$ .

Так может действовать механизм обратной связи, ограничивающий экспоненциальный рост скорости ветра в представленном механизме суточной осцилляции плотности. В решении (11) возможен экспоненциальный рост модуля скорости ветра при отрицательных  $\chi$  (рис. 3) и нет явного механизма, его ограничивающего. Единственным сдерживающим фактором является механизм обратной связи, который связан с моделированием турбулентности и в упрощенном аналитическом рассмотрении не описывается. После изменения профилей  $\mu_0(z, t)$  и  $\theta_0(z, t)$  под действием этого механизма меняется и профиль  $\chi(z, t)$ , что предотвращает появление слишком больших значений модуля скорости ветра в LLJ.

В работе [3] показывается, что существенному усилению скорости ветра в LLJ препятствует появление турбулентных вихрей, возникающих в устойчивых атмосферных слоях. Эти явления могут также нарушать предположения об одномерности и линейности задачи (4), (9), что требует использования трехмерных численных моделей.

Максимум модуля скорости ветра в LLJ часто расположен вблизи вершины ночного инверсионного слоя в приземном слое атмосферы [9]. На этой высоте находится минимум профиля турбулентной вязкости и там же – минимумы производных  $\partial^2 \mu_0 / \partial z^2$  и  $\partial^2 \theta_0 / \partial z^2$ . Следовательно, приблизительно на тех же высотах расположены и минимумы профиля  $\chi(z, t)$ , которые могут усиливать скорости ветра в LLJ.

#### 5.5. Отличия от механизма инерциальной осцилляции

Хотя свойства механизма суточной осцилляции плотности близко соответствуют механизму инерциальной осцилляции, есть несколько отличий:

1. В рамках механизма суточной осцилляции плотности усиление скорости ветра в LLJ при нулевых начальных условиях для плотности управляется коэффициентом усиления  $\chi$ , при отрицательных и близких к нулю значениях которого возможно быстрое усиление ветра в LLJ (за десятки минут). Величина усиления может превышать значение геострофического ветра. Слишком быстрому усилению препятствует механизм обратной связи.

В рамках механизма инерциальной осцилляции вращающееся возмущение скорости ветра вокруг геострофического значения может достичь своего максимума приблизительно через 8 ч. Это существенное отличие между двумя механизмами. На рис. 1 видно, что профили модуля скорости ветра при LLJ на высоте 200 м в момент 0302 EST 34 дня через 5 ч после заката уже достигают значений 4,8 м/с при максимальной скорости 5,1 м/с в момент 0901 EST 34 дня. Изменения скорости ветра, которые наблюдаются выше 1000 м, происходят гораздо быстрее чем за 8 ч.

2. В облачную погоду хорошо выраженным является только механизм инерциальной осцилляции, поскольку в рамках механизма суточной осцилляции плотности необходим ненулевой суточный перепад температуры вблизи поверхности. В последнем механизме горизонтальные компоненты скорости усиливаются прямо пропорционально  $\psi_i$ , при малых значениях которого скорости ветра усиливаются слабее.



3. Поскольку в рамках механизма суточной осцилляции плотности усиление скорости ветра в LLJ развивается при нулевых начальных условиях, усиление ветра в LLJ за счет этого механизма слабо выражено в первые и, возможно, во вторые сутки с момента начала появления ветра синоптического масштаба. В данных Вангара-эксперимента также видно, что наиболее выраженным явление LLJ наблюдается спустя несколько суток после появления ветра синоптического масштаба – это 34-й день наблюдений. Несколько слабее, но тоже хорошо выражено LLJ и на 33-й день измерений. Обратная пульсация не всегда развивается, а только в дни, когда LLJ выражено отчетливо. Механизм инерциальной осцилляции не зависит от количества дней, в которые наблюдается ветер синоптического масштаба.

4. Вертикальная компонента скорости при LLJ подвержена суточным изменениям в рамках механизма суточной осцилляции плотности. Амплитуда вертикальной компоненты скорости может быть оценена из уравнения неразрывности:  $\partial w / \partial z \approx -(\partial \rho / \partial z) / \rho_0 \approx -\omega \rho / \rho_0 \approx \pm 10^{-6}$  1/с. По данным Вангара-эксперимента можно вычислить  $\partial w_m / \partial z \approx \pm 10^{-5}$  1/с, при этом  $w_m \approx \pm 1 \cdot 10^{-3} \div \pm 3 \cdot 10^{-2}$  м/с – измеренные вертикальные скорости. Теоретические оценки меньше измеренных значений. Для механизма инерциальной пульсации вертикальная компонента скорости ветра остается нулевой.

### Заключение

Взаимодействие периодических процессов в пограничном слое атмосферы может приводить к резонансным явлениям. В данной работе без использования приближения Буссинеска представлено аналитическое описание одного из возможных типов резонанса при помощи простой одномерной задачи (4), (9) с граничными условиями (2), (6). Резонанс развивается в результате взаимодействия силы Кориолиса и периодических изменений плотности воздуха вблизи поверхности при нулевых начальных условиях для возмущения скорости ветра. При этом усиливаются только горизонтальные компоненты скорости ветра, что описывает механизм формирования LLJ над равнинной поверхностью.

Этот механизм назван суточной осцилляцией плотности для формирования LLJ. В его рамках усиление скорости ветра зависит от коэффициента усиления  $\chi$ , геострофического ветра, амплитуды суточных вариаций плотности вблизи поверхности и времени действия этого механизма. В целом предложенный вариант дополняет механизм инерциальной осцилляции и в своей математической формулировке похож на него, но имеются и отличия. Скорость усиления скорости ветра может существенно превышать скорость в механизме инерциальной осцилляции и также может отличаться для разных высот.

### Приложение

Рассматривая суточные изменения, происходящие в атмосфере над равнинной горизонтальной поверхностью, удобно выделить возмущенное состояние атмосферы как отклонение от некоторого основного состояния (движения воздуха, вызванные процессами синоптического масштаба). Обозначим соответствующие переменные индексом 0. Под возмущением будем понимать отклонение от основного состояния, и его характеристики обозначим теми же символами без индекса.

Примем неподвижную прямоугольную систему координат  $(x, y, z)$ , ось  $Oz$  направим вверх и совместим с поверхностью,  $(x, y)$  – горизонтальные координаты. Обозначим:  $t$  – время;  $(u, v, w)$  – скорость ветра возмущения;  $(u_0, v_0, w_0)$  – скорость ветра основного состояния;  $p_0, \rho_0, T_0$  – давление, плотность, абсолютная температура основного состояния;  $p, \rho, T$  – давление, плотность, абсолютная температура возмущения;  $D = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y + \partial w / \partial z$  – дивергенция возмущения;  $\xi = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$  – вертикальная компонента завихренности возмущения;  $(0, 0, -g)$  – вектор силы тяжести; остальные обозначения определены в тексте.

Динамика атмосферных движений описывается уравнениями Навье – Стокса [32], турбулентный характер которых учтем при помощи введения турбулентной вязкости  $\mu_0$ . Этим уравнениям удовлетворяет как основное состояние, так и основное состояние в сумме с возмущением. Получим уравнения для возмущения, вычитая основное состояние из суммы основного состояния в сумме с возмущением. Аналогичный подход часто используется для описания волн в атмосфере, например в [30, 33]. Для сокращения выкладок примем одномерность рассматриваемой задачи.

Уравнение для вертикальной компоненты  $w$  скорости запишется в виде

$$\frac{\partial w}{\partial t} + (w_0 + w) \frac{\partial w}{\partial z} + w \frac{\partial w_0}{\partial z} = -\frac{1}{(\rho_0 + \rho)} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\rho}{\rho_0(\rho_0 + \rho)} \frac{\partial p_0}{\partial z} + H,$$

где для удобства введено обозначение  $H$  для вязких слагаемых

$$H = \frac{1}{(\rho_0 + \rho)} \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_0 \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\rho}{\rho_0(\rho_0 + \rho)} \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_0 \frac{\partial w_0}{\partial z} \right).$$

Аналогичные выкладки позволяют записать уравнение неразрывности для возмущения плотности  $\rho$ :  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho_0 + \rho)D + w \frac{\partial \rho_0}{\partial z} + \rho \frac{\partial w_0}{\partial z} + w_0 \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0$ .

В уравнение для дивергенции скорости возмущенного состояния, вычисленного из уравнений движения, необходимо подставить значение дивергенции  $D$ , вычисленное из уравнения неразрывности, после чего получится громоздкое уравнение, которое здесь не приводится. При рассмотрении LLJ это уравнение можно упростить при помощи следующих предположений:

1. Все характеристики основного состояния зависят только от вертикальной координаты, за исключением давления, которое отражает барический градиент геострофического ветра  $(u_g, v_g)$ . Таким образом, градиент давления основного состояния есть  $(\frac{\partial p_0}{\partial x}, \frac{\partial p_0}{\partial y}, \frac{\partial p_0}{\partial z}) = (p_{0x}, p_{0y}, -\rho_0 g)$ , где  $p_{0x} = -f v_g = Const$ ,  $p_{0y} = -f u_g = Const$ . Вектор скорости основного состояния  $-(u_0, v_0, w_0) = (u_g, v_g, 0)$ . При этом  $\partial u_g / \partial z = 0$ ,  $\partial v_g / \partial z = 0$ , т.е. геострофический ветер не зависит от высоты.

2. Все характеристики возмущений не зависят от горизонтальных координат, при этом сами величины могут быть большими.

3. Возмущение плотности  $\rho$  и вертикальная скорость  $w$  считаются достаточно малыми.

4. Параметр Кориолиса не зависит от горизонтальных координат.

5. Вторая вязкость воздуха является пренебрежимо малой величиной.

6. Вертикальная компонента завихренности  $\xi = \partial u / \partial y - \partial v / \partial x$  равняется нулю в начальный момент времени и не возникает с течением времени. В некоторых моделях LLJ учитывается циклоническая циркуляция, например, в [29].

После применения этих допущений получится уравнение

$$-\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = -\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial p_0}{\partial z} + \frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial^2 p_0}{\partial z^2} - \frac{\rho}{\rho_0^2} \frac{\partial p_0}{\partial z} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} + \frac{\partial \rho_0}{\partial z} H + \rho_0 \frac{\partial H}{\partial z}. \quad (A.1)$$

Вязкие слагаемые в правой части (A.1) можно приближенно выразить через возмущение плотности посредством уравнения неразрывности  $w = -\frac{1}{\rho_0} \int_0^z \frac{\partial \rho}{\partial t} dz$ .

Получим для вязких слагаемых в (A.1)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} H + \rho_0 \frac{\partial H}{\partial z} = & -\frac{\mu_0}{\rho_0} \frac{\partial^3 \rho}{\partial t \partial z^2} + \left( 3 \frac{\mu_0}{\rho_0^2} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} - \frac{2}{\rho_0} \frac{\partial \mu_0}{\partial z} \right) \frac{\partial^2 \rho}{\partial t \partial z} + \\ & + \left[ \frac{\mu_0}{\rho_0} \left( \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho_0^2} \left( \frac{\partial \rho_0}{\partial z} \right)^2 \right) + \frac{1}{\rho_0^2} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} \frac{\partial \mu_0}{\partial z} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial^2 \mu_0}{\partial z^2} \right] \frac{\partial \rho}{\partial t} + \delta \int_0^z \frac{\partial \rho}{\partial t} dz, \end{aligned} \quad (A.2)$$

где введено

$$\delta = \frac{\mu_0}{\rho_0} \left( \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial^3 \rho_0}{\partial z^3} - \frac{6}{\rho_0^2} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} \frac{\partial^2 \rho_0}{\partial z^2} + \frac{6}{\rho_0^3} \left( \frac{\partial \rho_0}{\partial z} \right)^3 \right) + \frac{4}{\rho_0^3} \left( \frac{\partial \rho_0}{\partial z} \right)^2 \frac{\partial \mu_0}{\partial z} + \frac{2}{\rho_0^2} \frac{\partial^2 \rho_0}{\partial z^2} \frac{\partial \mu_0}{\partial z} - \frac{1}{\rho_0^2} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} \frac{\partial^2 \mu_0}{\partial z^2}.$$

Первое слагаемое в правой части (A.2) пренебрежимо мало по сравнению с третьим слагаемым. Чтобы им пренебречь, нужно ещё показать, что оно не меняет направления фазовых траекторий в фазовом пространстве уравнения (A.1). Это – сложная задача, но из наблюдений известно, что акустические возмущения в атмосфере подчиняются гиперболическому уравнению, следовательно, направления фазовых траекторий остаются неизменными.

Второе слагаемое в правой части (A.2) того же порядка, что и слагаемое в левой части (A.1). Используя уравнение состояния для адиабатических процессов  $\partial^2 p / \partial z^2 = c_0^2 \partial^2 \rho / \partial z^2$ ,  $c_0 = Const \approx \approx 340$  м/с, перепишем первые два слагаемых в (A.1) и второе слагаемое в правой части (A.2):

$$-\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + c_0^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} - c_\mu^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial t \partial z} = R, \quad c_\mu^2 = 3 \frac{\mu_0}{\rho_0^2} \frac{\partial \rho_0}{\partial z} - \frac{2}{\rho_0} \frac{\partial \mu_0}{\partial z} = -3 \frac{\mu_0}{\rho_0} \left( \frac{g}{c_0^2} + \frac{1}{\theta_0} \frac{\partial \theta_0}{\partial z} \right) - \frac{2}{\rho_0} \frac{\partial \mu_0}{\partial z}, \quad (A.3)$$

где  $R$  – остальные слагаемые уравнения (A.1). Здесь будем считать  $c_\mu$  константой, поскольку он мало меняется за десятки секунд. Из данных Вангара-эксперимента можно оценить  $c_\mu \approx 0,5$  м/с для дневного времени, для ночного времени – еще меньше. Общая форма решения уравнения (A.3) в полу-

бесконечной области имеет вид  $\rho(z, t) \sim f\left(t + z\left(c_\mu - \sqrt{c_\mu^2 + 4c_0^2}\right)/(2c_0^2)\right)$ , где  $f$  – некоторая функция. Очевидно, что величиной  $c_\mu$  всегда можно пренебречь в сравнении с величиной скорости звука  $c_0$ . Соответственно, и второе слагаемое в правой части (А.2) пренебрежимо мало.

Уравнение (А.1) запишется в виде (обозначения приведены в тексте)

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} + \chi \frac{\partial \rho}{\partial t} = c_0^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} - \beta \frac{\partial \rho}{\partial z} - \alpha \rho + \delta \int_0^z \frac{\partial \rho}{\partial t} dz.$$

Используя подстановку (8), получим

$$\frac{\partial^2 \varrho}{\partial t^2} = c_0^2 \frac{\partial^2 \varrho}{\partial z^2} - b\varrho - \delta \exp\left(-\frac{\beta}{2c_0^2} z\right) \int_0^z \exp\left(\frac{\beta}{2c_0^2} z\right) \frac{\partial \varrho}{\partial t} - \frac{\chi}{2} \exp\left(\frac{\beta}{2c_0^2} z\right) \varrho dz. \quad (\text{А.4})$$

Оценим значения коэффициентов  $b$ ,  $\delta$ ,  $\beta$  из данных Вангара-эксперимента. Для этого выразим их через потенциальную температуру:  $\beta = -2g - c_0^2 \left(\frac{1}{\theta_0} \frac{\partial \theta_0}{\partial z}\right)^2$ ,

$$\delta = -\frac{\mu_0}{\rho_0} \left(\frac{g^3}{c_0^6} + \frac{3g}{c_0^2} \frac{1}{\theta_0} \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial z^2} - \frac{3g^2}{c_0^4} \frac{1}{\theta_0} \frac{\partial \theta_0}{\partial z} + \frac{1}{\theta_0} \frac{\partial^3 \theta_0}{\partial z^3}\right) - \frac{2}{\rho_0} \frac{\partial \mu_0}{\partial z} \left(\frac{g^2}{c_0^4} + \frac{2g}{c_0^2} \frac{1}{\theta_0} \frac{\partial \theta_0}{\partial z} + \frac{1}{\theta_0} \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial z^2}\right) - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial^2 \mu_0}{\partial z^2} \left(\frac{g}{c_0^2} + \frac{1}{\theta_0} \frac{\partial \theta_0}{\partial z}\right).$$

Величина  $b$  оценивается в тексте. Выше 400 м она имеет порядок 0,0003 1/с<sup>2</sup>, а ниже 400 м может достигать 0,003 1/с<sup>2</sup>. Величина  $\beta$  выше 400 м  $\approx -20$  м/с<sup>2</sup>, а ниже 400 м изменяется от  $-50$  до  $-15$  м/с<sup>2</sup>. Соответственно, экспонента  $\exp(\beta z/(2c_0^2))$  меняется не более чем от 0,7 до 1,4 ниже 2000 м, и для получения оценок эти изменения можно не учитывать при интегрировании. Множитель  $\delta \approx 0$  выше 400 м, а ниже 400 м изменяется от  $-5 \cdot 10^{-9}$  до  $+5 \cdot 10^{-9}$ .

Используем выражение (10) для оценки интеграла в (А.4)

$$\int_0^z \frac{\partial \varrho}{\partial t} dz \approx \sum_{i=1}^{i=\infty} \psi_i c_0 \left[ \sin(\omega_i t) + \sin\left(\omega_i \left(t - \frac{z}{c_0}\right)\right) \right].$$

Скорость звука  $c_0 \approx 340$  м/с. Учитывая значение множителя  $\delta$ , можно полагать, что на высоте ниже 400 м содержащее интеграл слагаемое в (А.4) как минимум в 100 раз меньше слагаемого, содержащего множитель  $b$ . Выше 400 м это слагаемое меньше в 1000 раз. Второе слагаемое под знаком интеграла также пренебрежимо мало. В результате получается (9).

Уравнения (4) вытекают непосредственно из уравнений движения после применения упрощающих предположений.

#### Список источников

1. Stensrud D.J. Importance of low-level jets to climate: A review // J. Climate. 1996. Vol. 9. P. 1698–1711.
2. Shapiro A., Fedorovich E. Nocturnal low-level jet over a shallow slope // Acta Geophys. 2009. Vol. 57. P. 950–980.
3. Banta R.M., Pichugina Y.L., Newsom R.K. Relationship between the low-level jet properties and turbulence kinetic energy in the nocturnal stable boundary layer // J. Atmos. Sci. 2003. № 60. P. 2549–2555.
4. Banta R.M., Pichugina Y.L., Brewer W.A. Turbulent velocity variance profiles in the stable boundary layer generated by a nocturnal low-level jet // J. Atmos. Sci. 2006. № 63. P. 2700–2719.
5. Banta R.M. Stable boundary-layer regimes from the perspective of the low-level jet // Acta Geophys. 2008. Vol. 56. P. 58–87.
6. McNider R.T., Moran M.D., Pielke R.A. Influence of diurnal and inertial boundary-layer oscillations on long range dispersion // Atmos. Environ. 1988. Vol. 22. P. 2445–2462.
7. Beyrich F. Sodar observations of the stable boundary layer height in relation to the nocturnal low-level jet // Meteor. Z. 1994. Vol. 3. P. 29–34.
8. Liechti F., Schaller E. The use of low-level jets by migrating birds // Naturwissenschaften. 1999. Vol. 86. P. 549–551.
9. Baas P., Bosveld F.C., Baltink H.K., Holtslag A.A.M. A climatology of nocturnal low-level jets at Cabauw // J. Appl. Meteorol. Climat. 1991. № 48. P. 1627–1642.
10. Blackadar A.K. Boundary Layer Wind Maxima and Their Significance for the Growth of Nocturnal Inversions // Bull. Am. Meteorol. Soc. 1957. Vol. 38. P. 283–290.
11. Jiang X., Lau N.C., Held I.M., Ploshay J.J. Mechanism of the Great Plains low-level jet as simulated in an AGCM // J. Atmos. Sci. 2007. Vol. 64. P. 532–547. Doi: 10.1175/JAS3847.1.
12. Kallistratova M.A., Kouznetsov R.D., Kuznetsov D.D., Kuznetsova I.N., Nakhaev M., Chirokova G. Summer-time low-level jet characteristics measured by sodars over rural and urban areas // Meteorol. Z. 2009. Vol. 18. P. 289–295. Doi: 10.1127/0941-2948/2009/0380.
13. Du Y., Rotunno R. A simple analytical model of the nocturnal low-level jet over the Great plains of the United States // J. Atmos. Sci. 2014. Vol. 71. P. 3674–3683. Doi: 10.1175/JAS-D-14-0060.1.

14. Van de Wiel B.J.H., Moene A.F., Steeneveld G.J., Baas P., Bosveld F.C., Holtslag A.A.M. A Conceptual View on Inertial Oscillations and Nocturnal Low-level Jets // *J. Atmos. Sci.* 2010. Vol. 67. P. 2679–2689. Doi: 10.1175/2010JAS3289.1.
15. Ekman V.W. On the influence of the Earth's rotation on ocean currents // *Arkiv. Matematik. Astron. Fysik.* 1905. Vol. 2. P. 1–53.
16. Brown R.A. *Analytic Methods in Planetary Boundary Layer Modeling.* New York: John Wiley and Sons, 1974. 150 p.
17. Shapiro A., Fedorovich E. Analytical description of a nocturnal low-level jet // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2010. Vol. 136. P. 1255–1262. Doi: 10.1002/qj.628.
18. Hira S., Kanehisa H. An Analytical Solution of Nocturnal Low Level Jets // *J. Meteorol. Soc. Jpn.* 2015. Vol. 93. P. 477–487. Doi: 10.2151/jmsj.2015-031.
19. Smith E., Fedorovich E., Shapiro A. Comparison of analytical descriptions of nocturnal low-level jets within the Ekman model framework // *Environ. Fluid Mech.* 2017. Vol. 17. P. 485–495. Doi: 10.1007/s10652-016-9502-z.
20. Beyrich F., Klose B. Some aspects of modeling Low-level Jets // *Boundary-Layer Meteorol.* 1988. Vol. 41. P. 1–14.
21. Conangla L., Cuxart J. On the turbulence in the upper part on the low-level jet: an experimental and numerical study // *Boundary-Layer Meteorol.* 2006. Vol. 118. P. 379–400.
22. Wang Y., Klipp C.L., Garvey D.M., Ligon D.A., Williamson C.C., Chang S.S., Newsom R.K., Calhoun R. Nocturnal Low-Level-Jet-Dominated Atmospheric Boundary Layer Observed by a Doppler Lidar over Oklahoma City during JU2003 // *J. Appl. Meteorol. Clim.* 2007. Vol. 46. P. 2098–2109. Doi: 10.1175/2006JAMC1283.1.
23. Clarke R.H., Dyer A.J., Brook R.R., Reid D.G., Troup A.J. The Wangara experiment: Boundary layer data // *CSIRO Division of Meteorological Physics Tech.* 1971. Vol. 19. P. 358.
24. Yamada T., Mellor G. A simulation of the Wangara Atmospheric Boundary Layer Data // *J. Atmos. Sci.* 1975. Vol. 32. P. 2309–2329.
25. Momen M., Bou-Zeid E. Mean and turbulence dynamics in unsteady Ekman boundary layers // *J. Fluid Mech.* 2017. Vol. 816. P. 209–242. Doi: 10.1017/jfm.2017.76.
26. Ingel L.Kh. One Type of Resonance Phenomena in the Atmosphere and Water Bodies // *Fluid Dynamics.* 2015. Vol. 50. P. 494–500. Doi: 10.1134/S0015462815040043.
27. Shibuya R., Sato K., Nakanishi M. Diurnal Wind Cycles Forcing Inertial Oscillations: A Latitude-Dependent Resonance Phenomenon // *J. Atmos. Sci.* 2014. Vol. 71. P. 767–781. Doi: 10.1175/JAS-D-13-0124.1.
28. Paegle J., Rasch G.E. Three-Dimensional Characteristics of Diurnally Varying Boundary-Layer Flows // *Mon Weather Rev.* 1973. Vol. 201. P. 746–756.
29. Tan Z., Farahani M.M. An Analytical Study of the Diurnal Variations of Wind in a Semi-geostrophic Ekman Boundary Layer Model // *Boundary-Layer Meteorol.* 1998. Vol. 86. P. 313–332.
30. Gill A.E. *Atmosphere-Ocean Dynamics* // *International Geophysics Series.* 1982. Vol. 30. New York, London: Academic Press, 1982. 662 p.
31. Polyanin A.D. *Handbook of Linear Partial Differential Equations for Engineers and Scientists.* Chapman & Hall/CRC, 2002.
32. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Fluid Mechanics.* Vol. 6 of Course of Theoretical Physics. Oxford, New York: Pergamon Press, 1987. 539 p.
33. Gossard E.E., Hooke W.H. *Waves in the Atmosphere. Atmospheric Infrasound and Gravity Waves-their Generation and Propagation.* Amsterdam, Oxford; New York: Elsevier, 1975. 532 p.

## References

1. Stensrud D.J. Importance of low-level jets to climate: A review. *J. Climate.* 1996;9:1698-1711.
2. Shapiro A., Fedorovich E. Nocturnal low-level jet over a shallow slope. *Acta Geophys.* 2009;57:950-980.
3. Banta R.M., Pichugina Y.L., Newsom R.K. Relationship between the low-level jet properties and turbulence kinetic energy in the nocturnal stable boundary layer. *J. Atmos. Sci.* 2003;(60):2549-2555.
4. Banta R.M., Pichugina Y.L., Brewer W.A. Turbulent velocity variance profiles in the stable boundary layer generated by a nocturnal low-level jet. *J. Atmos. Sci.* 2006;(63):2700-2719.
5. Banta R.M. Stable boundary-layer regimes from the perspective of the low-level jet. *Acta Geophys.* 2008;56:58-87.
6. McNider R.T., Moran M.D., Pielke R.A. Influence of diurnal and inertial boundary-layer oscillations on long range dispersion. *Atmos. Environ.* 1988;22:2445-2462.
7. Beyrich F. Sodar observations of the stable boundary layer height in relation to the nocturnal low-level jet. *Meteor. Z.* 1994;3:29-34.
8. Liechti F., Schaller E. The use of low-level jets by migrating birds. *Naturwissenschaften.* 1999;86:549-551.
9. Baas P., Bosveld F.C., Baltink H.K., Holtslag A.A.M. A climatology of nocturnal low-level jets at Cabauw. *J. Appl. Meteorol. Climat.* 1991;(48):1627-1642.
10. Blackadar A.K. Boundary Layer Wind Maxima and Their Significance for the Growth of Nocturnal Inversions. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1957;38:283-290.

11. Jiang X., Lau N.C., Held I.M., Ploshay J.J. Mechanism of the Great Plains low-level jet as simulated in an AGCM. *J. Atmos. Sci.* 2007;64:532-547. Doi: 10.1175/JAS3847.1.
12. Kallistratova M.A., Kouznetsov R.D., Kuznetsov D.D., Kuznetsova I.N., Nakhaev M., Chirokova G. Summertime low-level jet characteristics measured by sodars over rural and urban areas. *Meteorol. Z.* 2009;18:289-295. Doi: 10.1127/0941-2948/2009/0380.
13. Du Y., Rotunno R. A simple analytical model of the nocturnal low-level jet over the Great plains of the United States. *J. Atmos. Sci.* 2014;71:3674-3683. Doi: 10.1175/JAS-D-14-0060.1.
14. Van de Wiel B.J.H., Moene A.F., Steeneveld G.J., Baas P., Bosveld F.C., Holtslag A.A.M. A Conceptual View on Inertial Oscillations and Nocturnal Low-level Jets. *J. Atmos. Sci.* 2010;67:2679-2689. Doi: 10.1175/2010JAS3289.1.
15. Ekman V.W. On the influence of the Earth's rotation on ocean currents. *Arkiv. Matematik. Astron. Fysik.* 1905;2:1-53.
16. Brown R.A. Analytic Methods in Planetary Boundary Layer Modeling. New York: John Wiley and Sons; 1974. 150 p.
17. Shapiro A., Fedorovich E. Analytical description of a nocturnal low-level jet. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2010;136:1255-1262. Doi: 10.1002/qj.628.
18. Hira S., Kanehisa H. An Analytical Solution of Nocturnal Low Level Jets. *J. Meteorol. Soc. Jpn.* 2015;93:477-487. Doi: 10.2151/jmsj.2015-031.
19. Smith E., Fedorovich E., Shapiro A. Comparison of analytical descriptions of nocturnal low-level jets within the Ekman model framework. *Environ. Fluid Mech.* 2017;17:485-495. Doi: 10.1007/s10652-016-9502-z.
20. Beyrich F., Klose B. Some aspects of modeling Low-level Jets. *Boundary-Layer Meteorol.* 1988;41:1-14.
21. Conangla L., Cuxart J. On the turbulence in the upper part on the low-level jet: an experimental and numerical study. *Boundary-Layer Meteorol.* 2006;118:379-400.
22. Wang Y., Klipp C.L., Garvey D.M., Ligon D.A., Williamson C.C., Chang S.S., Newsom R.K., Calhoun R. Nocturnal Low-Level-Jet-Dominated Atmospheric Boundary Layer Observed by a Doppler Lidar over Oklahoma City during JU2003. *J. Appl. Meteorol. Clim.* 2007;46:2098-2109. Doi: 10.1175/2006JAMC1283.1.
23. Clarke R.H., Dyer A.J., Brook R.R., Reid D.G., Troup A.J. The Wangara experiment: Boundary layer data. *CSIRO Division of Meteorological Physics Tech.* 1971;19:358.
24. Yamada T., Mellor G. A simulation of the Wangara Atmospheric Boundary Layer Data. *J. Atmos. Sci.* 1975;32:2309-2329.
25. Momen M., Bou-Zeid E. Mean and turbulence dynamics in unsteady Ekman boundary layers. *J. Fluid Mech.* 2017;816:209-242. Doi: 10.1017/jfm.2017.76.
26. Ingel L.Kh. One Type of Resonance Phenomena in the Atmosphere and Water Bodies. *Fluid Dynamics.* 2015;50:494-500. Doi: 10.1134/S0015462815040043.
27. Shibuya R., Sato K., Nakanishi M. Diurnal Wind Cycles Forcing Inertial Oscillations: A Latitude-Dependent Resonance Phenomenon. *J. Atmos. Sci.* 2014;71:767-781. Doi: 10.1175/JAS-D-13-0124.1.
28. Paegle J., Rasch G.E. Three-Dimensional Characteristics of Diurnally Varying Boundary-Layer Flows. *Mon Weather Rev.* 1973;201:746-756.
29. Tan Z., Farahani M.M. An Analytical Study of the Diurnal Variations of Wind in a Semi-geostrophic Ekman Boundary Layer Model. *Boundary-Layer Meteorol.* 1998;86:313-332.
30. Gill A.E. Atmosphere-Ocean Dynamics. *International Geophysics Series.* New York, London: Academic Press; 1982;30. 662 p.
31. Polyanin A.D. *Handbook of Linear Partial Differential Equations for Engineers and Scientists.* Chapman & Hall/CRC; 2002.
32. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Fluid Mechanics. Vol. 6 of Course of Theoretical Physics.* Oxford, New York: Pergamon Press; 1987. 539 p.
33. Gossard E.E., Hooke W.H. *Waves in the Atmosphere. Atmospheric Infrasound and Gravity Waves-their Generation and Propagation.* Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier; 1975. 532 p.

### **Информация об авторе**

А.А. Радионов – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, отдел математического моделирования.

### **Information about the author**

A.A. Radionoff – Candidate of Science (Technical), Senior Researcher, Department of Mathematical Modeling.

Статья поступила в редакцию 17.06.2024; одобрена после рецензирования 02.08.2024; принята к публикации 16.10.2024.  
The article was submitted 17.06.2024; approved after reviewing 02.08.2024; accepted for publication 16.10.2024.

Научная статья

УДК 504.064

doi: 10.18522/1026-2237-2024-4-2-93-103

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИОННОГО СТОКА В БАССЕЙНЕ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ

**Ольга Сергеевна Решетняк<sup>1✉</sup>, Кристина Геннадьевна Галагур<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>2</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, Россия

<sup>1</sup>osreshetnyak@srfedu.ru<sup>✉</sup>, ORCID: 0000-0001-7160-2461

<sup>2</sup>kristina3286@yandex.ru

**Аннотация.** Представлены результаты оценки многолетней изменчивости химического состава речных вод и ионного стока в бассейне Северной Двины. Рассмотрены природные и антропогенные факторы формирования и показано, что в условиях избыточного увлажнения, холодного климата и хорошо промытых подзолистых почв формируются воды малой минерализации с преобладанием в их составе гидрокарбонатов и ионов кальция. Интенсивное антропогенное воздействие в бассейне Северной Двины обусловлено наличием развитого лесохозяйственного комплекса и Архангельской агропромышленной агломерации. Изменчивость минерализации воды и содержания главных ионов в речных водах бассейна Северной Двины проявляется как по длине самой реки, так и между основными притоками. Наиболее высокие среднемноголетние значения минерализации воды характерны для участков рек Северная Двина и Вымь, а наименьшие – рек Вычегда и Сысола. Нарушение качества воды по содержанию макрокомпонентов в воде отмечается эпизодически и только по максимальным концентрациям сульфатов (до 4,0 ПДК). Изменчивость ионного стока характеризуется пространственной неоднородностью, а наибольшие значения модулей стока отмечены для частного водосбора реки Вымь. При этом основной вклад вносят гидрокарбонаты и сульфаты, поступающие в речную сеть за счет процессов выщелачивания и смыва с водосборной территории. Представленные результаты могут быть использованы при разработке экологически обоснованных природоохранных мероприятий по улучшению экологической обстановки в бассейне Северной Двины.

**Ключевые слова:** химический состав воды, ионный сток, макрокомпоненты, сток сульфатов, сток гидрокарбонатов, антропогенные факторы, речные воды, бассейн Северной Двины

**Для цитирования:** Решетняк О.С., Галагур К.Г. Региональные особенности формирования ионного стока в бассейне Северной Двины // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 4-2. С. 93–103.

**Благодарности:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00366, <https://rscf.ru/project/24-27-00366/>, а также работа проводилась в рамках научной программы Института водных проблем, проект № FMWZ-2022-0001 (в части построения картосхем).

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

## REGIONAL FEATURES OF FORMATION OF ION RUNOFF IN THE NORTHERN DVINA BASIN

**Olga S. Reshetnyak<sup>1✉</sup>, Kristina G. Galagur<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>2</sup>Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>1</sup>osreshetnyak@srfedu.ru<sup>✉</sup>, ORCID: 0000-0001-7160-2461

<sup>2</sup>kristina3286@yandex.ru

© Решетняк О.С., Галагур К.Г., 2024

**Abstract.** The article presents the results of assessing the long-term variability of the chemical composition of river waters and ionic runoff in the Northern Dvina River basin. Natural and anthropogenic factors of formation are considered and it is shown that conditions of excessive moisture, cold climate and well-washed podzolic soils led to the formation of waters with low mineralization and a predominance of hydrocarbonates and calcium ions in their composition. The intense anthropogenic impact in the Northern Dvina River basin is due to the presence of a developed forestry complex and the Arkhangelsk agro-industrial agglomeration. The variability of water mineralization and the content of major ions in the river waters of the Northern Dvina River basin appears both along the length of the river itself and between the main tributaries. The highest average long-term values of water mineralization are observed at sections of the Northern Dvina and Vym Rivers, and the lowest one characterizes the Vychegda and Sysola Rivers. Water quality violation in terms of the content of macrocomponents in water occurs sporadically and only in case of maximum concentrations of sulfates (up to 4.0 MAC). The variability of ion runoff is characterized by spatial heterogeneity, and the highest values of runoff modules are typical for a particular River Vym catchment. At the same time, hydrocarbonates and sulfates entering the river network make a major contribution to this variability due to the processes of leaching and washout from the catchment area. The presented results can be used in the development of environmentally sound nature protection measures aimed at improving the environmental situation in the Northern Dvina River basin.

**Keywords:** water chemical composition, ionic runoff, macrocomponents, sulfate runoff, hydrocarbonate runoff, anthropogenic factors, river waters, Northern Dvina River basin

**For citation:** Reshetnyak O.S., Galagur K.G. Regional Features of Formation of Ion Runoff in the Northern Dvina Basin. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(4-2):93-103. (In Russ.).

**Acknowledgments:** the study was supported by grant No. 24-27-00366 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/24-27-00366/>, and the work was also carried out within the framework of the scientific program of the Institute of Water Problems, project No. FMWZ-2022-0001 (in terms of constructing map diagrams).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

## Введение

В современных условиях интенсивного антропогенного воздействия на водосборах рек в промышленно развитых регионах европейской части России (ЕЧР) происходит качественное и количественное истощение водных ресурсов, усиливающееся на фоне климатических изменений. Возрастание антропогенной нагрузки на речную сеть и усиление экологической напряженности на водных объектах приводят не только к ухудшению качества воды из-за сброса сточных вод и диффузного загрязнения водосборов [1], но и к трансформации ионного состава воды за счет природных и техногенных факторов [2], усилению процессов химической денудации и изменению стока отдельных ионов [3].

Изучение ионного стока рек ранее считалось одним из основных направлений гидрохимических исследований в нашей стране. После начала регулярных наблюдений за химическим составом речных вод (особенно за макрокомпонентами) в первой половине XX в. стало возможным проводить оценку ионного стока. Первые данные о величине ионного стока для бассейна реки Северная Двина появились в монографиях и изданиях сотрудников Гидрохимического института [4, 5]. В обобщающей работе О.А. Алекина и Л.В. Бражниковой [4] представлены сведения 1940–1950-х гг. о суммарном стоке главных ионов в целом для водосбора Северной Двины (по результатам расчета на замыкающем створе реки). При этом не рассматривалась изменчивость ионного стока в пределах частных водосборов и во временном аспекте. Позже в Гидрохимическом атласе СССР [5] были представлены не только обобщающие картосхемы, отражающие пространственную изменчивость ионного стока в бассейне Северной Двины, но и стока органических и биогенных веществ, некоторых микроэлементов.

В дальнейшем интерес к изучению изменчивости ионного стока снижается, большинство исследователей рассматривают сток тяжелых металлов с водосбора Северной Двины [6, 7], вынос различных форм биогенных и органических соединений или микроэлементов в Белое море [6, 8–10].

В последние годы актуальность изучения ионного стока северных и арктических рек значительно усилилась в связи с влиянием на речные системы климатических изменений. Так, в серии



работ А.О. Даниленко и А.Г. Георгиади [11, 12] показано, что климатические изменения, трансформирующие водный сток р. Северная Двина, слабее влияют на сток ионов, который в период современного потепления климата увеличился примерно на 6–8 %. При этом авторы отмечают, «что независимо от колебаний водности Северной Двины существует некоторое динамическое постоянство геохимической нагрузки её водами на Белое море» [11].

Одной из обобщающих работ по оценке изменчивости стока растворенных веществ с водосбора р. Северная Двина можно считать [13]. В данном издании представлены современные данные о многолетней изменчивости (1990–2017 гг.) ионного стока и его компонентов на водосборе.

Формирование ионного стока рек происходит преимущественно за счет природно-климатических факторов и процессов и в значительной степени зависит от колебаний водного стока [14, 15]. Модули ионного стока, стока сульфатов и хлоридов характеризуют интенсивность химической денудации на водосборе и значительно различаются для крупных рек Сибири и севера России. Самые большие значения модулей ионного стока и стока сульфатов имеют реки Онега и Северная Двина, водосборы которых сложены легковыщелачиваемыми породами (гипс и известняк) [16]. Определенный вклад в изменчивость ионного стока и отдельных его компонентов вносит климатический фактор, который, как показано в работе [11], для водосбора Северной Двины проявляется в увеличении ионного стока в зимний период и наибольшие изменения происходят в значениях стока ионов кальция.

Важную роль при исследовании формирования ионного стока рек имеет учет региональных особенностей водосборной территории, ландшафтных особенностей миграции элементов и специфики хозяйственной деятельности, что и обуславливает актуальность и новизну нашего исследования.

Цель данной работы – оценить особенности ионного состава воды р. Северная Двина, основных ее притоков и ионного стока в бассейне в современных условиях антропогенного воздействия.

Материалом для исследования послужила многолетняя (1990–2017 гг.) гидрологическая и гидрохимическая информация Государственной системы наблюдения (ГСН) Росгидромета на территории деятельности Северного УГМС, собранная из открытых источников [17, 18] и библиотечных фондов Государственного водного кадастра [19].

### Характеристика бассейна Северной Двины

Бассейн Северной Двины, расположенный в северной части Русской равнины, является крупнейшим по площади бассейном европейского севера России. Территория представляет собой огромную лесистую равнину, почти не защищенную от западных и северо-западных ветров, с которыми связано поступление влажных воздушных масс. Для неё характерно избыточное увлажнение и относительное однообразие природных условий [20].

Климат – умеренно континентальный с коротким прохладным летом и продолжительной холодной зимой. Территория бассейна Северной Двины находится в зоне избыточного увлажнения. Годовое количество осадков меняется с северо-востока на юго-запад от 550–600 до 750–800 мм. Основная их часть (65–70 %) приходится на теплый период года [21].

Речная сеть хорошо развита и по площади водосбора распространена достаточно равномерно. Растительный покров в основном представлен хвойными лесами. Лесопокрываемость – более 80 %. В основном безлесные площади заняты болотами. На большей части бассейна преобладают подзолистые почвы, которые подстилают ледниковые отложения [20, 21].

Гидрологический режим Северной Двины является типичным для рек северных районов России, имеющих преимущественно снеговое питание, что и определяет характер внутригодового распределения водного стока. За три весенних месяца проходит обычно более половины годового объема стока, а в течение зимних месяцев, когда атмосферные осадки практически не участвуют в питании реки и идут на образование снегового покрова, сток в замыкающем створе реки не превышает 9–11 %. В осенний период часто проходят дождевые паводки, поэтому водность реки в этот период больше, чем летом и зимой. Самые маловодные месяцы – февраль и март [20, 21].

Северная Двина и ее притоки относятся к рекам преимущественно снегового питания (50 % стока). Водный режим характеризуется высоким весенним половодьем, низкой летней меженью и летне-осенними паводками, сменяющимися зимней меженью [21]. Продолжительность весеннего половодья может возрастать за счет медленного таяния снегов таежной зоны и «буферных свойств» болот.

В последние десятилетия на отдельных участках бассейна происходит увеличение подземного (меженного) стока и диапазон этих изменений колеблется от 5 % для устьевой части Северной Двины до 25 % для р. Юг [22].

Бассейн Северной Двины – лесной край, где профилирующей отраслью экономики является лесное хозяйство. Богатая сырьевая база и разветвленная речная сеть создали необходимые предпосылки для развития многоотраслевого лесохозяйственного комплекса, который включает заготовку, транспортировку, разнообразную обработку древесины и широко развитую целлюлозно-бумажную промышленность.

Как уже отмечалось ранее [23–25], основной очаг хозяйственного освоения и использования водных ресурсов бассейна Северной Двины – Архангельская агропромышленная агломерация, включающая в себя города Архангельск, Новодвинск, Северодвинск и прилегающие населенные пункты с комплексами предприятий и космодромом Плесецк. Среди основных отраслей и предприятий, оказывающих значительное влияние на состояние речных вод в бассейне Северной Двины, следует отметить предприятия судостроения (в том числе атомного судостроения), теплоэлектростанции и целлюлозно-бумажные комбинаты (ЦБК), расположенные в районах крупных городов (Котласский, Архангельский и Соломбальский ЦБК и др.), водный транспорт, предприятия агропромышленного комплекса (крупные птицефабрики) и др.

Наиболее сильное негативное воздействие на реки бассейна оказывает поступление загрязняющих веществ со сточными водами ЦБК, которые содержат трудноокисляемые органические вещества (лигнин, лигносульфонаты и др.), фенолы, формальдегид, метанол и др. За счет высокой органической нагрузки на этих участках рек (в местах сброса сточных вод ЦБК) возможно снижение концентрации растворенного в воде кислорода, что негативно сказывается на функционировании живых организмов и состоянии речных экосистем в целом [25].

Дополнительное техногенное воздействие на всю водосборную территорию Северной Двины и речные системы оказывает вырубка лесов при лесозаготовке, сплав и сопутствующие преобразования, которые приводят к перераспределению водного стока, нарушению естественного гидрологического режима, засорению речных вод древесиной и ее отходами, что в большей степени сказывается на состоянии биоресурсов [26].

Несмотря на такой уровень антропогенного воздействия, многолетняя изменчивость содержания компонентов ионного состава и минерализации вод в бассейне р. Северная Двина, как показано в работе [27], в значительной степени обусловлена природными факторами. При этом антропогенное влияние на ионный состав вод будет проявляться в районах расположения крупных промышленных узлов.

### Результаты и их обсуждение

*Особенности ионного состава воды и стока макрокомпонентов.* В условиях избыточного увлажнения, длительного холодного периода года, наличия хорошо промытых подзолистых почв и подстилающих их ледниковых отложений формируются воды малой минерализации с преобладанием в их составе ионов  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$  [20].

Изменчивость минерализации воды и содержания главных ионов в речных водах бассейна Северной Двины проявляется как по длине самой реки, так и между основными ее притоками. Многолетние данные об изменчивости минерализации воды представлены на рис. 1, 2. В целом по бассейну реки минерализация воды меняется от 19,5 до 1244,4 мг/дм<sup>3</sup>, а среднемноголетние значения минерализации варьируют в более узком диапазоне – 92,5–339,5 мг/дм<sup>3</sup>. Речные воды по данному показателю относятся к пресным поверхностным водам, за исключением единичных случаев, когда минерализация превышает 1 г/дм<sup>3</sup> (р. Северная Двина, г. Красавино) (рис. 1).

Наиболее узкими диапазонами изменения минерализации воды и низкими среднемноголетними значениями характеризуются два речных участка бассейна: р. Вычегда в районе г. Сыктывкара и р. Сысола у п. Первомайского (рис. 2). Вода на данных участках может быть отнесена даже к категории ультрапресных вод. Среднемноголетнее значение минерализации воды ниже 200 мг/дм<sup>3</sup> также характерно для участка р. Лузы (г. Красавино), однако максимальные значения достигают уровня 600 мг/дм<sup>3</sup> и выше.

Для остальных притоков и самой Северной Двины среднемноголетняя минерализация воды находится в пределах от 228,5 до 339,5 мг/дм<sup>3</sup>, что соответствует категории вод средней минерализации (200–500 мг/дм<sup>3</sup>) по классификации О.А. Алекина [28].

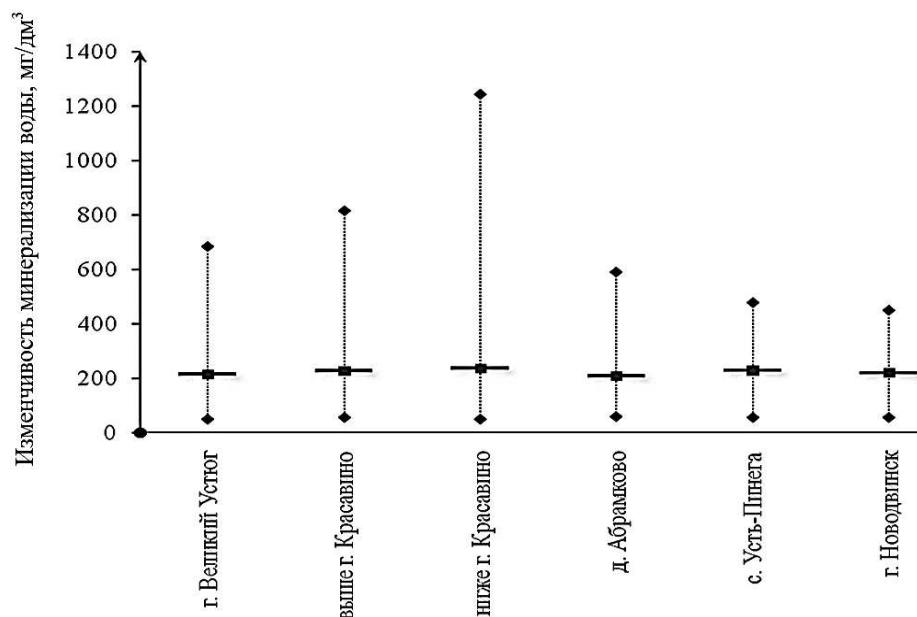


Рис. 1. Многолетняя изменчивость (1990–2017 гг.) минерализации воды р. Северная Двина (приведены диапазоны и среднемноголетние значения) (составлено авторами по данным ГСН Росгидромета [19])  
 / Fig. 1. Long-term variability (1990-2017) of water mineralization of the Northern Dvina River (ranges and average long-term values are given) (compiled by the authors based on data from the State observing system of Roshydromet [19])

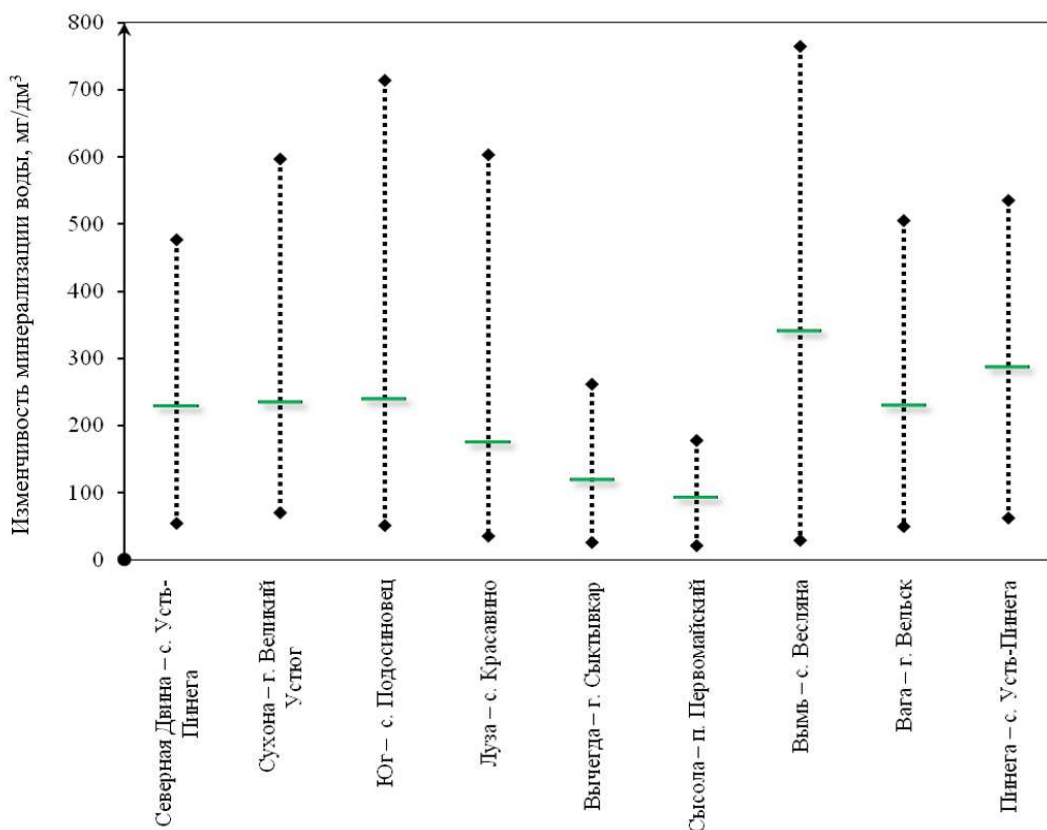


Рис. 2. Многолетняя изменчивость (1990–2017 гг.) минерализации воды основных притоков Северной Двины (приведены диапазоны и среднемноголетние значения) (составлено авторами по данным ГСН Росгидромета [19]) / Fig. 2. Long-term variability (1990-2017) of water salinity of the main tributaries of the Northern Dvina (ranges and average long-term values are given) (compiled by the authors based on data from the State observing system of Roshydromet [19])

Основной вклад в минерализацию воды вносят гидрокарбонаты и сульфаты, а также ионы кальция, которые поступают в речную сеть за счет процессов выщелачивания и смыва с водосборной территории. За исследуемый многолетний период содержание главных ионов в воде менялось в диапазоне: от 0,40 до 431,2 мг/дм<sup>3</sup> по хлоридам; от 0,80 до 395,8 мг/дм<sup>3</sup> по сульфатам; от 2,10 до 550,7 мг/дм<sup>3</sup> по гидрокарбонатам; от 3,40 до 157,9 мг/дм<sup>3</sup> по содержанию ионов кальция (таблица). Превышение ПДК в речных водах в бассейне Северной Двины наблюдается только по максимальным концентрациям сульфатов и достигает кратности 4 ПДК на отдельных участках бассейна (реки Северная Двина и Луза в районе г. Красавино; р. Вымь).

**Многолетняя изменчивость содержания отдельных главных ионов в воде р. Северная Двина и ее основных притоков (1990–2017 гг.) (составлено авторами по данным ГСН Росгидромета [19]) / Long-term variability of the content of main ions in the water of the Northern Dvina River and its main tributaries (1990-2017) (compiled by the authors based on data from the State observing system of Roshydromet [19])**

Река	Пункт наблюдений	Концентрация, мг/дм <sup>3</sup>								
		сульфатов			гидрокарбонатов			кальция		
		Cmin	Cmax	Ccp	Cmin	Cmax	Ccp	Cmin	Cmax	Ccp
Северная Двина	г. Великий Устюг	2,0	129,6	35,1	20,1	345,6	115,8	7,8	95,4	31,1
	Выше г. Красавино	2,0	221,7	35,3	17,1	311,7	120,2	8,1	91,3	31,8
	Ниже г. Красавино	2,0	359,5	39,0	25,8	426,5	122,2	7,0	91,3	32,4
	д. Абрамково	5,4	73,9	33,6	27,5	203,5	111,3	8,7	61,3	32,8
	с. Усть-Пинега	4,8	114,1	48,7	2,1	246,5	114,4	7,9	86,8	39,2
	г. Новодвинск	8,6	107,0	46,3	28,0	214,3	106,6	7,9	97,3	37,2
Сухона	г. Сокол	3,9	117,7	40,2	28,1	537,0	115,6	12,6	107,4	32,2
	г. Тотьма	3,9	152,9	31,8	25,6	320,8	116,7	8,3	77,8	29,9
	Выше г. Великий Устюг	5,7	137,1	42,3	34,1	299,1	121,7	10,0	95,4	34,3
Юг	д. Пермас	2,0	57,3	15,7	9,6	158,8	79,0	4,4	40,0	21,6
	с. Подосиновец	4,4	231,0	33,2	12,2	550,7	130,7	6,1	157,0	40,0
Луза	с. Красавино	2,9	342,7	29,9	6,1	256,0	86,4	4,8	82,1	29,4
Вычегда	г. Сыктывкар	3,8	51,9	20,2	10,4	161,7	78,6	3,4	52,5	22,6
	д. Гавриловка	3,4	45,1	16,8	9,8	157,4	71,2	4,1	41,7	19,8
Сысола	п. Первомайский	1,9	26,4	8,3	3,0	124,8	59,1	3,6	28,4	14,9
Вымь	с. Весляна	8,2	395,8	145,9	7,3	196,0	104,4	3,8	157,9	76,0
Вага	Выше г. Вельска	2,9	171,5	55,6	25,1	320,2	129,8	8,2	108,2	45,0
	д. Леховская	2,9	157,4	48,5	28,6	256,4	142,2	8,9	104,6	44,4
Пинега	д. Согры	0,8	35,6	8,5	11,7	204,6	113,3	3,5	49,6	25,1
	с. Кулогоры	1,8	163,1	55,2	20,0	222,5	101,7	4,8	90,6	40,6
	с. Усть-Пинега	17,3	179,1	82,5	24,9	227,3	121,0	10,3	98,9	55,8

**Примечания:** цветом выделена кратность превышения ПДК:

	– в 1–2 раза;
	– в 3–4 раза.

От истока к устью Северной Двины в целом наблюдается постепенное увеличение общей минерализации речных вод. Но эту закономерность нарушает повышенный модуль стока главных ионов в бассейне р. Выми (рис. 3). Здесь модуль суммарного выноса солей составляет ~116 т/год с 1 км<sup>2</sup>. Минимальный модуль ионного стока зафиксирован в бассейне р. Сысола [25].

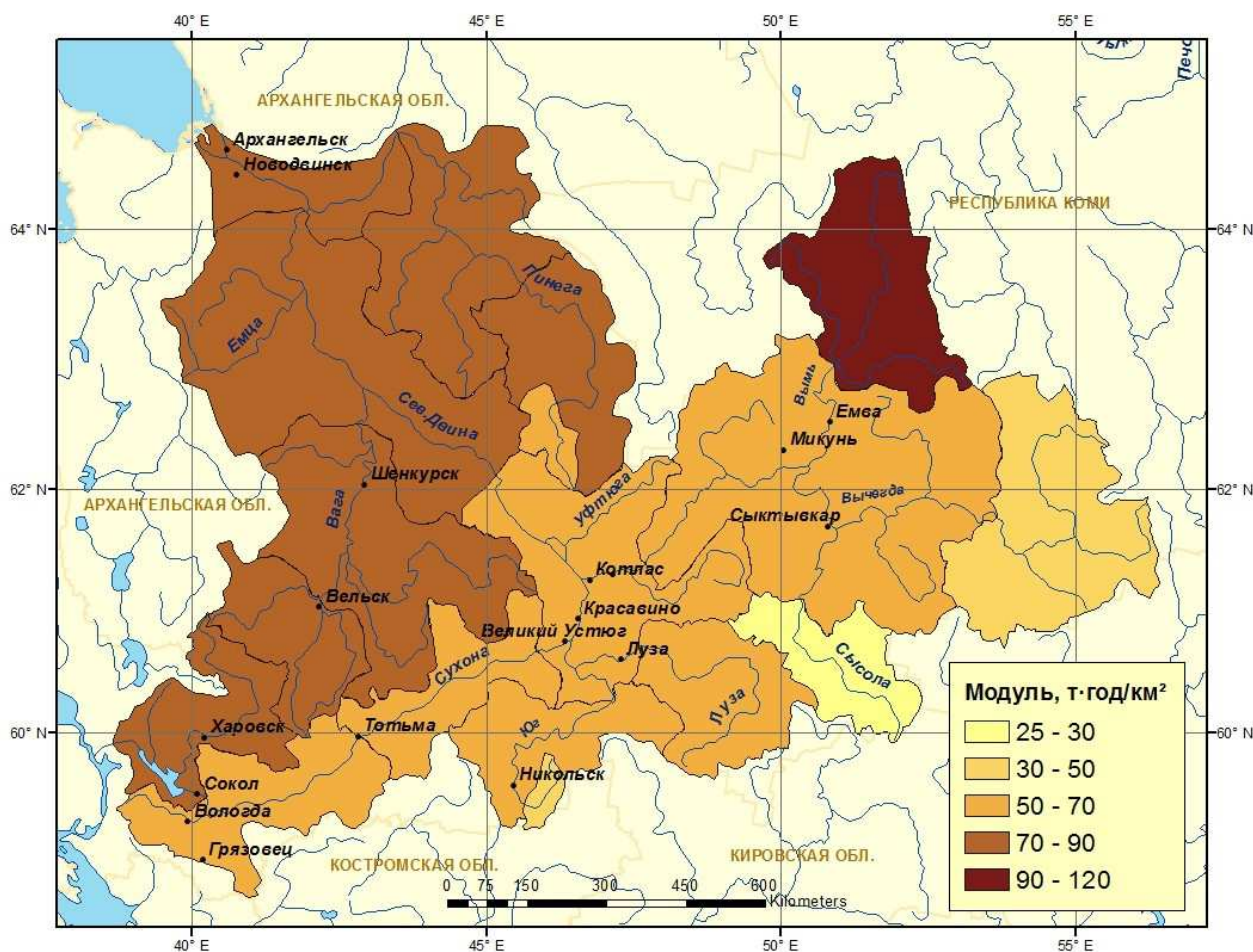


Рис. 3. Многолетняя изменчивость (1990–2017 гг.) модуля ионного стока в бассейне Северной Двины (составлено по [13, 25]) / Fig. 3. Long-term variability (1990-2017) of the ion sink module in the Northern Dvina basin (compiled from [13, 25])

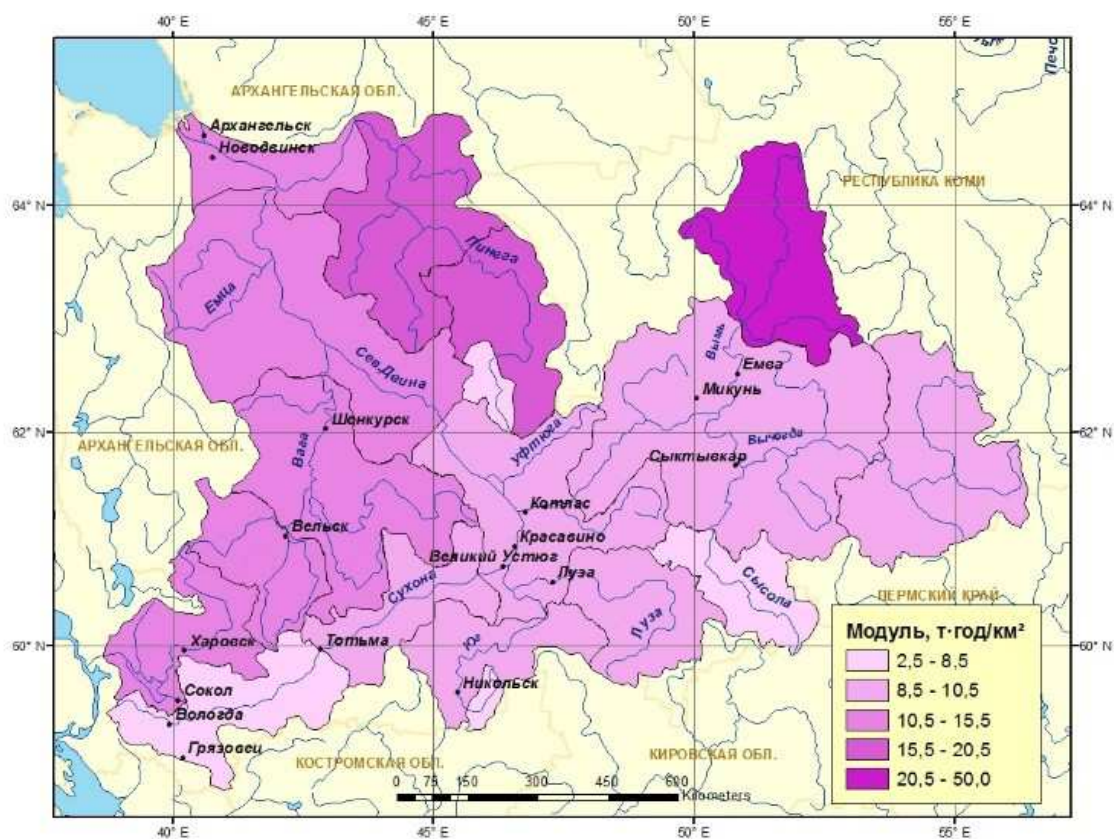
В бассейне Северной Двины экстремальные значения модуля ионного стока связаны прежде всего с повышенной минерализацией речных вод. Средняя минерализация воды в бассейне составляет 203 мг/дм<sup>3</sup>, повышенная минерализация речных вод обусловлена вкладом основных анионов – сульфатов и гидрокарбонатов [25].

Максимальное значение модуля стока сульфатов характерно для водосбора р. Вымы (~50 т/год с 1 км<sup>2</sup>), что составляет ~43 % общего ионного стока с данного частного водосбора и свидетельствует о загрязнении вод сульфатами как ведущего компонента сточных вод промышленных предприятий. Минимальный модуль стока сульфатов наблюдается для р. Сысолы (рис. 4а), а в нижнем течении Северной Двины и в бассейне Пинеги количество выносимых за год сульфатов достигает в среднем 15, 5 и 20,5 т/год с 1 км<sup>2</sup> соответственно [25].

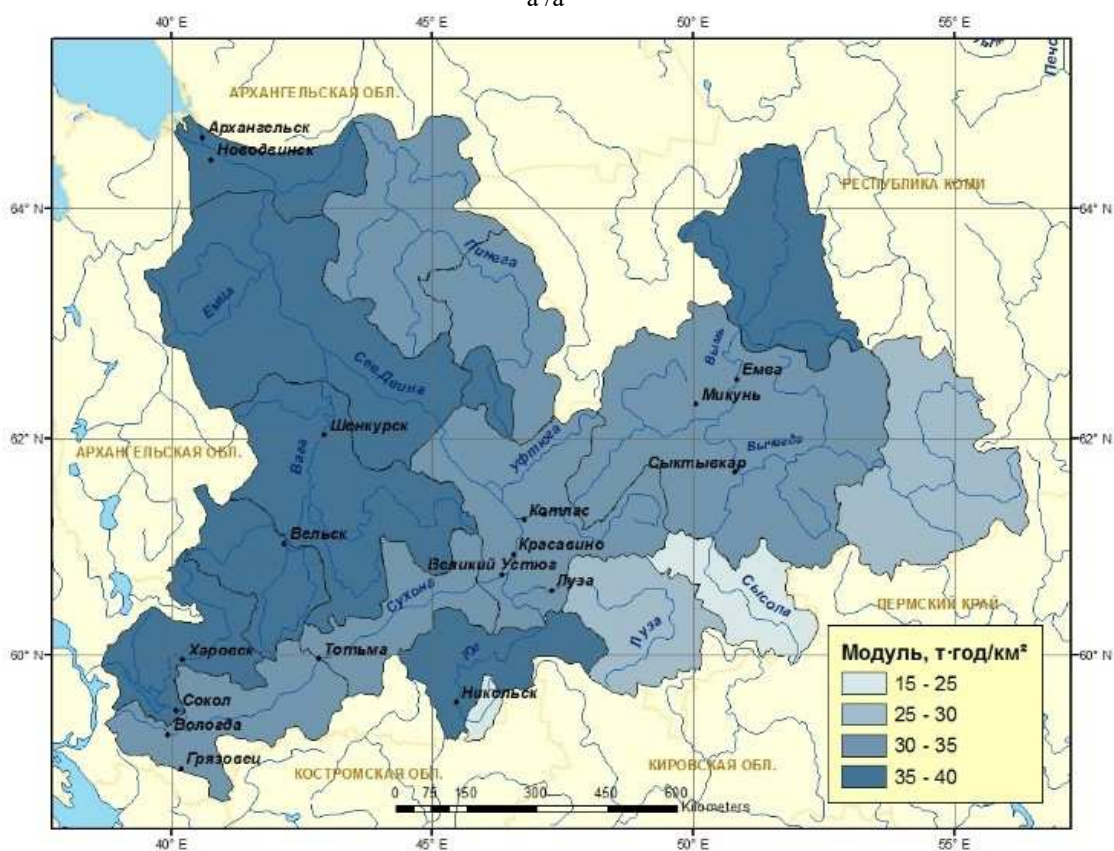
Изменчивость стока гидрокарбонатов в большей степени совпадает с пространственным распределением ионного стока в бассейне Северной Двины (рис. 4б) и имеет меньшую вариабельность – диапазон значений модуля стока гидрокарбонатов составляет 15–40 т/год с 1 км<sup>2</sup>.

Пространственное распределение значений модуля стока хлоридов во многом совпадает с распределением сульфатов по территории бассейна. Прослеживается повышенное содержание хлоридов в речной воде левых притоков Северной Двины и в верховьях р. Сухоны. Эпизодические повышения показателя могут быть связаны с аварийными или залповыми сбросами сточных вод различных производств, прежде всего предприятий целлюлозно-бумажной отрасли [25]. Таким образом, несмотря на содержания главных ионов, не превышающие ПДК, и невысокие значения ионного стока и основных его компонентов, изучение данных характеристик речных бассейнов имеет важное значение с точки зрения выявления источников загрязнения и возможных залповых сбросов в речную сеть.





а / а



б / б

Рис. 4. Многолетняя изменчивость (1990–2017 гг.) модуля стока сульфатов (а) и гидрокарбонатов (б) в бассейне Северной Двины (составлено по [13, 25]) / Fig. 4. Long-term variability (1990-2017) of the runoff modulus of sulfates (a) and hydrocarbonates (b) in the Northern Dvina basin (compiled from [13, 25])

## Заключение

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Ионный состав воды Северной Двины и ее притоков формируется в условиях избыточного увлажнения, длительного холодного периода года, наличия хорошо промытых подзолистых почв и подстилающих их ледниковых отложений, что обуславливает формирование речных вод с малой минерализации с преобладанием в их составе гидрокарбонатов и ионов кальция.

2. Изменчивость минерализации и значений концентраций главных ионов в воде р. Северная Двина и ее основных притоков проявляется как по длине самой реки, так и между основными притоками. Наиболее высокие среднемноголетние значения минерализации воды характерны для участков рек Северная Двина и Вымь, а наименьшие – для Вычегды и Сысолы. Нарушение качества воды по содержанию макрокомпонентов в воде отмечается эпизодически и только по максимальным концентрациям сульфатов (до 4,0 ПДК).

3. Изменчивость ионного стока и отдельных его компонентов характеризуется пространственной неоднородностью, а наибольшие значения модулей стока характерны для частного водосбора р. Выми.

Результаты исследования могут быть полезны при решении ряда практических вопросов, связанных с исследованием формирования химического состава и качества воды в бассейне Северной Двины, и использованы при разработке экологически обоснованных природоохранных мероприятий по улучшению экологической обстановки в бассейне Северной Двины и функционирования речных экосистем.

## Список источников

1. Ясинский С.В., Каишутин Е.А., Сидорова М.В. Диффузное загрязнение водных объектов равнинных территорий: проблемы оценки // Изв. РАН. Серия геогр. 2023. Т. 87, № 1. С. 115–130.
2. Даниленко А.О., Косменко Л.С., Решетняк О.С., Кондакова М.Ю. Предпосылки техногенной метаморфизации ионного состава воды р. Надым в условиях глобальных климатических изменений // Изв. РАН. Серия геогр. 2020. № 1. С. 127–137.
3. Даниленко А.О., Решетняк О.С., Косменко Л.С., Кондакова М.Ю. Изменение интенсивности химической денудации на водосборе Печоры в условиях нестационарного климата и хозяйственной деятельности // Вода и экология: проблемы и решения. 2020. № 4 (84). С. 38–49.
4. Алевин О.А., Бражникова Л.В. Сток растворенных веществ с территории СССР. М.: Наука, 1964. 144 с.
5. Гидрохимический атлас СССР. М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1990. 110 с.
6. Никаноров А.М., Брызгалов В.А. Реки России. Ч. II: Реки Европейского Севера и Сибири (гидрохимия и гидроэкология). Ростов н/Д.: НОК, 2010. 296 с.
7. Гордеев В.В., Шевченко В.П. Формы нахождения некоторых металлов во взвеси Северной Двины и их сезонные вариации // Океанология. 2012. Т. 52, № 2. С. 282–291.
8. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / под ред. Н.Н. Филатова, А.Ю. Тержевика. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2007. 335 с.
9. Никаноров А.М., Смирнов М.П., Клименко О.А. Многолетние тенденции общего и антропогенного выноса органических и биогенных веществ реками России в арктические и тихоокеанские моря // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 3. С. 318–328.
10. Гордеев В.В., Шевченко В. П., Коробов В.Б., Коченкова А.И., Стародымова Д.П., Белоруков С.К., Лохов А.С., Яковлев А.Е., Чульцова А.Л., Золотых Е.О., Лобковский Л.И. Концентрации химических элементов в воде и взвеси реки Северная Двина и их годовой валовый сток в Белое море // Докл. РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 500, № 1. С. 95–102.
11. Даниленко А.О., Георгиади А.Г. Изменение водного и ионного стока Северной Двины в условиях современного потепления климата // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны : расш. тез. докл. II Всерос. науч. конф. с междунар. участием (Москва, 25–27 ноября 2020 г.). М.: ИГКЭ, 2020. С. 264–267.
12. Даниленко А.О., Георгиади А.Г. Влияние современного потепления на водный и ионный сток Северной Двины // Теор. и прикл. экология. 2022. № 1. С. 64–69.
13. Гидрохимический сток рек Европейской части России: атлас / под ред. Р.Г. Джамалова, О.С. Решетняк, М.М. Трофимчука. М.: ИВП РАН, 2020. 155 с.
14. Брызгалов В.А., Никаноров А.М., Косменко Л.С., Решетняк О.С. Устьевые экосистемы крупных рек России: антропогенная нагрузка и экологическое состояние. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2015. 164 с.



15. Решетняк О.С. Многолетняя изменчивость ионного стока крупных рек Арктической зоны России // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2021. № 3. С. 80–86.
16. Даценко Ю.С., Ефимова Л.Е., Заславская М.Б., Пахомова О.М. Ионный сток в арктические моря России // Рос. полярные исследования. 2016. № 1 (23). С. 12–14.
17. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 27.11.2023).
18. Качество поверхностных вод РФ: ежегодник. URL: <https://gidrohim.com/node/44> (дата обращения: 23.10.2023).
19. Государственный водный кадастр. Раздел 1: Поверхностные воды. Ежегодные данные о качестве поверхностных вод суши за 1990–2017 гг. Т. 1 (28), вып. 9: Бассейны рек на территории Архангельской, Вологодской областей и Республики Коми. Архангельск: Изд-во Северное УГМС, 1991–2018.
20. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3: Северный край / под ред. И.М. Жила, Н.М. Алюшинской. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 663 с.
21. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Северная Двина. М.: Московско-Окское БВУ, 2010. 348 с.
22. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России: формирование, распределение, использование / под ред. Р.Г. Джамалова, Н.Л. Фроловой. М.: ГЕОС, 2015. 320 с.
23. Брызгалов В.А., Соколова Л.П., Косменко Л.С., Иванов В.В. Гидролого-экологическое состояние Северной Двины в условиях антропогенного воздействия // Качество поверхностных вод Российской Федерации в 2004 г.: ежегодник. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. С. 339–361.
24. Никаноров А.М., Соколова Л.П., Решетняк О.С., Кондакова М.Ю., Даниленко А.О. Антропогенная нагрузка на устьевую область р. Северная Двина // Метеорология и гидрология. 2010. № 4. С. 75–84.
25. Dzhamalov R.G., Mironenko A.A., Myagkova K.G., Reshetnyak O.S., Safronova T.I. Space-Time Analysis of Hydrochemical Composition and Pollution of Water in the Northern Dvina Basin // Water Resources. 2019. Vol. 46(2). P. 188–198.
26. Новосёлов А. П., Студёнов И. И. Факторы техногенного воздействия на бассейн реки Северной Двины // Arctic Environmental Research. 2014. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/factory-tehnogennogo-vozdeystviya-na-basseyn-reki-severnoy-dviny> (дата обращения: 03.04.2024).
27. Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Ломова Д.В. Пространственно-временная изменчивость ионного состава и минерализации вод р. Северная Двина // Метеорология и гидрология. 2004. № 10. С. 87–99.
28. Никаноров А.М. Гидрохимия: Ростов н/Д.: НОК, 2008. 461 с.

## References

1. Yasinsky S.V., Kashutina E.A., Sidorova M.V. Diffuse pollution of water bodies in lowland areas: assessment problems. *Izv. RAN. Seriya geogr. = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Series Geographical*. 2023;87(1):115-130. (In Russ.).
2. Danilenko A.O., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S., Kondakova M.Yu. Prerequisites for the technogenic metamorphosis of the ionic composition of the Nadym River water in the context of global climate change. *Izv. RAN. Seriya geogr. = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Series Geographical*. 2020;(1):127-137. (In Russ.).
3. Danilenko A.O., Reshetnyak O.S., Kosmenko L.S., Kondakova M.Yu. Changes in the intensity of chemical denudation in the Pechora catchment under conditions of non-stationary climate and economic activity. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya = Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2020;(4):38-49. (In Russ.).
4. Alekin O.A., Brazhnikova L.V. *Flux of dissolved substances from the territory of the USSR*. Moscow: Nauka Publ.; 1964. 144 p. (In Russ.).
5. *Hydrochemical atlas of the USSR*. Moscow: Main Directorate of Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the USSR Press; 1990. 110 p. (In Russ.).
6. Nikanorov A.M., Bryzgalov V.A. *Rivers of Russia. Part II. Rivers of the European North and Siberia (hydrochemistry and hydroecology)*. Rostov-on-Don: NOK Publ.; 2010. 296 p. (In Russ.).
7. Gordeev V.V., Shevchenko V.P. Forms of occurrence of some metals in the suspension of the Northern Dvina and their seasonal variations. *Okeanologiya = Oceanology*. 2012;52(2):282-291. (In Russ.).
8. Filatov N.N., Terzhevnik A.Yu., eds. *The White Sea and its catchment area under the influence of climatic and anthropogenic factors*. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Press; 2007. 335 p. (In Russ.).
9. Nikanorov A.M., Smirnov M.P., Klimenko O.A. Long-term trends in the general and anthropogenic removal of organic and biogenic substances by Russian rivers into the Arctic and Pacific seas. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2010;37(3):318-328. (In Russ.).
10. Gordeev V.V., Shevchenko V.P., Korobov V.B., Kochenkova A.I., Starodymova D.P., Belorukov S.K., Likhov A.S., Yakovlev A.E., Chultsova A. L.L., Zolotykh E.O., Lobkovsky L.I. Concentrations of chemical elements in water and suspended matter of the Northern Dvina River and their annual gross flow into the White Sea. *Dokl. RAN. Nauki o Zemle = Reports of the Russian Academy of Sciences. Geosciences*. 2021;500(1):95-102. (In Russ.).

11. Danilenko A.O., Georgiadi A.G. Changes in water and ion flow of the Northern Dvina in conditions of modern climate warming. *Monitoring the state and pollution of the environment. Ecosystems and climate of the Arctic zone*. Extended abstracts of reports of the II All-Russian Scientific Conference with international participation (Moscow, November 25-27, 2020). Moscow: Institute of Global Climate and Ecology Press; 2020:264-267. (In Russ.).
12. Danilenko A.O., Georgiadi A.G. The influence of modern warming on the water and ion flow of the Northern Dvina. *Teor. i prikl. ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*. 2022;(1):64-69. (In Russ.).
13. Dzhamalov R.G., Reshetnyak O.S., Trofimchuk M.M., eds. *Hydrochemical flow of rivers in the European part of Russia*. Atlas. Moscow: RAS Water Problems Institute Press; 2020. 155 p. (In Russ.).
14. Bryzgalo V.A., Nikanorov A.M., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S. *Ecosystems of the mouth areas of the large Russia river: anthropogenic load and ecological state*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2015. 164 p. (In Russ.).
15. Reshetnyak O.S. Long-term variability of ion flow of large rivers in the Arctic zone of Russia. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(3):80-86. (In Russ.).
16. Datsenko Yu.S., Efimova L.E., Zaslavskaya M.B., Pakhomova O.M. Ion flow into the Arctic seas of Russia. *Russian Polar Research*. 2016;(1):12-14. (In Russ.).
17. *Automated information system for state monitoring of water bodies (AIS GMVO)*. Available from: <https://gmvo.skniivh.ru/> [Accessed 27th November 2023]. (In Russ.).
18. *Quality of surface waters of the Russian Federation*. Yearbook. Available from: <https://gidrohim.com/node/44> [Accessed 23th October 2023]. (In Russ.).
19. *State water cadastre. Section 1. Surface waters. Annual terrestrial surface water quality data 1990-2017*. Vol. 1 (28), iss. 9. River basins in the Arkhangelsk, Vologda regions and the Komi Republic. Arkhangelsk: Northern Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring Press; 1991-2018. (In Russ.).
20. Zhila I.M., Alushinskaya N.M., eds. *Surface water resources of the USSR. Vol. 3. Northern region*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1972. 663 p. (In Russ.).
21. *Scheme for the integrated use and protection of water bodies in the Northern Dvina River basin*. Moscow: Moscow-Oka Basin Water Management Press; 2010. 348 p. (In Russ.).
22. Dzhamalov R.G., Frolova N.L., eds. *Modern resources of ground and surface waters of the European part of Russia: formation, distribution, use*. Moscow: GEOS Publ.; 2015. 320 p. (In Russ.).
23. Bryzgalo V.A., Sokolova L.P., Kosmenko L.S., Ivanov V.V. Hydrological and ecological state of the Northern Dvina under conditions of anthropogenic impact. *Quality of surface waters of the Russian Federation. Yearbook 2004*. Moscow: Roshydromet Meteorological Agency Press; 2006:339-361. (In Russ.).
24. Nikanorov A.M., Sokolova L.P., Reshetnyak O.S., Kondakova M.Yu., Danilenko A.O. Anthropogenic load on the mouth area Northern Dvina river. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2010;(4):75-84. (In Russ.).
25. Dzhamalov R.G., Mironenko A.A., Myagkova K.G., Reshetnyak O.S., Safronova T.I. Space-Time Analysis of Hydrochemical Composition and Pollution of Water in the Northern Dvina Basin. *Water Resources*. 2019;46(2):188-198.
26. Novoselov A.P., Studenov I.I. Factors of technogenic impact on the Northern Dvina River basin. *Arctic Environmental Research*. 2014;(2). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/factory-tehnogennogo-vozdeystviya-na-basseyn-reki-severnoy-dviny> [Accessed 3rd April 2024]. (In Russ.).
27. Brekhovskikh V.F., Volkova Z.V., Lomova D.V. Spatiotemporal variability of the ionic composition and mineralization of the river Northern Dvina waters. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2004;(10):87-99. (In Russ.).
28. Nikanorov A.M. *Hydrochemistry*. Textbook. Rostov-on-Don: NOK Publ.; 2008. 461 p. (In Russ.).

#### **Информация об авторах**

О.С. Решетняк – кандидат географических наук, доцент, кафедра геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле.  
К.Г. Галагур – младший научный сотрудник.

#### **Information about the authors**

O.S. Reshetnyak – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences.  
K.G. Galagur – Junior Researcher.

Статья поступила в редакцию 25.04.2024; одобрена после рецензирования 21.06.2024; принята к публикации 16.10.2024.  
The article was submitted 25.04.2024; approved after reviewing 21.06.2024; accepted for publication 16.10.2024.

Научная статья

УДК 551.594

doi: 10.18522/1026-2237-2024-4-2-104-112

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

**Дмитрий Владимирович Тимошенко<sup>1</sup>, Геннадий Владимирович Куповых<sup>2</sup>✉,  
Ольга Васильевна Белоусова<sup>3</sup>**

<sup>1, 2, 3</sup> Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

<sup>1</sup>dmitrytim@sfedu.ru, ORCID: 0009-0004-0444-2807

<sup>2</sup>kupovykh@sfedu.ru✉

<sup>3</sup>obelousova@sfedu.ru

**Аннотация.** Приведены результаты анализа модели электродинамики приземного слоя атмосферы методами теории подобия. В приближении электродного эффекта математическая модель представляется в виде нестационарной начально-краевой задачи для уравнения параболического типа. Обоснована корректность применения различных типов электродинамических моделей в зависимости от метеорологических условий в стратифицированном приземном слое. Получены оценки характерных масштабов электродного слоя для различных метеорологических параметров атмосферы. Они могут быть использованы при моделировании задач электродинамики приземного слоя. Для случая нейтральной стратификации атмосферы реализована процедура приведения системы уравнений электродного эффекта к безразмерному виду и получения критериев подобия. Построены модели классического, турбулентного, конвективно-турбулентного электродного слоя. Путем расщепления по физическим процессам получены приближения для случаев интенсивного турбулентного перемешивания и сильного конвективного переноса.

**Ключевые слова:** уравнения электродного эффекта, критерии подобия, расщепление по физическим процессам

**Для цитирования:** Тимошенко Д.В., Куповых Г.В., Белоусова О.В. Анализ электродинамической модели приземного слоя атмосферы // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 4-2. С. 104–112.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

## ANALYSIS OF THE ATMOSPHERE GROUND LAYER ELECTRODYNAMIC MODEL

**Dmitry V. Timoshenko<sup>1</sup>, Gennady V. Kupovykh<sup>2</sup>✉, Olga V. Belousova<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Southern Federal University, Taganrog, Russia

<sup>1</sup>dmitrytim@sfedu.ru, ORCID: 0009-0004-0444-2807

<sup>2</sup>kupovykh@sfedu.ru✉

<sup>3</sup>obelousova@sfedu.ru

**Abstract.** The paper presents the results of analyzing the atmosphere surface layer electrodynamic model using the methods of similarity theory. In the electrode effect approximation, the mathematical model is presented in the form of a nonstationary initial-boundary value problem for a parabolic type equation. The correctness of using various types of electrodynamic models depending on meteorological conditions in the stratified surface layer is substantiated. Estimates of the characteristic scales of the electrode layer are obtained depending on the meteorological parameters of the atmosphere, which can be used in modeling problems of electrodynamic of the

© Тимошенко Д.В., Куповых Г.В., Белоусова О.В., 2024

surface layer. For the case of neutral stratification of the atmosphere, a procedure has been implemented to reduce the system of equations of the electrode effect to a dimensionless form and obtain similarity criteria. Models of a classical, turbulent, convective-turbulent electrode layer were constructed, and approximations were obtained for the cases of intense turbulent mixing and strong convective transfer by splitting them into physical processes.

**Keywords:** electrode effect equations, similarity criteria, splitting into physical processes

**For citation:** Timoshenko D.V., Kupovykh G.V., Belousova O.V. Analysis of the Atmosphere Ground Layer Electrodynamic Model. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(4-2):104-112. (In Russ.).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

## Введение

Разнообразные задачи электродинамики приземного слоя решаются посредством совокупности математических моделей, построенных на основе теории электродного эффекта в атмосфере [1–9]. При этом используется достаточно широкий набор уравнений, соответствующий случаям преобладания различных метеорологических и физических факторов или их совокупности в формировании электрической структуры атмосферы вблизи поверхности Земли.

Цель настоящего исследования – системное обоснование применения уравнений электродного эффекта в атмосфере с позиций теории подобия [10, 11] и возмущений [12] и их последующего решения методами математического моделирования. Акцент делается именно на общем характере уравнений, классифицируемых исключительно с точки зрения особенностей того или иного типа электродного эффекта, не касаясь конкретных функциональных соотношений для преобладающих факторов, конкретные виды этих соотношений связаны с вариативностью атмосферных процессов и их зависимостью от метеорологических факторов. Также необходимо учитывать рельеф земной поверхности, его аэродинамические свойства. Статистический характер турбулентных явлений ведет к необходимости использовать некоторые приближения в параметрах моделей. Эффективным средством преодоления описанных трудностей служат методы теории подобия. С их помощью вариативность статистических характеристик турбулентных процессов сводится к масштабированию соответствующих пространственно-временных характеристик. Следствием рассмотрения характерных масштабов является набор безразмерных величин в электродинамических уравнениях, существенно менее изменчивых, чем исходные статистические величины. Это, в свою очередь, расширяет границы применимости рассматриваемых математических моделей, но требует их дополнительного обоснования.

## Общие уравнения электродного эффекта в приземном слое атмосферы

В качестве механизма, регулирующего электродинамическое состояние в приповерхностных слоях атмосферы, рассматривается электродный эффект [1–9]. Это явление реализуется в ионизированной среде вблизи поверхности Земли (электрод) через взаимодействие нескольких физических процессов. Результатом этого становится зависимость электрических характеристик атмосферы от высоты в образующемся электродном слое.

Электродинамические процессы в нестационарном ионизированном приземном слое атмосферы с учетом турбулентного перемешивания и конвективного переноса описываются следующей системой уравнений [13–16]:

$$\frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} \pm \frac{\partial}{\partial z} (b_{1,2} \cdot n_{1,2} \cdot E) - \frac{\partial}{\partial z} \left( D_T(z) \cdot \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (\nu(z) \cdot n_{1,2}) = q(z) - \alpha n_1 n_2,$$
$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{e}{\epsilon_0} (n_1 - n_2). \quad (1)$$

Система (1) дополняется начальными и граничными условиями:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_1(z)|_{t=0} = n_2(z)|_{t=0} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}} \left( 1 - e^{-\frac{(z-z_0)}{L_0}} \right), \\ E(z)|_{t=0} = E_0 \end{array} \right., \quad \left\{ \begin{array}{l} n_1(z)|_{z=z_0} = n_2(z)|_{z=z_0} = 0 \\ n_1(z)|_{z=l} = n_2(z)|_{z=l} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}, \\ E(z)|_{z=z_0} = E_0 \end{array} \right., \quad (2)$$

где  $n_{1,2}$  – объемная концентрация легких ионов (аэроионов);  $b_{1,2}$  – их подвижность;  $E$  – напряженность электрического поля;  $v$  – вертикальная составляющая конвективного переноса аэроионов;  $D_T$  – коэффициент турбулентной диффузии;  $q(z)$  – интенсивность ионообразования;  $\alpha$  – коэффициент рекомбинации;  $E_0$  – значение напряженности электрического поля у поверхности Земли;  $L_0$  – характерная толщина электродного слоя;  $z_0$  – параметр шероховатости земной поверхности;  $l$  – верхняя граница электродного слоя.

В процессе моделирования решается начально-краевая задача (1), (2) в области  $\{z_0 < z < l, 0 < t \leq T\}$ . При этом можно принять следующие значения параметров в соотношениях (1), (2) [2]:  $b_1 = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ,  $b_2 = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ,  $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ ,  $E_0 = -100 \text{ В м}^{-1}$ ,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ ,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ .

Отметим, что (1) следует из системы уравнений Максвелла, которая описывает электродинамические явления в трехмерном пространстве. Однако система (1) является одномерной по пространственным координатам. Это объясняется тем, что земная атмосфера обладает сферической симметрией, а электрическое поле – горизонтально-однородно. Поэтому в качестве значащей координатной переменной в пределах электродного слоя принимается только высота, а пространственные распределения электрических величин получаются в виде профилей.

### Характерные масштабы характеристик электродного слоя

Явление электродного эффекта в приземном слое может иметь различную реализацию в соответствии с совокупностью физических факторов, действующих в конкретной местности наблюдения. В этой связи различают следующие основные типы моделей электродного эффекта: классический, турбулентный, конвективно-турбулентный, приближения сильного турбулентного или конвективного перемешивания.

Каждый из этих типов электродного эффекта описывается системой уравнений (1) различной структуры. Получим эти уравнения средствами теории подобия.

Для дальнейшего анализа система (1) приводится к безразмерной форме. Определяется характерная толщина электродного слоя  $L_0$  с помощью последовательного введения ряда безразмерных параметров:

$$n_{1,2}|_{z \rightarrow \infty} = n_\infty = \sqrt{\frac{q_\infty}{\alpha}}, \quad E|_{z \rightarrow \infty} = E_\infty, \quad n'_{1,2} = \frac{n_{1,2}}{n_\infty}, \quad E' = \frac{E}{E_\infty}. \quad (3)$$

При этом необходимо задание в явном виде коэффициентов  $D_T(t, z)$  и  $v(z)$ . Очевидно, что структура критериев подобия для уравнений (1) существенным образом будет определяться видом этих зависимостей, поэтому для получения уравнений, описывающих все возможные реализации электродного эффекта, необходимо задавать наиболее общий вид соотношений для величин  $D_T(t, z)$  и  $v(z)$ , исходя из сделанных гипотез в сочетании с экспериментальными данными [1, 17–19].

Для коэффициента турбулентной диффузии можно использовать выражение [1, 3, 18, 19]:

$$D_T(z) = D_m z^m, \quad (4)$$

где параметр  $m$  принимает значения 0, 1, 4/3 соответственно для случаев устойчивой, нейтральной и термически неустойчивой стратификации приземного слоя атмосферы.

Рассмотрим стационарное представление выражения турбулентной диффузии (4) для наиболее хорошо изученного случая – нейтральной стратификации атмосферы [18], т.е.  $m = 1$ . Скорость конвективного переноса пока будем считать постоянной величиной:  $v = const$ .

Подстановка параметров (3) и соотношений для величин  $D_T$  и  $v$  в уравнения (1) дает выражения:

$$\frac{\partial(n'_1 n_\infty)}{\partial t} + b_1 \frac{\partial(n'_1 n_\infty E' E_\infty)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left( D_m z^m \frac{\partial(n'_1 n_\infty)}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (\nu n'_1 n_\infty) = q - \alpha n'_1 n_\infty^2 n'_2, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(n'_2 n_\infty)}{\partial t} + b_2 \frac{\partial(n'_2 n_\infty E' E_\infty)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left( D_m z^m \frac{\partial(n'_2 n_\infty)}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (\nu n'_2 n_\infty) = q - \alpha n'_1 n_\infty^2 n'_2.$$

Деля уравнения (5) на величину  $q_\infty$  и учитывая соотношение  $n_\infty^2 = \frac{q_\infty}{\alpha}$ , получаем

$$\frac{n_\infty}{q_\infty} \frac{\partial n'_1}{\partial t} + \frac{b_1 n_\infty E_\infty}{q_\infty} \frac{\partial(n'_1 E')}{\partial z} - \frac{D_m n_\infty}{q_\infty} \frac{\partial}{\partial z} \left( z^m \frac{\partial n'_1}{\partial z} \right) + \nu \frac{n_\infty}{q_\infty} \frac{\partial n'_1}{\partial z} = 1 - n'_1 n'_2, \quad (6)$$

$$\frac{n_\infty}{q_\infty} \frac{\partial n'_2}{\partial t} - \frac{b_2 n_\infty E_\infty}{q_\infty} \frac{\partial(n'_2 E')}{\partial z} - \frac{D_m n_\infty}{q_\infty} \frac{\partial}{\partial z} \left( z^m \cdot \frac{\partial n'_2}{\partial z} \right) + \nu \frac{n_\infty}{q_\infty} \frac{\partial n'_2}{\partial z} = 1 - n'_1 n'_2.$$

Обозначим через  $\tau = 1/\sqrt{q_\infty \alpha}$  величину, определяющую характерное время электродинамических процессов в приземном слое. С учетом введенного обозначения уравнения (6) преобразуются к виду

$$\tau \frac{\partial n'_1}{\partial t} + \tau b_1 E_\infty \frac{\partial(n'_1 E')}{\partial z} - D_m \tau \frac{\partial}{\partial z} \left( z \frac{\partial n'_1}{\partial z} \right) + \nu \tau \frac{\partial n'_1}{\partial z} = 1 - n'_1 n'_2, \quad (7)$$

$$\tau \frac{\partial n'_2}{\partial t} - \tau b_2 E_\infty \frac{\partial(n'_2 E')}{\partial z} - D_m \tau \frac{\partial}{\partial z} \left( z \frac{\partial n'_2}{\partial z} \right) + \nu \tau \frac{\partial n'_2}{\partial z} = 1 - n'_1 n'_2.$$

Полученная запись исходных уравнений в виде (7) позволяет выделить несколько характерных масштабов электродинамических процессов:  $L_{nE1} = b_1 E_\infty \tau$ ,  $L_{nE2} = b_2 E_\infty \tau$ ,  $L_D = D_1 \tau$ ,  $L_\nu = \nu \tau$ .

Характерные масштабы позволяют определять области изменения параметров, входящих в соответствующие уравнения, что обеспечивает корректное проведение моделирования исследуемых процессов.

Приведем в качестве примера значения указанных характерных масштабов, соответствующие параметрам системы уравнений (1) при  $D_1 = 0,1$  м/с,  $\nu = 0,05$  м/с,  $q_\infty = 7 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>с<sup>-1</sup>,  $E = 100$  В/м. Имеем  $\tau \approx 300$  с,  $L_D = 30$  м,  $L_\nu = 15$  м,  $L_{nE1} = 3,6$  м,  $L_{nE2} = 4,2$  м.

### Критерии подобия для электродинамических моделей

Рассмотрим систему уравнений (1), (2) для горизонтально-однородного конвективно-турбулентного приземного слоя. Для анализа системы перейдем к безразмерной форме записи уравнений.

Введем следующие обозначения:  $n_{1,2}|_{z \rightarrow \infty} = n_\infty = \sqrt{\frac{q_\infty}{\alpha}}$ ,  $E|_{z \rightarrow \infty} = E_\infty$ ,  $l_1 = D_1 \cdot \tau$ ,  $\tau = 1/\sqrt{q_\infty \alpha}$ ,

$$t' = t/T, \quad z' = z/l_1, \quad n'_{1,2} = n_{1,2}/n_\infty, \quad E' = E/E_\infty.$$

Подставляя их в систему (1), получаем

$$\begin{cases} \frac{\partial n'_{1,2} n_\infty}{\partial(t' T)} \pm \frac{\partial(b_{1,2} \cdot E' E_\infty \cdot n'_{1,2} n_\infty)}{\partial(z' l_1)} - \frac{\partial}{\partial(z' l_1)} \left( D_1 \cdot z' l_1 \cdot \frac{\partial(n'_{1,2} n_\infty)}{\partial(z' l_1)} \right) + \frac{\partial}{\partial(z' l_1)} (\nu \cdot n'_{1,2} n_\infty) = q(z) - \alpha n_1 \cdot n_2 \cdot n_\infty, \\ \frac{\partial(E' E_\infty)}{\partial(z' l_1)} = \frac{e}{\varepsilon_0} (n'_1 n_\infty - n'_2 n_\infty). \end{cases} \quad (8)$$

Продолжив преобразования и последовательно учитывая формулы  $n_\infty = \sqrt{\frac{q_\infty}{\alpha}} \Rightarrow n_\infty^2 = \frac{q_\infty}{\alpha}$ ;

$\tau = 1/\sqrt{q_\infty \alpha}$ ;  $l_1 = D_1 \cdot \tau$ , систему (8) приведём к виду



$$\begin{cases} \frac{\tau}{T} \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial t'} \pm \frac{b_{1,2} E_{\infty}}{D_1} \frac{\partial}{\partial z'} (n'_{1,2} \cdot E') - \frac{\partial}{\partial z'} \left( z' \cdot \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z'} \right) + \frac{\nu}{D_1} \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z'} = \frac{q}{q_{\infty}} - n_1 \cdot n_2, \\ \frac{\partial E'}{\partial z'} = \frac{e \cdot n_{\infty} l_1}{\varepsilon_0 E_{\infty}} (n'_1 - n'_2). \end{cases} \quad (9)$$

Введем в (9) следующие безразмерные параметры (критерии подобия):

$$\xi_{1,2} = \frac{|b_{1,2}| \cdot E_{\infty} \cdot \tau}{l_1} = \frac{|b_{1,2}| E_{\infty}}{D_1}, \quad \chi = \frac{\nu}{D_1}, \quad \gamma = \frac{en_{\infty} l_1}{\varepsilon_0 E_{\infty}} = \frac{en_{\infty} D_1 \tau}{\varepsilon_0 E_{\infty}}. \quad (10)$$

Получаем окончательную запись системы (1) в безразмерной форме:

$$\begin{cases} \frac{\tau}{T} \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial t'} \pm \xi_{1,2} \frac{\partial}{\partial z'} (n'_{1,2} \cdot E') - \frac{\partial}{\partial z'} \left( z' \cdot \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z'} \right) + \chi \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z'} = \frac{q}{q_{\infty}} - n_1 \cdot n_2, \\ \frac{\partial E'}{\partial z'} = \gamma (n'_1 - n'_2). \end{cases} \quad (11)$$

Оценки параметров для толщины электродного слоя и коэффициента турбулентной диффузии соответственно равны:  $l_1 = 2,5 \div 25$  м и  $D_1 = 0,01 \div 0,1$  м · с<sup>-1</sup>.

Система уравнений (11) характеризуется тремя безразмерными параметрами (10). Связь между значениями критериев подобия, параметрами турбулентного и конвективного переносов и типами электродного эффекта приведена в таблице.

Такая информация позволяет корректно выбрать вид математической модели, соответствующий рассматриваемым условиям в атмосфере, а также полезна при решении задачи об оценке мощности локальных токовых генераторов в приземном слое.

#### Соответствие критериев подобия параметрам электродного эффекта / Correspondence of similarity criteria with the parameters of the electrode effect

$\xi_{1,2}$	$\chi$	$D_1$	$\nu_0$	Модель
$\geq 1$	0	$\rightarrow 0$	0	Классический электродный эффект
$< 1$	$\approx 1$	$\approx 0,1$	$\rightarrow 0$	Турбулентный электродный эффект
$\ll 1$	$\ll 1$	$\approx 0,1$	$\rightarrow 0$	Приближение сильного турбулентного перемешивания
$\ll 1$	$\approx 1$	$\approx 0,1$	$\approx 0,1$	Конвективно-турбулентное приближение
$< 1$	$> 1$	$\rightarrow 0$	$\approx 0,1$	Конвективное приближение

Ионизационно-рекомбинационные уравнения в полученной системе (23) являются нестационарными. Следует учесть, что характерное время протекания метеорологических процессов  $T$  составляет несколько часов, тогда как время электрической релаксации  $\tau = 250$  с ( $q = 10^7$  м<sup>3</sup>с<sup>-1</sup> и  $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12}$  м<sup>3</sup>с<sup>-1</sup>). Таким образом, можно сделать вывод, что для многих случаев моделирования стационарное приближение является правомерным.

#### Расщепление по физическим процессам

Решению задач стационарного электродного эффекта посвящено значительное количество работ, обобщённых в [3], однако ряд задач, связанных с исследованием суточной динамики электрического поля приземного слоя, требует нестационарной постановки [20–22].

Поэтому дальнейшие исследования проведем для общего вида уравнений (11) с целью обоснования для максимально широкого класса математических моделей. Для коэффициента турбулентной диффузии по-прежнему будем рассматривать стационарное представление (5) для случая устойчивой стратификации, а скорость турбулентной диффузии будем считать функцией высоты:  $\nu = \nu(z)$ .

Как видно из таблицы, присутствию турбулентных явлений в приземном слое соответствует условие

$$\xi_{1,2} < 1. \quad (12)$$

Выполнение условия (12) позволяет рассматривать величину  $\xi_{1,2}$  в качестве малого параметра и искать решение системы (11) в виде степенного ряда относительно  $\xi_{1,2}$ . Следуя [8], рассмотрим следующее представление для величин концентраций ионов:

$$n'_{1,2} = \sum_{i=0}^{\infty} \xi_{1,2}^i n'^i_{1,2}. \quad (13)$$

Подставив представление (13) в исходную систему уравнений, получим уравнения для нулевого и первого приближений искомого решения:

$$\xi_{1,2}^0 : \frac{\tau}{T} \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial t'} - \frac{\partial}{\partial z'} \left( z' \cdot \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z'} \right) + \chi \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z'} = \frac{q(z')}{q_{\infty}} - n_1^0 n_2^0, \quad (14)$$

$$\xi_1^1 : \frac{\tau}{T} \frac{\partial n_1^1}{\partial t'} - \frac{\partial}{\partial z'} \left( z' \cdot \frac{\partial n_1^1}{\partial z'} \right) + \frac{\partial}{\partial z'} (n_1^0 E') + \chi \frac{\partial n_1^1}{\partial z'} = - \left( n_1^0 n_2^1 \frac{\xi_2}{\xi_1} + n_2^0 n_1^1 \right),$$

$$\xi_2^1 : \frac{\tau}{T} \frac{\partial n_2^1}{\partial t'} - \frac{\partial}{\partial z'} \left( z' \cdot \frac{\partial n_2^1}{\partial z'} \right) - \frac{\partial}{\partial z'} (n_2^0 E') + \chi \frac{\partial n_2^1}{\partial z'} = - \left( n_1^0 n_2^1 + n_2^0 n_1^1 \frac{\xi_1}{\xi_2} \right), \quad (15)$$

$$\frac{dE'}{dz'} = \gamma [(\xi_1 n_1^1 - \xi_2 n_2^1) + (\xi_1^2 n_1^2 - \xi_2^2 n_2^2)]. \quad (16)$$

Исходная система уравнений электродного эффекта (1) расщепляется на систему ионизационно-рекомбинационных уравнений для нулевого приближения (14) и систему линейных уравнений по электрическому полю (15), (16). При этом уравнения (14) нулевого приближения описывают зависимость концентраций аэроионов от процессов турбулентного и конвективного обмена, а также ионизации и рекомбинации, не зависящие от напряженности электрического поля.

С учетом выполненных выше оценок для времени протекания гидродинамических и электрических процессов, далее рассмотрим стационарный вариант системы уравнений (14)–(16). Исходя из данных о соотношении величин критериев подобия и параметров электродного слоя, представленных в таблице, получим структуру модельных уравнений для разных видов электродного эффекта в приземном слое.

*Приближение интенсивного турбулентного перемешивания.* Данный случай соответствует следующему соотношению критериев подобия:  $\xi_{1,2} \ll 1$ ,  $\chi \ll 1$ . Выполнение этих условий позволяет пренебречь слагаемым, содержащим величину  $\chi$  и соответствующим конвективному члену, в ионизационно-рекомбинационных уравнениях нулевого приближения (14). Аналогично можно поступить и в системе уравнений первого приближения (15), комбинируя которые с учетом уравнения (16) получим так называемое уравнение полного тока [20–22].

В результате система стационарных уравнений, описывающая электрические процессы в горизонтально-однородном приземном слое, расщепляется по физическим процессам и принимает вид

$$- \frac{d}{dz} \left( D_1 \cdot z \frac{dn_{1,2}}{dz} \right) = q - \alpha n_1 n_2, \quad - \varepsilon_0 D_1 \cdot z \frac{d^2 E}{dz^2} + \lambda(z) E = j_0, \quad \lambda(z) = e(b_1 n_1 + |b_2| n_2), \quad (17)$$

где  $j_0$  – плотность полного электрического тока в приземном слое;  $\lambda$  – электрическая проводимость приземного слоя.

Первое уравнение описывает турбулентную диффузию аэроионов без действия электрических сил, второе – распределение электрического поля с заданным профилем электрической проводимости.

Система (17) дополняется граничными условиями вида

$$n_{1,2}(z = z_0) = 0, \quad n_{1,2}(z \rightarrow \infty) = \sqrt{q_{\infty}/\alpha}, \quad \frac{dE}{dz} \Big|_{z=z_0} = 0, \quad E(z \rightarrow \infty) = \frac{j_0}{\lambda_{\infty}}. \quad (18)$$

*Конвективно-турбулентное приближение.* Данный случай соответствует соотношению критериев подобия  $\xi_{1,2} \ll 1$ ,  $\chi \approx 1$ . В этом случае система уравнений электродного эффекта в размерном виде будет иметь вид

$$-\frac{d}{dz} \left( D_1 \cdot z \frac{dn_{1,2}}{dz} - \nu(z) \cdot n_{1,2} \right) = q - \alpha n_1 n_2, \quad -\varepsilon_0 D_1 \cdot z \frac{d^2 E}{dz^2} + \varepsilon_0 \nu(z) \frac{dE}{dz} + \lambda(z) E = j_0. \quad (19)$$

Профиль электрической проводимости и граничные условия для системы (19) аналогичны формулам (17) и (18).

*Конвективное приближение.* Данный случай соответствует следующему соотношению критериев подобия:  $\xi_{1,2} > 1$ ,  $\chi < 1$ . Выполнение этих условий позволяет пренебречь слагаемым, содержащим турбулентный член в ионизационно-рекомбинационных уравнениях нулевого приближения (14). Аналогично поступаем в системе уравнений первого приближения (15), комбинируя которые с учетом уравнения (16), также получаем уравнение полного тока. В результате имеем систему уравнений электродного эффекта для случая конвективного приближения в размерном виде:

$$\frac{d}{dz} (\nu(z) n_{1,2}) = q - \alpha n_1 n_2, \quad \varepsilon_0 \nu(z) \frac{dE}{dz} + \lambda(z) E = j_0. \quad (20)$$

Профиль электрической проводимости и граничные условия в системе (20) сохраняют вид (18). Первое уравнение описывает конвективный перенос аэроионов, второе – распределение напряженности электрического поля с расчетным профилем электрической проводимости.

### Заключение

В работе проведен анализ математических моделей электродного эффекта с разным набором физических условий. Получены оценки параметров электродного слоя в зависимости от метеорологических характеристик атмосферы, которые могут служить критериями верификации при моделировании задач электродинамики приземного слоя. Для случая нейтральной стратификации атмосферы реализована процедура приведения системы уравнений электродного эффекта к безразмерному виду. Даны оценки критериев подобия. Обоснованы переходы и построены модели классического, турбулентного, конвективно-турбулентного электродного слоя, а также путем расщепления по физическим процессам получены приближения для случаев интенсивного турбулентного перемешивания и сильного конвективного переноса в атмосфере.

### Список источников

1. Морозов В.Н. Атмосферное электричество // Атмосфера: справочник (справочные данные, модели). Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 394–408.
2. Куповых Г.В. Электричество приземного слоя // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 1995. № 4. С. 32–34.
3. Куповых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. 123 с.
4. Куповых Г.В., Морозов В.Н. Нестационарные электрические процессы в приземном слое атмосферы // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2001. № 4. С. 82–85.
5. Куповых Г.В., Морозов В.Н. Электродный эффект в приземном слое атмосферы (постановка задачи) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2003. Прил. № 1. С. 38–40.
6. Куповых Г.В., Морозов В.Н. Классический (нетурбулентный) электродный эффект в приземном слое // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2003. № 2. С. 43–46.
7. Куповых Г.В., Морозов В.Н. Турбулентный электродный эффект в приземном слое // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2003. Прил. № 3. С. 55–62.
8. Куповых Г.В., Морозов В.Н. Электродный эффект в приближении сильного турбулентного перемешивания // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2003. № 3. С. 51–53.
9. Куповых Г.В., Морозов В.Н. Структура электродного слоя вблизи поверхности земли в приближении сильного турбулентного перемешивания // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2003. № 4. С. 44–48.
10. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.
11. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. 423 с.
12. Найфэ А.Х. Введение в методы возмущений / пер. с англ. И.Е. Зино, Э.А. Троппа; под ред. Р.Г. Баранцева. М.: Мир, 1984. 535 с.
13. Болдырев А.С., Редин А.А., Куповых Г.В., Морозов В.Н. Электродинамическая модель конвективно-неустойчивого атмосферного приземного слоя // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2010. Спецвыпуск: Физика атмосферы. С. 23–28.

14. Boldyrev A., Kupovykh G., Redin A. Surface Layer Electrodynamic Structure According to the Meteorological State // Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Electronic Computer Technology. May 7-10, 2010. Kuala Lumpur, Malaysia, 2010. P. 247–251.
15. Kupovykh G., Redin A., Boldyreff A. Modeling of ionization-recombination processes in the atmospheric surface layer // J. of Electrostatics. 2013. Vol. 71. P. 305–311.
16. Редин А.А., Куповых Г.В., Болдырев А.С. Электродинамическая модель конвективно-турбулентного приземного слоя атмосферы // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 11–12. С. 820–828.
17. Манин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Л.: Наука, 1965. Т. 1. 639 с.
18. Орленко Л.П. Строение планетарного пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 270 с.
19. Морозов В.Н. О физико-математическом моделировании электрических процессов в нижних слоях атмосферы // Тр. ГГО. 1984. Вып. 484. С. 84–92.
20. Kupovykh G., Klovo A., Timoshenko D. The Atmospheric Electric Field Variations in The Surface Layer // Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP). July 1-6, 2019. IEEE, 2019. P. 580–583.
21. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Kudrinskaya T.V., Klovo A.G., Modeling of the atmospheric electric field local variations in the turbulent surface layer // J. of Physics: IOP Conference Series. VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity. 2020. Vol. 1604. Art. 012003. 5 p.
22. Аджиев А.Х., Клово А.Г., Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Тимошенко Д.В. Суточные вариации электрического поля в приземном слое атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 4. С. 452–461.

## References

1. Morozov V.N. Atmospheric electricity. *Atmosphere. Directory (reference data, models)*. Leningrad: Hidrometeoizdat Publ.; 1991:394-408. (In Russ.).
2. Kupovykh G.V. Electricity of the ground layer. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 1995;(4):32-34. (In Russ.).
3. Kupovykh G.V., Morozov V.N., Shvarts Ya.M. *Theory of the electrode effect in the atmosphere*. Taganrog: Taganrog State Radio Engineering University Publishing House; 1998. 123 p. (In Russ.).
4. Kupovykh G.V., Morozov V.N. Non-stationary electrical processes in the surface layer of the atmosphere. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2001;(4):82-85. (In Russ.).
5. Kupovykh G.V., Morozov V.N. Electrode effect in the surface layer of the atmosphere (statement of the problem). *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2003;(S1):38-40. (In Russ.).
6. Kupovykh G.V., Morozov V.N. Classical (non-turbulent) electrode effect in the surface layer. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2003;(2):43-46. (In Russ.).
7. Kupovykh G.V., Morozov V.N. Turbulent electrode effect in the surface layer. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2003;(S3):55-62. (In Russ.).
8. Kupovykh G.V., Morozov V.N. Electrode effect in the approximation of strong turbulent mixing. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2003;(3):51-53. (In Russ.).
9. Kupovykh G.V., Morozov V.N. The structure of the electrode layer near the Earth's surface in the approximation of strong turbulent mixing. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2003;(4):44-48. (In Russ.).
10. Gukhman A. A. *Introduction to the theory of similarity*. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1973. 296 p. (In Russ.).
11. Sedov L.I. *Methods of similarity and dimension in mechanics*. Moscow: Nauka Publ.; 1987. 423 p. (In Russ.).
12. Nayfe A.H. *Introduction to perturbation methods*. Moscow: Mir Publ.; 1984. 535 p. (In Russ.).
13. Boldyrev A.S., Redin A.A., Kupovykh G.V., Morozov V.N. Electrodynamic model of a convective-unstable atmospheric surface layer. News of higher educational institutions. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science. Special issue. Atmospheric Physics*. 2010:23-28. (In Russ.).
14. Boldyrev A., Kupovykh G., Redin A. Surface Layer Electrodynamic Structure According to the Meteorological State. *Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Electronic Computer Technology*. May 7-10, 2010. Kuala Lumpur, Malaysia, 2010:247-251.
15. Kupovykh G., Redin A., Boldyreff A. Modeling of ionization-recombination processes in the atmospheric surface layer. *Journal of Electrostatics*. 2013;71:305-311.

16. Redin A.A., Kupovykh G.V., Boldyrev A.S. Electrodynamical model of the convective-turbulent surface layer of the atmosphere. *Izv. vuzov. Radiofizika = Proceedings of Universities. Radiophysics*. 2013;56(11-12):820-828. (In Russ.).
17. Monin A.S., Yaglom A.M. *Statistical fluid mechanics*. Leningrad: Nauka Publ.; 1965;1. 639 p. (In Russ.).
18. Orlenko L. R. *Structure of the planetary boundary layer of the atmosphere*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1979. 270 p. (In Russ.).
19. Morozov V.N. On physical and mathematical modeling of electrical processes in the lower layers of the atmosphere. *Tr. GGO = Proceedings of the Main Geophysical Observatory*. 1984;(484):84-92. (In Russ.).
20. Kupovykh G., Klovo A., Timoshenko D. The Atmospheric Electric Field Variations in The Surface Layer. *Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP)*. July 1-6, 2019. IEEE, 2019:580-583.
21. Kupovykh G.V., Timoshenko D.V., Kudrinskaya T.V., Klovo A. G., Modeling of the atmospheric electric field local variations in the turbulent surface layer. *Journal of Physics: IOP Conference Series. VIII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity*. 2020;1604:012003. 5 p.
22. Adzhiev A.Kh., Klovo A.G., Kudrinskaya T.V., Kupovykh G.V., Timoshenko D.V. Daily variations of the electric field in the surface layer of the atmosphere. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Atmospheric and Ocean Physics*. 2021;57(4):452-461. (In Russ.).

#### **Информация об авторах**

*Д.В. Тимошенко – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра физико-математических основ инженерного образования, Инженерно-технологическая академия.*  
*Г.В. Куповых – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физико-математических основ инженерного образования, Инженерно-технологическая академия.*  
*О.В. Белоусова – ассистент, кафедра физико-математических основ инженерного образования, Инженерно-технологическая академия.*

#### **Information about the authors**

*D.V. Timoshenko – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Physics and Mathematics Fundamentals of Engineering, Academy of Engineering and Technology.*  
*G.V. Kupovykh – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Department of Physics and Mathematics Fundamentals of Engineering, Academy of Engineering and Technology.*  
*O.V. Belousova – Assistant, Department of Physics and Mathematics Fundamentals of Engineering, Academy of Engineering and Technology.*

*Статья поступила в редакцию 09.07.2024; одобрена после рецензирования 01.09.2024; принята к публикации 16.10.2024.*  
*The article was submitted 09.07.2024; approved after reviewing 01.09.2024; accepted for publication 16.10.2024.*

Научная статья

УДК 504.064.+543.31

doi: 10.18522/1026-2237-2024-4-2-113-126

## ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕРА ПЕЛЁНКИНО (РОСТОВСКАЯ ОБЛАСТЬ) ПО МАТЕРИАЛАМ РЕТРОСПЕКТИВНЫХ И СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ю.А. Федоров<sup>1✉</sup>, А.А. Зимовец<sup>2</sup>, И.В. Доценко<sup>3</sup>, Д.Н. Гарькуша<sup>4</sup>,  
А.В. Михайленко<sup>6</sup>, Н.В. Доценко<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>1</sup> fedorov@sfedu.ru ✉, ORCID: 0000-0001-7411-3030

<sup>2</sup> aazimovec@sfedu.ru, ORCID: 0000-0002-6552-4978

<sup>3</sup> dotsenko@sfedu.ru, ORCID: 0000-0001-7423-4123

<sup>4</sup> gardim@sfedu.ru, ORCID: 0000-0001-5026-2103

<sup>5</sup> avmihaylenko@sfedu.ru, ORCID: 0000-0003-1156-770X

<sup>6</sup> nikdocenko@sfedu.ru, ORCID: 0009-0002-9514-0788

**Аннотация.** Описана физико-географическая характеристика и геологическое строение озера Пелёнкино. В ходе анализа результатов космической съемки установлено, что площадь, длина и ширина водной поверхности водоема, а также длина береговой линии озера значительно изменяются как по годам, так и по сезонам. Высказано предположение, что на площадь водной поверхности и химический состав воды оказывают влияние как количество выпавших атмосферных осадков, так и сгонно-нагонные явления в Азовском море. Химический состав воды и грязевого раствора склонен к накоплению во времени эквивалентного количества  $Mg^{2+}$  относительно  $Ca^{2+}$ , что может быть обусловлено, наряду с воздействием гидрологического фактора, изменением физико-химического равновесия в системе вода – грязь. По описанию кернов скважин отложения примерно до глубины 15–35 см представлены илом (грязью), который сначала переходит в стальную-серую глину полужидкой консистенции, а затем к подошве слоя в более плотную глину. Физико-химические показатели грязей оз. Пелёнкино позволяют отнести их к континентальным, иловым, минеральным, среднеминерализованным, слабощелочным, слабосульфидным пелоидам. По комплексу параметров (рН, Eh,  $CH_4$ ,  $S_{сульфид}$ ) обнаружен литологический контроль, который проявляется в их синхронном изменении при переходе от илов к коренным отложениям ложа водоема – стальная-серым глинам. Содержание валовой ртути в грязях и коренных отложениях оз. Пелёнкино не превышает порога низкого диапазона воздействия (ERL), равного 0,15 мкг/г сухого веса. Донные отложения рек бассейна оз. Пелёнкино и сами его грязи находятся под антропогенным воздействием, которое прежде всего формирует низкий уровень значений титра перфрингенса и его вирулентность. Использование грязей озера в терапевтических целях без предварительной подготовки не рекомендуется.

**Ключевые слова:** донные отложения, грязи, вода, озеро Пелёнкино, метан, сульфиды, ртуть, санитарно-экологическое состояние

**Для цитирования:** Федоров Ю.А., Зимовец А.А., Доценко И.В., Гарькуша Д.Н., Михайленко А.В., Доценко Н.В. Эколого-географическая характеристика озера Пелёнкино (Ростовская область) по материалам ретроспективных и современных исследований // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 4-2. С. 113–126.

**Благодарности:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00038, <https://rscf.ru/project/24-17-00038/>, в Южном федеральном университете.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

## ECOLOGICAL AND GEOGRAPHICAL CHARACTERISTICS OF THE LAKE PELENKINO (ROSTOV REGION) BASED ON THE MATERIALS OF RETROSPECTIVE AND MODERN RESEARCH

**Yu.A. Fedorov<sup>1</sup>**, **A.A. Zimovets<sup>2</sup>**, **I.V. Dotsenko<sup>3</sup>**, **D.N. Gar'kusha<sup>4</sup>**, **A.V. Mikhailenko<sup>5</sup>**, **N.V. Dotsenko<sup>6</sup>**  
<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>1</sup> fedorov@sfedu.ru, ORCID: 0000-0001-7411-3030

<sup>2</sup> aazimovec@sfedu.ru, ORCID: 0000-0002-6552-4978

<sup>3</sup> dotsenko@sfedu.ru, ORCID: 0000-0001-7423-4123

<sup>4</sup> gardim@sfedu.ru, ORCID: 0000-0001-5026-2103

<sup>5</sup> avmihaylenko@sfedu.ru, ORCID: 0000-0003-1156-770X

<sup>6</sup> nikdocenko@sfedu.ru, ORCID: 0009-0002-9514-0788

**Abstract.** The physical and geographical characteristics and geological structure of Lake Pelenkino are described. During the analysis of the results of the satellite survey, it was found that the area, length and width of the water surface of the reservoir, as well as the length of the lake's shoreline, the elongation index, and the compactness of the lake vary significantly both by year and by season. It has been suggested that the water surface area and the chemical composition of the water are influenced by both the amount of precipitation and wind-driven effects in the Sea of Azov. The chemical composition of water and mud solution is prone to accumulation of an equivalent amount of  $Mg^{2+}$  relative to  $Ca^{2+}$  over time, which may be due, along with the influence of a hydrological factor, to a change in the physical and chemical equilibrium in the water-mud system. According to the description of the well cores, deposits up to a depth of about 15-35 cm are represented by silt (mud), which first turns into steel-gray clay of a semi-liquid consistency, and then to the bottom of the layer into denser clay. The physical and chemical parameters of the mud of Lake Pelenkino allow us to classify them as continental, silt, mineral, medium mineralized, slightly alkaline, slightly sulfide peloids. Lithological control was found for a set of parameters (pH, Eh,  $CH_4$ ,  $S_{sulfide}$ ), which manifests itself in their synchronous change during the transition from silts to the bedrock sediments of the reservoir bed – steel-gray clays. The content of gross mercury in the mud and sediments of the lake does not exceed the threshold of the Low range of Exposure (EQL), equal to 0.15 micrograms/g of dry weight. The bottom sediments of the rivers of the Pelenkino Lake basin and its mud themselves are under anthropogenic influence, which primarily forms a low level of perfringence titer values and its virulence. The use of lake mud for therapeutic purposes without prior preparation is not recommended.

**Keywords:** bottom sediments, mud, water, Lake Pelenkino, methane, sulfides, mercury, sanitary and environmental condition

**For citation:** Fedorov Yu.A., Zimovets A.A., Dotsenko I.V., Gar'kusha D.N., Mikhailenko A.V., Dotsenko N.V. Ecological and Geographical Characteristics of the Lake Pelenkino (Rostov Region) Based on the Materials of Retrospective and Modern Research. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(4-2):113-126. (In Russ.).

**Acknowledgments:** the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-17-00038, <https://rscf.ru/project/24-17-00038/>, at the Southern Federal University.

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

### Введение

История начала использования грязей оз. Пелёнкино (Соленое) в качестве лечебных (пелоидов) восходит к концу XVIII в. Примерно с этого времени жители окрестных поселений стали неорганизованно применять их для лечебных процедур. В 1925 г. после исследований состава пелоидов здесь начал функционировать санаторий «Соленое озеро», который просуществовал примерно до окончания Великой Отечественной войны. Однако поток людей, желающих принять грязевые процедуры, не иссякал, что, в свою очередь, привело к ухудшению санитарной обстановки. Стоит отметить, что вплоть до настоящего времени проводились лишь эпизодические исследования гидролого-гидрохимического режима и экологического состояния водоёма [1–6]. В связи с этим воз-



ника необходимость изучения хронологии и анализа ранее полученных результатов, а также проведения современных эколого-географических исследований. Ниже более подробно остановимся на описании наиболее значимых результатов.

По описанию 1927 г. [1] озеро Пелёнкино занимало небольшую площадь – около 2 га. Что касается строения дна долины в районе озера, то здесь распространены главным образом две низкие террасы: пойменная – на высоте 1 м над уровнем р. Кагальник, а более высокая, надпойменная – до 2 м. Берега довольно крутые, но возвышаются над водой не более чем на 1 м. Терраса вокруг озера местами имеет некоторый уклон к нему.

Дно озера было покрыто илом чёрного цвета с сероводородным запахом. Его внешние признаки характерны для сернистого ила лечебных озёр. Глубина в зависимости от участка озера изменялась от 30 см до 1 м, в среднем – около 0,75 м. Вода (рапа) несколько опалесцировала [2]. Она была окрашена в слегка желтоватый цвет, постороннего запаха не имела.

По описанию, выполненному в начале 70-х гг. XX в. [3], оз. Пелёнкино представляет собой пойменный старичный водоем, образовавшийся на месте русла реки. Длина была около 500 м, максимальная ширина 40 м, глубина не превышала 0,8 м.

Озеро расположено в долине р. Кагальник, берега которой в основании сложены палюдиновыми песками и глинами, а вверху – лёссовидным суглинком. Верхние слои представлены главным образом чёрным почвенным слоем, у уреза воды поросли камышом. Ниже почвенного слоя залегает зеленовато-серая иловатая глина с большим количеством включений гипса, делающих эту глину водопроницаемой. Коренные известковые неогеновые образования, которые широко распространены по северной стороне долины р. Дон, в районе г. Азова и низовьев р. Кагальник отсутствуют, будучи размытыми в постпонтическое время. При этом древняя выемка была занята палюдиновыми образованиями и вышележащим суглинком, в которых, в свою очередь, прорыл себе русло Кагальник [1, 2].

В процессе рекогносцировочной разведки в 1972 г. [3] на озере было пробурено 10 зондировочных скважин. Как показало бурение (рис. 1), донные отложения (ДО) представлены темно-серыми илами, несколько запесоченными у берегов. Илы были пластичными, мазеподобными, разжиженными в верхней части и обладали запахом сероводорода. Их мощность в центральных частях водоема достигала 0,7 м.

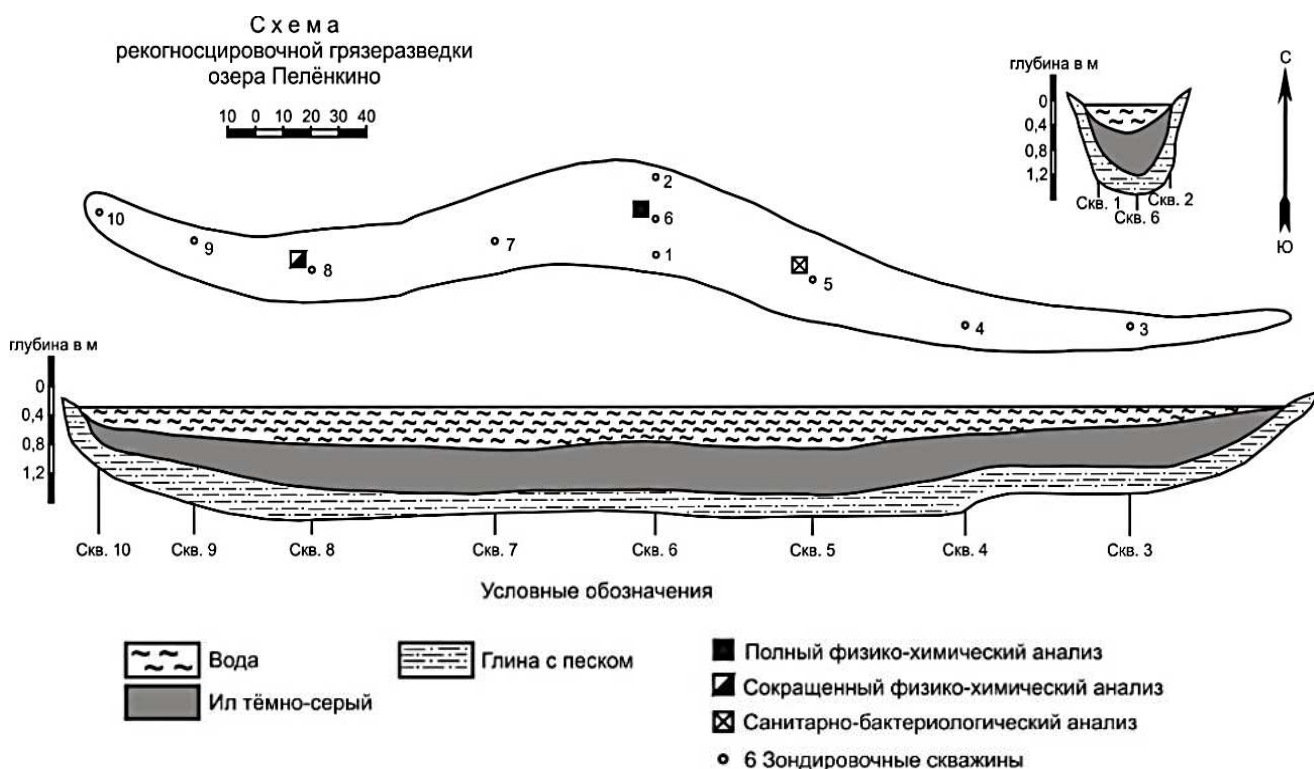


Рис. 1. Схема рекогносцировочной геологической разведки оз. Пелёнкино (1972 г.) [3]  
 / Fig.1. The scheme of reconnaissance geological exploration of Lake Pelenkino (1972) [3]

Сопоставление данных зондировочного бурения с результатами детальной разведки озера, выполненной М.Н. Гончаровым в 1958 г. [3], показывает, что в целом существенных изменений в строении залежи не произошло. Её средняя мощность составила 0,4 м, максимальная – 0,8 м, что весьма близко к данным, полученным в 1972 г. Эксплуатационные запасы лечебной грязи в оз. Пелёнкино, впервые определенные в 1958 г. М.Н. Гончаровым, составили 3,5 тыс. м<sup>3</sup>. Рекогносцировочное обследование грязевой залежи в 1972 г. показало, что запасы лечебных грязей в месторождении с 1958 г. существенно не изменились [3]. Обследование озера Пелёнкино в 2006–2024 гг. привело нас к выводу, что запасы пелоидов близки к определённым ранее другими исследователями.

### Материалы и методы исследования



Рис. 2. Схема станций отбора проб:  
1 – поверхностные воды; 2 – подземные воды  
/ Fig. 2. Scheme of sampling stations:  
1 – surface water; 2 – groundwater

В основу исследования положены данные, приведенные в литературе, а также полученные авторами в ходе экспедиционных работ. В 2006 г. на двух станциях (1а и 1б на рис. 2) в пределах озера были отобраны пробы воды и грязей для определения в них содержания метана (СН<sub>4</sub>) и сульфидной серы (S<sub>сульфид</sub>). Санитарно-бактериологическое состояние грязей было проанализировано на 5 станциях наблюдений. В качестве основных материалов для изучения изменений площади оз. Пелёнкино использовались данные проекта Google Earth Pro за период с 2001 по 2021 г.

Отбор, транспортировка, хранение проб и последующее определение метана и сульфидной серы проведены согласно аттестованным методикам [7–9]. Измерение СН<sub>4</sub> выполнено на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» с дозатором равновесного пара на пламенно-ионизационном детекторе. Измерение массовой доли S<sub>сульфид</sub> основано на переводе сульфидов ДО в сероводород действием соляной кислоты, последующей отдувке сероводо-

рода азотом особой чистоты в раствор гидроксида натрия и его определении фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамином [8]. При этом в общее содержание S<sub>сульфид</sub> входят как растворенные в иловой воде свободный сероводород (сумма недиссоциированных молекул H<sub>2</sub>S, ионов гидросульфида HS<sup>-</sup> и ионов сульфида S<sup>2-</sup>) и сульфиды щелочных металлов, так и сульфиды, содержащиеся в твердой фракции, которые представляют собой сульфиды железа и тяжелых металлов, не растворимые в воде, но растворимые в кислоте.

Величины Eh и pH измерены с помощью электродов портативного pH-метра-иономера «Экотест 2000» сразу после отбора проб. Минерализация воды и химический состав определены по стандартным методикам [10].

Анализ химического состава грязевого раствора в 1927–1928 и 2013 гг. осуществлялись в Гидрохимическом институте (ГХИ). Отметим, что пробы грязей в начале XX в. отбирались непосредственно сотрудниками ГХИ [1, 2], а пробоотбор воды в 2001 г. и ДО в 2006 г. – РГУ (ЮФУ) в экспедициях, организованных руководителем Ведущей научной школы проф. Ю.А. Федоровым. Определение содержания метана (СН<sub>4</sub>) и сульфидной серы (S<sub>сульфид</sub>) выполнялось с.н.с. Н.С. Тамбиевой, значений Eh, pH и описание ДО – авторами настоящего сообщения, валового содержания ртути проводилось методом атомной абсорбции в холодном паре в ГХИ Росгидромета [11] (аналитик А.М. Аниканов). Количественный учет сульфитредуцирующих кластридий в ДО проводили аналитики к.б.н. М.А. Морозова и к.г.н. Р.Г. Трубник по методике [12]. Авторы выражают им глубокую благодарность.

## Результаты исследования и их обсуждение

*Морфометрическая характеристика чаши озера.* Сегодня координаты расположения озера следующие с.ш./в.д.: 47°0'26.81"/39°27'48.90". Данные по площади, длине и ширине (максимальная и средняя) водной поверхности, а также длины береговой линии озера представлены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

**Основные морфометрические характеристики озера Пелёнкино за период с 2001 по 2021 г. (составлено по данным космических снимков в Google Earth Pro) / The main morphometric characteristics of Lake Pelenkino for the period from 2001 to 2021 (compiled from satellite images using the Google Earth Pro)**

№	Дата съемки	Площадь озера, км <sup>2</sup>	Длина озера, км	Ширина озера, км		Длина береговой линии, км
				максимальная	средняя	
1	21.12.2021	0,0172	0,74	0,05	0,01	1,64
2	21.11.2019	0,0070	0,62	0,03	0,01	1,40
3	29.06.2018	0,0134	0,72	0,05	0,01	1,69
4	25.08.2017	0,0128	0,71	0,04	0,01	1,65
5	01.05.2017	0,0183	0,76	0,05	0,01	1,78
6	02.10.2014	0,0151	0,72	0,05	0,01	1,59
7	29.09.2014	0,0148	0,73	0,05	0,01	1,64
8	10.08.2014	0,0125	0,70	0,05	0,01	1,64
9	19.06.2014	0,0166	0,77	0,05	0,01	1,78
10	15.07.2011	0,0134	0,72	0,04	0,01	1,64
11	27.09.2006	0,0610	0,95	0,27	0,025	2,42
12	15.07.2001	0,0153	0,73	0,04	0,01	1,69

Наибольший интерес представляет изучение изменения площади водной поверхности озера, которая в период наблюдений значительно варьировалась – от 0,007 до 0,061 км<sup>2</sup> – при среднем значении 0,018 км<sup>2</sup> (табл. 1).

Следует отметить, что осень 2006 г., когда была выявлена наибольшая величина площади водной поверхности озера (0,0610 км<sup>2</sup>), на территории европейской части России была аномально влажной. В ряду наблюдений с 1887 г. она была второй после рекордного 1927 г.

Весной и осенью наблюдалось увеличение осадков (тренд осадков весной ... +1,4 мм/10 лет, осенью ... +0,9 мм/10 лет) [13]. Помимо этого, в ночь на 30 августа 2006 г. на восточное побережье Азовского моря обрушилась нагонная волна высотой 2 м, вызванная сильным ветром, скорость которого достигала 23 м/с, что привело к полному затоплению Должанской косы [14]. Наименьшая величина площади водного зеркала озера (0,007 км<sup>2</sup>) была выявлена в ноябре 2019 г. (табл. 1), когда в Таганрогском заливе Азовского моря наблюдался необычайно сильный сгон. Из-за высокой скорости ветра, достигающей 19–22 м/с, уровень моря за период штормовой ситуации в Таганрогском заливе в ночь с 21 на 22 ноября 2019 г. опускался ниже –220 ... –240 см относительно среднего уровня [15]. В осенний период 2019 г. наблюдался существенный дефицит атмосферных осадков в Южном федеральном округе (61 % от нормы осадков) [16]. В ходе исследований была выявлена сезонная динамика изменения величины площади водной поверхности озера: в период половодья площадь водного зеркала озера существенно увеличивалась, а в меженный период – снижалась (0,0125–0,0128 км<sup>2</sup>).

Выполнен расчет регрессионной зависимости между площадью озера и временем наблюдений с 2001 по 2021 г. Для объективности картины из расчетов были исключены экстремумы величин площади водной поверхности озера, определенные в сентябре 2006 г. (0,061 км<sup>2</sup>) и ноябре 2019 г. (0,007 км<sup>2</sup>). Отмечен слабый тренд увеличения площади водной поверхности озера за исследуемый период.

В ходе изучения архивных данных о состоянии погоды за последние 10 лет на метеостанции Маргаритово, расположенной на берегу Таганрогского залива, была также выявлена тенденция к слабому росту количества атмосферных осадков (рис. 3) во времени.

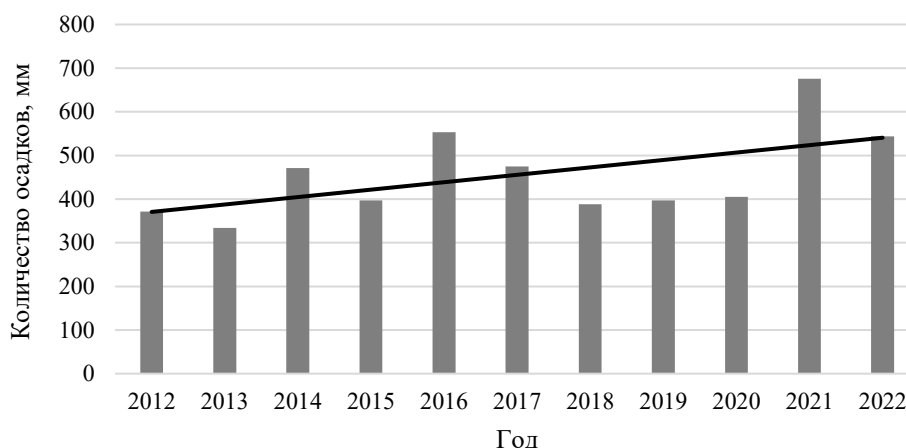


Рис. 3. Изменение количества атмосферных осадков на метеостанции Маргаритово (Ростовская область) за 2012–2022 гг. (составлено по данным [17]) / Fig. 3. Changes in the amount of precipitation at the Margaritovo weather station (Rostov region) for 2012-2022 (compiled according to [17])

Обращает на себя внимание синхронное возрастание площади озера и выпавшего количества атмосферных осадков за период наблюдений. Также связь между этими показателями подтверждают результаты корреляционной зависимости между ними (рис. 4).

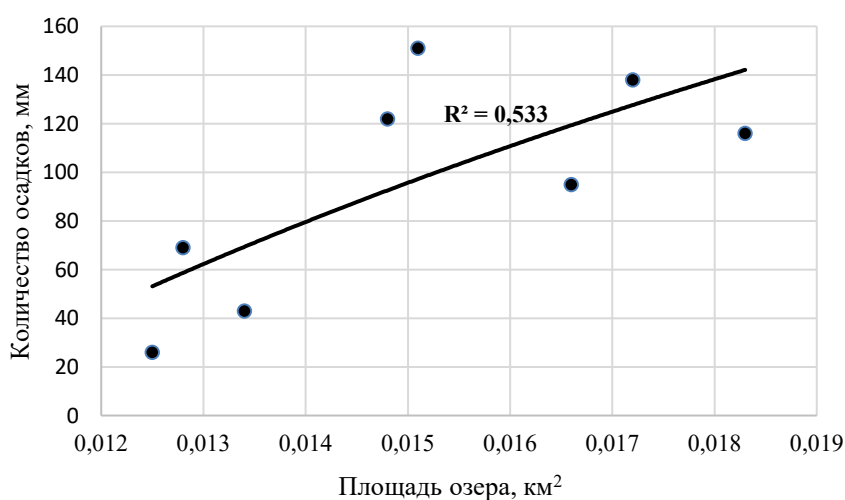


Рис. 4. Зависимость между количеством выпавших в период наблюдений осадков и площадью водной поверхности оз. Пелёнкино (Ростовская область) (составлено по данным космоснимков в Google Earth Pro и [17]) / Fig. 4. The relationship between the amount of precipitation during the observation period and the water surface area of Lake Pelenkino (Rostov region) (compiled from satellite images in Google Earth Pro and [17])

Помимо количества выпадающих на акваторию озера атмосферных осадков, на его морфологические параметры определенное влияние оказывают фазы водного режима р. Кагальник. Они, в свою очередь, находятся под воздействием ветровой активности и сопутствующих сгонно-нагонных явлений в Таганрогском заливе. Последние могут существенно влиять также на минерализацию и химический состав воды озера.

*Химический состав воды и грязевого раствора.* Вода (рапа) грязевых озер оказывает большое влияние на гидрохимический состав грязевого раствора и его лечебные свойства. Изучение минерализации и химического состава воды и грязевого раствора на протяжении длительной истории проводилось различными исследователями [1, 3, 4]. В данной работе анализируются сведения о химическом составе воды озера (данные авторов) и грязевого раствора в разные годы [1, 2, 4].

Рассмотрим изменение минерализации и химического состава водной вытяжки из грязей и воды оз. Пелёнкино в хронологическом порядке. П.А. Кашинский, К. Лисицын [1] отмечали, что данное озеро имеет рапу, содержащую относительно мало солей. Её состав весьма близок к составу солей рапы и грязи оз. Большой Тамбукан. Выполненный анализ показал, что минерализация грязевого раствора в 1927 и 1928 гг. была 34,2134 и 33,097 г/дм<sup>3</sup> соответственно. Нами были рассчитаны гидрoхимические коэффициенты ЭSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ЭM, ЭSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ЭCl и ЭCa<sup>2+</sup>/ЭMg<sup>2+</sup>, которые были равны 0,34 и 0,34; 2,92 и 2,92; 1,13 и 1,17. Это указывало на очевидное доминирование сульфатных ионов над хлоридными и ионов кальция над магнием.

По данным М.Н. Гончарова в 1958 г. [3], грязевый раствор имел гидрохимические показатели, представленные в табл. 2. Минерализация грязевого раствора, судя по формуле Курлова, составляла 19,0 г/дм<sup>3</sup>, содержание сульфатных ионов превалировало над таковым хлоридных, а ионов магния над кальциевыми. Значение pH грязи было слабощелочным.

Таблица 2 / Table 2

**Физико-химические показатели грязи оз. Пелёнкино, октябрь 1958 г. (по [3])**  
 / Physical and chemical parameters of the mud of Lake Pelenkino, October 1958 (according to [3])

Показатель	Значение
Влажность, %	54,6
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,4
$\frac{FeS}{H_2S}$ , %	$\frac{0,10}{0,04}$
Засоренность частицами >0,25 мм, %	1,4
Минерализация грязевого раствора, г/л	19,0
pH грязи	8,5
Формула химического состава грязевого раствора	$M_{19,0} \frac{SO_4 52 Cl 42 HCO_3 6}{(Na + K) 63 Mg 26 Ca 11}$

В 1972 г., по сведениям [3], общая минерализация грязевого раствора озера (по 3 скважинам) была выше, чем в 1958 г., и изменялась от 22,82 до 31,6 г/дм<sup>3</sup>, соотношение содержания сульфатных и хлоридных ионов (ЭSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ЭCl) было равно 1,11, сульфатных ионов к минерализации – 0,45, а класс и тип по О.А. Алекину [18] был S<sub>II</sub><sup>Mg</sup>. Содержание магния превалировало над таковым кальция.

Представленное в работе [4] значение минерализации было несколько выше значения, полученного ранее в [1]. Оно равнялось 37,794 г/дм<sup>3</sup>. Гидрохимические коэффициенты ЭSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ЭM, ЭSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ЭCl и ЭCa<sup>2+</sup>/ЭMg<sup>2+</sup> были, соответственно, равны 0,32, 2,13 и 0,89. Обратим внимание на два отличия: в 1927 и 1928 гг. отношение ЭSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ЭCl и ЭCa<sup>2+</sup>/ЭMg<sup>2+</sup> было выше, чем в 2013 г. В соответствии с классификацией О.А. Алекина [18] химический класс, тип и группа описываются в 1927 и 1928 гг. формулой S<sub>II</sub><sup>Na</sup>, а в 2013 г. – S<sub>II</sub><sup>Mg</sup>.

В 2001 г. во время проведения совместной экспедиции сотрудников РГУ и Донской устьевой станции минерализация воды озера составила 7,547 г/дм<sup>3</sup> (табл. 3). Предложенные и апробированные на примере оз. Большой Тамбукан и других грязевых озерах гидрохимические коэффициенты [19] для воды оз. Пелёнкино: ЭSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ЭM = 0,27 и ЭSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ЭCl = 1,44. Сульфаты и магний существенно превалировали в воде озера. Нами рассчитано, что по классификации О.А. Алекина вода оз. Пелёнкино относится к сульфатному классу, группе магния, типу второму (S<sub>II</sub><sup>Mg</sup>). Отметим, что вода р. Дон и его притоков имеет формулу S<sub>II</sub><sup>Ca</sup>. Интересно, что соотношения ЭSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ЭCl и ЭSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ЭM в рапе оз. Большой Тамбукан варьировались, соответственно, в диапазоне 1,61–2,32 и 0,29–0,35, т.е. были выше, чем в рапе оз. Пелёнкино. В то время как по О.А. Алекину химический класс, тип воды оз. Большой Тамбукан был S<sub>II</sub><sup>Na</sup>. Отношение ЭCa<sup>2+</sup>/ЭMg<sup>2+</sup> в воде оз. Пелёнкино равно 0,37. Таким образом, можно констатировать, что со времени отбора проб с 1927 по 2006–2013 гг. в химическом составе грязевого раствора и воды произошли изменения в сторону накопления в них ионов Mg<sup>2+</sup> относительно Ca<sup>2+</sup>. Возможно, это обусловлено усилением процесса осаждения карбоната и сульфата кальция в связи с изменением физико-химического равновесия в системе вода – грязь. Другой причиной могло быть обусловленное изменением климата возрастание влияния стонно-нагонных явлений и, как следствие, увеличение тесноты связи с водами Азовского моря, в котором, по данным [20, 21], содержание Mg<sup>2+</sup> превалирует над Ca<sup>2+</sup>.

Таблица 3 / Table 3

**Химический состав воды оз. Пелёнкино, г/дм<sup>3</sup> (моль/дм<sup>3</sup>)  
 / Chemical composition of Lake Pelenkino water, g/dm<sup>3</sup> (mol/dm<sup>3</sup>)**

Катионы		Анионы	
Ca <sup>2+</sup>	0,514 (25,7)	Cl <sup>-</sup>	1,659 (46,7)
Mg <sup>2+</sup>	0,832 (69,37)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	3,227 (67,23)
Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup>	0,675 (29,34)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,639 (10,48)
Сумма катионов	2,022 (124,41)	Сумма анионов	5,525 (124,41)
Минерализация	7,547 (248,82)		

*Газовый состав грязей.* Визуальное описание грязей, отобранных в 2006 г., содержание CH<sub>4</sub>, S<sub>сульфид</sub>, значения pH, Eh представлены в табл. 4. Содержание метана в поверхностном и придонном слоях воды было 67,9 и 63,2 мкл/дм<sup>3</sup> соответственно. Подобное относительно равномерное распределение содержания метана по разрезу водной толщи характерно для неглубоких водоемов [22]. По ретроспективным и современным данным оз. Пелёнкино следует отнести к эвтрофным водоемам.

Таблица 4 / Table 4

**Характеристика донных отложений, содержания CH<sub>4</sub>, S<sub>сульфид</sub>, значений pH, Eh [4–6]  
 / Characteristics of bottom sediments, contents of CH<sub>4</sub>, S<sub>Sulfide</sub>, values of pH and Eh [4–6]**

Колонка донных отложений	Горизонт, см	Визуальная характеристика отложений	pH	Eh, мВ	CH <sub>4</sub> , мкг/г вл. веса	S <sub>сульфид</sub> , мг/г вл. веса
1а	0–5	Ил темно-серый до черного жидкой консистенции, маслянистый, с резким запахом H <sub>2</sub> S	7,8	-89,7	0,07	1,30
	5–10				0,22	1,33
	10–15	Ил большей частью черного цвета жидкой и полужидкой консистенции, маслянистый с резким запахом H <sub>2</sub> S (грязь)	7,9	-63,7	0,49	1,71
	15–20		7,9	-63,0	0,22	0,75
	20–35	Глина темно-серая полужидкой консистенции с переходом на глубине 27,5 в стально-серую более плотную глину с запахом H <sub>2</sub> S, слабеющим от кровли к подошве слоя	7,7	-52,4	0,13	0,55
	35–45	Стально-серая плотная глина, пластичная со слабым запахом H <sub>2</sub> S	7,64	-31,3	0,04	0,10
	45–55	Стально-серая плотная глина со слабым запахом H <sub>2</sub> S и включениями растительности (тростника) твердой консистенции. Часть растительных остатков серовато-зеленого цвета, в то время как другая – коричневатого-бурого, что свидетельствует о различной степени разложения органического материала	7,19	+38,6	0,04	0,05
1б	0–5	Ил темно-серый до черного жидкой консистенции, маслянистый, с резким запахом H <sub>2</sub> S	8,2	-120,0	0,18	0,95
	5–10		8,1	-138,0	0,38	1,10
	10–15		7,9	-131,0	0,24	0,90

По описанию двух кернов отложения примерно до глубины 27,5 см представлены илом (грязью), который сначала переходит в стально-серую глину полужидкой консистенции, а затем к подошве слоя в более плотную. Значения pH по всем разрезам варьируются от 7,2 до 8,2 (в среднем 7,8), указывая на слабую щелочную реакцию. Наблюдается снижение значений pH с глубиной погружения

донных осадков. Значения Eh изменялись в диапазоне  $-138,0 \dots +38,6$  мВ (в среднем  $-72,3$  мВ). При этом наблюдается повышение окислительно-восстановительной обстановки с ростом глубины до положительного значения. На глубине 45 см проходит граница между отрицательными и положительными значениями Eh (ст. 1а). Подобное явление было обнаружено нами в донных осадках грязевого оз. Большой Тамбукан [23]. Содержание в донных осадках  $\text{CH}_4$  изменялось от 0,04 до 0,49 мг/г в.в. (в среднем 0,22 мг/г в.в.). Оно снижалось с глубиной погружения ДО. Самые низкие содержания  $\text{CH}_4$  обнаружены на глубине 45 см и более в стально-серых глинах. По всему разрезу колонок донных осадков (ст. 1а) ощущался слабый запах  $\text{H}_2\text{S}$ . Содержание  $\text{S}_{\text{сульфид}}$  по профилю ДО изменялось от 0,05 до 1,71 мг/г в.в. (в среднем 0,97 мг/г в.в.). Падение содержания  $\text{S}_{\text{сульфид}}$  проявляется, как и  $\text{CH}_4$ , на тех же глубинах. Таким образом, по комплексу параметров (рН, Eh,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{S}_{\text{сульфид}}$ ) обнаруживается литологический контроль, который проявляется в их синхронном изменении при переходе от илов (собственно грязей) к коренным отложениям ложа водоема – стально-серым глинам. Это служит подтверждением ранее сделанного вывода в работе [23], что литологический состав ДО наряду с содержанием органического вещества, значениями рН, Eh определяет направленность и темпы развития процессов образования  $\text{CH}_4$  и  $\text{S}_{\text{сульфид}}$ . В табл. 2 приведены сведения по содержанию отдельно свободного  $\text{H}_2\text{S}$  и FeS. Двухвалентное железо является кислоторастворимым сульфидом. Если следовать применяемой нами методике определения  $\text{S}_{\text{сульфид}}$  [8], то сумма  $\text{H}_2\text{S}$  и FeS будет соответствовать этому значению. Она будет равна 0,14 %, или 1,4 мг/г в.в., что хорошо согласуется с полученными нами величинами  $\text{S}_{\text{сульфид}}$  (табл. 4).

Физико-химические показатели темно-серых грязей оз. Пелёнкино (табл. 2, 4) позволяют отнести их к континентальным, иловым, минеральным (менее 10 % органических веществ), среднеминерализованным ( $15\text{--}35$  г/дм<sup>3</sup>), слабощелочным (7,0–9,0), слабосульфидным (0,01–0,15 %) пелоидам [24–26].

При обследовании территории, прилегающей к чаше озера, обнаружены стоянки автомобилей, а также кемпинг, где проживали туристы. В кустах – свалка мусора.

*Распределение валовой ртути.* В керне ДО озера было изучено содержание валовой ртути [5, 6]. Установлено, что концентрация варьировалась от 33 до 57 нг/г с.м. (в среднем 45,5 нг/г с.м.). На рис. 5 показано её изменение по вертикальному разрезу. В колонке (ст. 1а) концентрация изменялась от 33 до 55 нг/г, в среднем составила 42,2 нг/г. При этом отмечается незначительное увеличение содержания в верхних двух горизонтах (0–2 и 2–5 см). Максимальная концентрация характерна для горизонта 10–20 см, который сложен маслянистым илом черного цвета, с резким запахом сероводорода. Ниже отмечен перегиб в вертикальном распределении ртути. При прохождении порога на глубине 27,5 см наблюдается стабилизация содержания на уровне 35 нг/г. В целом концентрация металла по профилю уменьшается в 1,7 раза, минимальные значения отмечены на глубине >35 см.

Содержание ртути в керне колонки 1б варьировалось в пределах 40–57 нг/г (в среднем 48,8 нг/г). Характерно возрастание от поверхностного слоя к нижележащему. Как и в колонке 1а, максимум отмечается в слое осадков на глубине 10–15 см.

Обращает на себя внимание тот факт, что в колонках, отобранных в грязевом оз. Пелёнкино, пик концентраций ртути располагается на глубине 15 см, в то время как в осадках дельты р. Дон [6] максимум отмечался в горизонте 2,5–5 см.

С учётом скорости осадконакопления в озере, равной 8,0 мм/год [27], это соответствует 80-м гг. XX в. – пику расцвета антропогенной деятельности. Высказано предположение, что смещение максимума концентраций по глубине может быть связано с неорганизованным грязелечением, из-за которого вышележащие слои отложений разрушаются и взмучиваются, в результате чего возрастает их скважность. Это может способствовать проникновению ртути в более глубокие слои. Воспользовавшись стандартом Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) [28], определим, что содержание валовой ртути в грязях и коренных отложениях оз. Пелёнкино не превышает порога низкого диапазона воздействия (ERL), равного 0,15 мг/г сухого веса. Судя по распределению содержания валовой ртути по разрезу ДО, на ст. 1а, б кровля стально-серых глин на глубине около 27,5 см является геохимическим барьером, который препятствует миграции ртути на большую глубину. По данным обеих скважин в среднем на этой глубине содержание валовой ртути составило 37,5 нг/г, а в керне 1а здесь и ниже оно варьировалось от 33,0 до 35,0 нг/г. В среднем по двум скважинам содержание валовой ртути с глубины 27,5 см и ниже будет равняться 36,0 нг/г. Эта величина оказалась несколько выше «фонового» содержания валовой



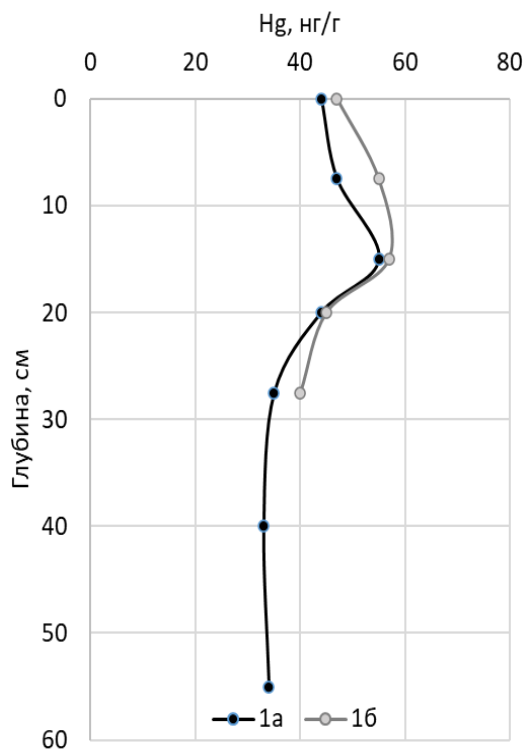


Рис. 5. Распределение валовой ртути в колонках ДО оз. Пелёнкино / Fig. 5. Distribution of gross mercury in the columns of the bottom sediments of the Lake Pelenkino

ртути (0,03 мкг/г сухого веса), установленного [29] для ДО Белого моря и рек его бассейна. Приняв значение 36,0 нг/г за «фоновое», рассчитаем по формуле [11, 29] долю антропогенной ртути в гязях, ориентируясь на его максимальное содержание 55,0 нг/г на глубине 10,0–15,0 см. Она будет равна 34,5 %.

Изучены связи между содержанием валовой ртути в ДО, с одной стороны, и величинами рН и Eh – с другой (рис. 6). Определено, что по сравнению с пресными водными объектами Ростовской области и Азовским морем [5] в грязевом озере зафиксирована более тесная положительная связь между содержанием элемента в донных осадках и водородным показателем ( $R=0,7$ ). Для окислительно-восстановительного потенциала характерна тесная обратная зависимость  $R=-0,8$ .

Расчеты показали также тесную прямую зависимость между валовым содержанием ртути и  $S_{\text{сульфид}}$  в ДО ( $R=0,83$ ) (рис. 7). Наличие высокой тесноты связи между этими показателями является подтверждением ранее высказанного авторами [29] предположения о захвате этого элемента еще в раннем диагенезе кислоторастворимыми сульфидами железа (аморфным гидротроилитом и его кристаллическими модификациями – грейгитом (в отечественной литературе – мельниковитом,  $Fe_3S_4$ ) и макинавитом ( $Fe_{1+x}S$ )) [30, 31].

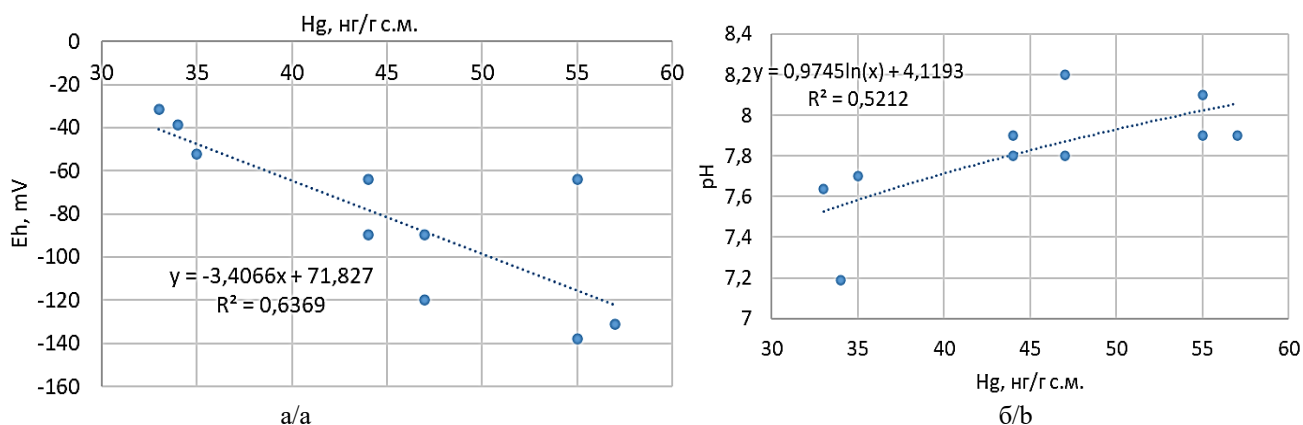


Рис. 6. Регрессионная зависимость валового содержания ртути от окислительно-восстановительного потенциала (а) и водородного показателя (б) / Fig. 6. Regression relationship of the mercury content on the redox potential (a) and the hydrogen index (b)

**Распределение *Clostridium perfrin* в донных отложениях.** Как свидетельствует приведенный анализ, изученных в 1972 г. исследований [3], лечебные гязи оз. Пелёнкино в санитарном отношении неудовлетворительны: величины колититра и перфрингенс-титра (*Clostridium perfringens*) ниже нормы (допустимые в бальнеологии минимальные показатели колититра и перфрингенс-титра – 10 и 0,1 соответственно). К тому же вирулентность бациллы перфрингенс, выявленной в результате анализа, свидетельствует, что использовать данные гязи в лечебных целях без предварительной нормализации санитарных показателей нельзя.

Исследования ДО озера, выполненные нами, показали, что перфрингенс-титр в пробе на ст. 1а (рис. 2) изменялся на глубине 0,0–25,0 см в пределах 0,001–0,01, т.е. он был также ниже допустимой нормы в бальнеологии. На антропогенную природу повышенных значений КОЕ/г указывает то, что минимальный перфрингенс-титр был приурочен к слою до 15 см, после чего он повысился на порядок.

Низкими значениями перфрингенс-титра характеризовались и ДО р. Ерик. Во время экспедиции она сильно пересохла (ст. 2–3). Величина этого микробиологического показателя здесь варьировалась в диапазоне 0,0001–0,001 (ст. 2). Интересно, что на ст. 2 было отмечено закономерного повышения перфрингенс-титра с глубиной погружения ДО как на акватории озера. Не исключено, что это связано как с воздействием животных и людей на ДО (взмучивание и переработка ДО), так и с естественными причинами – наличием в ДО песчаных частиц и неразложившихся остатков растений. Все это увеличивает проницаемость ДО, как следствие, возрастает вероятность для проникновения в них на большую глубину активных форм бактерий.

На ст. 3 перфрингенс-титр изменялся от 0,01 до 0,1. При этом по разрезу, начиная с глубины 5 см, он повысился и приблизился к бальнеологической норме. На левом берегу р. Кагальник, южнее Платоно-Петровки (ст. 4), в районе, часто посещаемом людьми (есть даже мостки), перфрингенс-титр в ДО снижается до 0,00001–0,01. Минимальные значения этого бальнеологического показателя приурочены к глубине слоя донных осадков до 5 см.

Таким образом, можно сделать вывод, что ДО рек бассейна оз. Пелёнкино и сами его грязи находятся под антропогенным воздействием, которое прежде всего формирует низкий уровень значений перфрингенс-титра и его вирулентность. По этому показателю Р.Г. Трубник и Ю.А. Федоров [32] также отнесли ДО оз. Пелёнкино и р. Кагальник, соответственно, к загрязненным и сильнозагрязненным. Использование грязей оз. Пелёнкино в терапевтических целях без предварительной подготовки не рекомендуется.

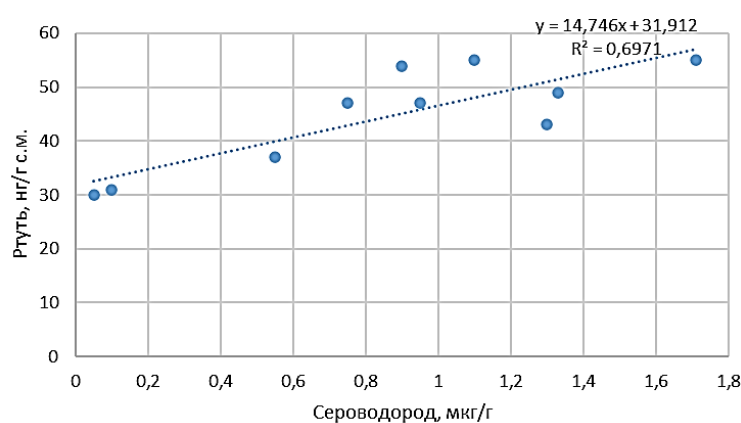


Рис. 7. Регрессионная зависимость валового содержания ртути от содержания  $S_{\text{сульфид}}$  / Fig. 7. Regression relationship of the gross mercury content on the content  $S_{\text{sulfide}}$

#### Список источников

1. Кашинский П.А., Лисицын К. Пелёнкино озеро и его обслуживающие Азовскую грязелечебницу материалы // Гидрохим. материалы. 1928. Т. IV, вып. 1. С. 10–32.
2. Кашинский П.А., Губарева Е.М., Веселовский Н.В., Лазарев К.Г. Грязь и рапа восьми озёр // Гидрохим. материалы. 1931. Т. VII. С. 3–120.
3. Корнилова Р.П., Маршова В.П., Просецкий Э.П. и др. Отчет по курортологическому районированию побережья Азовского моря с целью выявления перспектив курортного освоения (в пределах РСФСР). Реестровый номер: 1697005. М., 1973. Т. I. 350 с.
4. Андреев Ю.А., Тамбиева Н.С. Химический состав лечебной грязи озера Пелёнкино «вчера» и сегодня (из истории Гидрохимического института) // Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод: материалы науч. конф. с междунар. участием. Ростов н/Д., 8–10 сентября 2015 г. Ростов н/Д.: Гидрохим. ин-т. 2015. Ч. 2. С. 1–5.
5. Федоров Ю.А., Доценко И.В., Михайленко А.В. Ртуть в донных отложениях водных объектов юга ЕТР с различной минерализацией // Пресноводные экосистемы – современные вызовы: тез. докл. и стэнд. сообщений междунар. конф. Иркутск: Мегапринт, 2018. С. 47–48.
6. Mikhailenko A.V., Fedorov Yu.A., Dotsenko I.V. Features of the mercury distribution in bottom sediments of the Don River Delta and mud lake Pilenkino // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2018, Ecology, Economics, Education and Legislation Conference Proceedings. Albena, Bulgaria, 2018. Vol. 18, iss. 5.1. P. 409–414.

7. РД 52.24.512-2012. Объемная концентрация метана в водах. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов н/Д.: ГХИ, Росгидромет, 2012. 23 с.
8. РД 52.24.525-2011. Массовая доля сульфидной серы в донных отложениях. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамином. Ростов н/Д.: ГХИ, Росгидромет, 2011. 26 с.
9. РД 52.24.511-2013. Массовая доля метана в донных отложениях. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов н/Д.: ГХИ, Росгидромет, 2013. 19 с.
10. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / под ред. Л.В. Боевой. Ростов н/Д.: НОК, 2009. Ч. 1. 1045 с.
11. Fedorov Yu.A., Ovsepyan A.E., Savitsky V.A., Lisitzin A.P., Shevchenko V. P., Novigatsky A.N. Mercury in White Sea Bottom Sediments: Distribution, Sources and Deposition Chronology // *Oceanology*. 2019. Vol. 59, № 1. P. 143–150.
12. Fedorov Y.A., Gar'kusha D.N., Trubnik R.G., Morozova M.A. Sulfite-Reducing Clostridia and their Participation in Methane and Hydrogen Sulfide Formation in the Bottom Sediments of Water Objects and Streams of the ETR South // *Water Resources*. 2019. Vol. 46. (1). P. 85–93.
13. Обзор состояния и тенденций изменения климата России. Изменения климата 2006 год (декабрь – ноябрь). М., 2006. 35 с. URL: <http://climatechange.igce.ru/> (дата обращения: 02.06.2024).
14. Минувшей ночью на побережье Азовского моря обрушилась нагонная волна // *Новости. Первый канал*. URL: [https://www.1tv.ru/news/2006-08-30/220572-minuvshey\\_nochyu\\_na\\_poberezhie\\_azovskogo\\_morya\\_obrushilas\\_nagonnaya\\_volna](https://www.1tv.ru/news/2006-08-30/220572-minuvshey_nochyu_na_poberezhie_azovskogo_morya_obrushilas_nagonnaya_volna) (дата обращения: 03.06.2024).
15. Уникальный сгон в акватории Таганрогского залива. URL: <http://www.oceanography.institute/index.php/allnews/newsgoin/554-2019-11-25-11-00-30> (дата обращения: 04.06.2024).
16. Обзор состояния и тенденций изменения климата России. Изменения климата 2019 год. Осень: сентябрь – ноябрь. М., 2019. 36 с. URL: <http://climatechange.igce.ru/> (дата обращения: 02.06.2024).
17. Расписание погоды. URL: <https://www.rp5.ru> (дата обращения: 02.06.2024).
18. Алейкин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 444 с.
19. Федоров Ю.А. Гидролого-гидрохимические исследования сульфидного озера Большой Тамбукан // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2013. № 2. С. 81–88.
20. Зубков Е.А., Никаноров А.М., Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Барцев О.Б. Оценка массопереноса главных ионов, железа и метана при разгрузке подземных вод четвертичного водоносного комплекса в Азовское море // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 10. С. 104–115.
21. Цурикова А.П., Шульгина Е.Ф. Гидрохимия Азовского моря. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 259 с.
22. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хоросhevская В.О. Метан в водных экосистемах. Ростов н/Д.; М.: Ростиздат, 2007. 329 с.
23. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Доценко И.В., Афанасьев К.А. Метан и сероводород в лечебных сульфидных грязях (на примере озера Большой Тамбукан) // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2014. № 3. С. 102–109.
24. МУ 2000/34. Классификация минеральных вод и лечебных грязей для целей их сертификации. М.: Министерство здравоохранения РФ, Рос. науч. центр восстан. медицины и курортологии, 2000. 75 с.
25. МУ 10-11/40. Критерии оценки качества лечебных грязей при их разведке, использовании и охране. М.: Минздрав СССР, 1987. 25 с.
26. Федоров Ю.А. К вопросу о классификации лечебных грязей // *Экологические проблемы. Взгляд в будущее : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф.* Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2017. С. 447–456.
27. Федоров Ю.А., Кузнецов А.Н., Давыдов А.Г., Трофимов М.Е., Ленец Е.Н. Цезий-137 в воде и донных отложениях (по результатам экспедиции «Азовское море – 2006») // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2007. Спецвыпуск: Науки о Земле. С. 26–31.
28. Long E.R., Chapman P.M. A sediment quality triad: measures of sediment contamination, toxicity and infaunal community composition in Puget sound // *Marine Pollution Bulletin*. 1985. Vol. 16. P. 405–415.
29. Fedorov Yu.A., Ovsepyan A.E., Zimovets A.A., Savitskiy V.A., Lisitsyn A.P., Shevchenko V.P., Dotsenko I.V., Novigatsky A.N. Mercury Distribution in Bottom Sediments of the White Sea and the Rivers of Its Basin // *The Handbook of Environmental Chemistry*. Switzerland: Springer, 2018. № 82, part II. P. 207–240.
30. Волков И.И. Геохимия серы в осадках океана. М.: Наука, 1984. 272 с.
31. Розанов А.Г., Кокрятская Н.М., Гурский Ю.Н. Состав иловых вод и форм соединений серы в донных осадках северо-восточной части Черного моря // *Литология и полезные ископаемые*. 2017. № 4. С. 291–305.
32. Трубник Р.Г., Федоров Ю.А. Оценка экологического состояния донных отложений по триаде химико-биологических показателей. Ростов н/Д.; М.: Бюро пропаганды Ростовской писательской организации, 2023. 120 с.

## References

1. Kashinsky P.A., Lisitsyn K. Pelenkino lake and its materials serving the Azov mud baths. *Gidrokhim. materialy = Hydrochemical Materials*. 1928;4(1):10-32. (In Russ.).
2. Kashinsky P.A., Gubareva E.M., Veselovsky N.V., Lazarev K.G. Mud and brine of eight lakes. *Gidrokhim. materialy = Hydrochemical Materials*. 1931;7:3-120. (In Russ.).
3. Kornilova R.P., Marshева V.P., Prosetsky E.P. [et al.]. *A report on the balneological zoning of the Azov Sea coast in order to identify the prospects for resort development (Within the RSFSR)*. Registration number: 1697005. Moscow, 1973;1. 350 p. (In Russ.).
4. Andreev Yu.A., Tambieva N.S. The chemical composition of the therapeutic mud of Lake Pelenkino “yesterday” and today (from the history of the Hydrochemical Institute). *Modern problems of hydrochemistry and monitoring of surface water quality*. Materials of the Scientific Conference with international participation. Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute Press; 2015;(2):1-5. (In Russ.).
5. Fedorov Yu.A., Dotsenko I.V., Mikhailenko A.V. Mercury in bottom sediments of water bodies in the south of the ETR with different mineralization. *Freshwater ecosystems - modern challenges*. Abstracts of reports and poster presentations of the international conference. Irkutsk: Megaprint Publ.; 2018:47-48. (In Russ.).
6. Mikhailenko A.V., Fedorov Yu.A., Dotsenko I.V. Features of the mercury distribution in bottom sediments of the Don River Delta and mud lake Pilenkino. *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2018, Ecology, Economics, Education and Legislation Conference Proceedings*. Albena, Bulgaria, 2018;18(5.1):409-414.
7. RD 52.24.512-2012. *The volume concentration of methane in the waters. Measurement technique by gas chromatographic method using equilibrium vapor analysis*. Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute Press; 2012. 23 p. (In Russ.).
8. RD 52.24.525-2011. *The mass fraction of sulfide sulfur in bottom sediments. The method of performing measurements by photometric method with N,N-dimethyl-p-phenylenediamine*. Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute Press; 2011. 26 p. (In Russ.).
9. RD 52.24.511-2013. *The mass fraction of methane in bottom sediments. Measurement technique by gas chromatographic method using equilibrium vapor analysis*. Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute, Roshydromet Press; 2013. 19 p. (In Russ.).
10. Boeva L.V., ed. *Guidelines for the chemical analysis of land surface waters*. Rostov-on-Don: NOK Publ.; 2009;(1). 1045 p. (In Russ.).
11. Fedorov Yu. A., Ovsepyan A. E., Savitsky V.A., Lisitzin A.P., Shevchenko V. P., Novigatsky A. N. Mercury in White Sea Bottom Sediments: Distribution, Sources and Deposition Chronology. *Oceanology*. 2019;59(1):143-150.
12. Fedorov Y.A., Gar’kusha D.N., Trubnik R.G., Morozova M.A. Sulfite-Reducing Clostridia and their Participation in Methane and Hydrogen Sulfide Formation in the Bottom Sediments of Water Objects and Streams of the ETR South. *Water Resources*. 2019;46(1):85-93.
13. *An overview of the state and trends of climate change in Russia. Climate change 2006 (December - November)*. Moscow, 2006. 35 p. Available from: <http://climatechange.igce.ru> [Accessed 2nd June 2024]. (In Russ.).
14. Last night, a surge wave hit the coast of the Sea of Azov. *News. Channel 1*. Available from: [https://www.1tv.ru/news/2006-08-30/220572-minuvshey\\_nochyu\\_na\\_poberezhie\\_azovskogo\\_morya\\_obrushilas\\_nagonnaya\\_volna](https://www.1tv.ru/news/2006-08-30/220572-minuvshey_nochyu_na_poberezhie_azovskogo_morya_obrushilas_nagonnaya_volna) [Accessed 3rd June 2024]. (In Russ.).
15. *A unique run-off in the waters of the Taganrog Bay*. Available from: <http://www.oceanography.institute/index.php/allnews/newsgoin/554-2019-11-25-11-00-30> [Accessed 4th June 2024]. (In Russ.).
16. *Overview of the state and trends of climate change in Russia. Climate change 2019. Autumn: September - November*. Moscow, 2019. 36 p. Available from: <http://climatechange.igce.ru/> [Accessed 2nd June 2024]. (In Russ.).
17. *Weather schedule*. Available from: <https://www.rp5.ru> [Accessed 2nd June 2024]. (In Russ.).
18. Alekin O.A. *Fundamentals of hydrochemistry*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1970. 444 p. (In Russ.).
19. Fedorov Yu.A. Hydrological and hydrochemical studies of the sulfide lake Bolshoy Tambukan. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2013;(2):81-88. (In Russ.).
20. Zubkov E.A., Nikanorov A.M., Garkusha D.N., Fedorov Yu.A., Bartsev O.B. Assessment of mass transfer of major ions, iron and methane during groundwater discharge of the quaternary aquifer complex into the Sea of Azov. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2021;(10):104-115. (In Russ.).
21. Tsurikova A.P., Shulgina E.F. *Hydrochemistry of the Sea of Azov*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1964. 259 p. (In Russ.).
22. Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Gar’kusha D.N., Khoroshevskaya V.O. *Methane in aquatic ecosystems*. Rostov-on-Don; Moscow: Rostizdat Publ.; 2007:179-230. (In Russ.).
23. Fedorov Yu.A., Gar’kusha D.N., Dotsenko I.V., Afanasyev K.A. Methane and hydrogen sulfide in therapeutic sulfide mud (on the example of Lake Bolshoy Tambukan). *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2014;(3):102-109. (In Russ.).

24. MG 2000/34. *Classification of mineral waters and therapeutic mud for the purposes of their certification*. Moscow: Ministry of Health of the Russian Federation, Russian Scientific Center for Restorative Medicine and Balneology Press; 2000. 75 p. (In Russ.).

25. MG 10-11/40. *Criteria for assessing the quality of therapeutic mud in their exploration, use and protection*. Moscow: Ministry of Health of the USSR Press; 1987. 25 p. (In Russ.).

26. Fedorov Yu.A. On the classification of therapeutic mud. *Ecological problems. A look into the future. Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2017:447-456. (In Russ.).

27. Fedorov Yu.A., Kuznetsov A.N., Davydov A.G., Trofimov M.E., Lenets E.N. Caesium -137 in water and bottom sediments (according to the results of the expedition "Sea of Azov-2006"). *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science. Special iss.* 2007:26-31.

28. Long E.R., Chapman P.M. A sediment quality triad: measures of sediment contamination, toxicity and in-faunal community composition in Puget sound. *Marine Pollution Bulletin*. 1985;16:405-415.

29. Fedorov Yu.A., Ovsepyan A.E., Zimovets A.A., Savitskiy V.A., Lisitsyn A.P., Shevchenko V. P., Dotsenko I.V., Novigatskiy A.N. Mercury Distribution in Bottom Sediments of the White Sea and the Rivers of Its Basin. *The Handbook of Environmental Chemistry*. Switzerland: Springer; 2018;(82-2):207-240.

30. Volkov I.I. *Geochemistry of sulfur in ocean sediments*. Moscow: Nauka Publ.; 1984. 272 p. (In Russ.).

31. Rozanov A.G., Kokryatskaya N.M., Gurskiy Yu.N. Composition of silt waters and forms of sulfur compounds in bottom sediments of the northeastern part of the Black Sea. *Litologiya i poleznye iskopaemye = Lithology and Minerals*. 2017;(4):291-305. (In Russ.).

32. Trubnik R.G., Fedorov Yu.A. *Assessment of the ecological state of bottom sediments according to a triad of chemical and biological indicators*. Rostov-on-Don, Moscow: Bureau of Propaganda of the Rostov Writers' Organization Press; 2023. 120 p. (In Russ.).

#### **Информация об авторах**

Юрий Александрович Федоров – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Алина Александровна Зимовец – кандидат географических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Ирина Владимировна Доценко – кандидат географических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Дмитрий Николаевич Гарькуша – кандидат географических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Анна Владимировна Михайленко – кандидат географических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Николай Витальевич Доценко – магистрант, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

#### **Information about the authors**

Yuri A. Fedorov – Doctor of Science (Geography), Professor, Head of Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Alina A. Zimovets – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Irina V. Dotsenko – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Dmitry N. Gar'kusha – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Anna V. Mikhailenko – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Nikolay V. Doisenko – Master's Student, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

Статья поступила в редакцию 28.06.2024; одобрена после рецензирования 22.08.2024; принята к публикации 16.10.2024.  
The article was submitted 28.06.2024; approved after reviewing 22.08.2024; accepted for publication 16.10.2024.

Научная статья

УДК 553.241/242:553.411(571.65)

doi: 10.18522/1026-2237-2024-4-2-127-138

## УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗОЛОТА ЗОЛОТОРУДНО-КВАРЦЕВОГО ФОРМАЦИОННОГО ТИПА НА ПРИМЕРЕ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ ХУГЛАННАХ ВЕРХОЯНО-КОЛЫМСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ

**Александр Эдуардович Хардигов<sup>1</sup>, Оксана Сергеевна Бондарева<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup> Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>1</sup>khardikov@sfnu.ru

<sup>2</sup>osbondareva@sfnu.ru

**Аннотация.** Рудопроявление Хугланнах расположено на территории Аян-Юряхского антиклинория Верхояно-Колымской складчатой области. Здесь находятся недоизученные золоторудные проявления золоторудно-кварцевой формации, а также промышленные и непромышленные россыпи золота. Ареал распространения золоторудной минерализации в пределах Хугланнахского рудопроявления локализован в дайкообразном теле гранодиорит-порфиров и в его экзоконтакте. Вмещающими породами являются отложения атканской и омчакской свит позднепермского возраста, собранные в брахисинклинальную складку, к осевой части которой приурочено рудоконтролирующее интрузивное тело. В строении вмещающего комплекса принимают участие породы, содержащие вулканогенный материал: туфопесчаники, туфоалеволиты, туфоаргиллиты, туфогенные микститы, а также лавокластиты, туфы и туффиты андезидацитов и дацитов. Ведущим структурно-морфологическим типом оруденения является прожилково-вкрапленный; редко встречается жильно-прожилковый. Рудная минерализация представлена тонкой вкрапленностью арсенопирита, галенита, золота, которая приурочена, как правило, к темно-серым полосам в зальбандовых частях жил. Проведенными минерало-петрографическими исследованиями было установлено, что породы интрузивного тела гранодиорит-порфиров, сопровождавшие Хугланнахский шток, были подвержены процессам, соответствующим высокотемпературному автотермальному и мезотермальному околотрецинному метасоматозу по типу березитизации, связанному с гидротермальным этапом золото-кварцевого рудообразования. На основании полученного материала сформирована многофакторная модель рудопроявления Хугланнах.

**Ключевые слова:** Аян-Юряхский антиклинорий, золоторудно-кварцевая формация, рудопроявление, итуфные пробы, вмещающие комплексы, оруденение, метасоматоз, рудная минерализация, месторождение

**Для цитирования:** Хардигов А.Э., Бондарева О.С. Условия образования месторождений золота золоторудно-кварцевого формационного типа на примере рудопроявления Хугланнах Верхояно-Колымской складчатой области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 4-2. С. 127–138.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

Original article

## CONDITIONS FOR THE GOLD DEPOSITS FORMATION OF GOLD-QUARTZ FORMATION TYPE ON THE EXAMPLE OF THE HOOGLANNACH ORE OCCURRENCE OF THE VERKHOYANSK-KOLYMA FOLDED REGION

**Alexander E. Hardikov<sup>1</sup>, Oksana S. Bondareva<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup> Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>1</sup>khardikov@sfnu.ru

<sup>2</sup>osbondareva@sfnu.ru

© Хардигов А.Э., Бондарева О.С., 2024



**Abstract.** The Hooglannah ore deposit is located on Ayan-Yuryakh anticlinory territory of the Verkhoyansk-Kolyma folded region. There are unexplored gold ore manifestations of the gold-ore-quartz formation, as well as industrial and non-industrial placers of gold. The distribution area of gold mineralization within the Hooglannah ore occurrence is localized in the dyke-like body of granodiorite porphyries and in its exocontact. The host rocks are the Atkan and Omchak formations deposits of Late Permian age, collected in a brachysynclinal fold. An intrusive ore-controlling body is confined to its axial part. Rocks containing volcanogenic material take part in the structure of the host complex: tuff sandstones, tuffoaleurolites, tuffoargillites, tuffogenic mixtites, as well as la voxites, tuffs and tuffites of andesite and dacite. The veined-interspersed type is the leading structural and morphological type of mineralization. The vein-veined type occurs rarely. Ore mineralization is represented by thin inclusions of arsenopyrite, galena, and gold, which is usually confined to dark gray stripes in the band parts of veins. The conducted mineralogical and petrographic studies have established that the rocks of the intrusive body of granodiorite porphyry accompanying the Hooglannah stock were subject to processes corresponding to high-temperature autometasomatism and mesothermal near-crack metasomatism by the type of berezitization. This type associated with the hydrothermal stage of gold-quartz ore formation. The multifactorial model of the Hooglannah ore occurrence was formed, based on the obtained material.

**Keywords:** Ayan-Yuryakh anticlinorium, gold-quartz formation, ore occurrence, ore samples, host complexes, mineralization, metasomatism, ore mineralization, deposit

**For citation:** Hardikov A.E., Bondareva O.S. Conditions for the Gold Deposits Formation of Gold-Quartz Formation Type on the Example of the Hooglannah Ore Occurrence of the Verkhoyansk-Kolyma Folded Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(4-2):127-138. (In Russ.).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

## Введение

Территория Аян-Юряхского антиклинория Верхояно-Колымской складчатой области обладает гигантским потенциалом крупнотоннажных месторождений золоторудно-кварцевой формации, представленных структурно-морфологическим типом линейных штокверков в терригенных и вулканогенно-осадочных породах (наталкинский тип). Рудопроявление Хугланнах – один из самых интересных объектов, выявленных «с нуля» за последние 30 лет в Центрально-Колымском районе [1–4]. До проведения здесь геолого-съёмочных работ по программе ГДП-200 в 2007–2009 гг. на площади Хугланнахского рудного поля были известны геохимические аномалии золота, несколько штучных проб и небольшое россыпное месторождение. В настоящий момент рудопроявление Хугланнах приобрело ранг среднего месторождения золота, и это подтверждает, что золоторудный потенциал Аян-Юряхского антиклинория далеко не исчерпан, потому что на этом участке еще много подобных объектов. На примере рудопроявления Хугланнах показаны условия образования коренных месторождений золоторудно-кварцевого формационного типа.

Рудопроявление Хугланнах расположено на территории, получившей высокую прогнозную оценку на коренное золото, а также положительные рекомендации в рамках работ, ранее выполненных ОАО «Магадангеология». Здесь находятся недоизученные золоторудные проявления, а также промышленные и непромышленные россыпи золота.

## Результаты и обсуждение

Рудосодержащей структурой является удлиненное дайкообразное тело гранодиорит-порфиров, имеющее длину до 5,5 км и ширину до 1,5 км, относится по комплексу признаков (возрастные датировки, особенности петрохимического и петрографического составов) к басугуньинскому диорит-гранит-гранодиоритовому интрузивному комплексу и слагается его тремя фазами – дайками диоритов, дайками и штоками кварцевых диоритов, дайками и штоками гранодиорит-порфиров (рис. 1).

Басугуньинский интрузивный комплекс относится к диорит-гранит-гранодиоритовой формации [5–7]. Его возраст, подтвержденный U-Pb SHRIMP-датированием, составляет 149,7+/-2,0 млн лет [8, 9]. Отличительные черты басугуньинского интрузивного комплекса: преобладание в его составе умеренно кислых гранитоидов; многофазность интрузивных тел; породы разных фаз относятся к нормально щелочным, калинатовым. Средне-кремнекислые породы – биотит-



амфиболовые, нередко содержат орто- и клинопироксен. Кремнекислые породы – амфибол-биотитовые и биотитовые. Характерны крупные обильные порфировые выделения в дайках.

Вмещающими породами являются отложения атканской и омчакской свит позднепермского возраста [10–14], собранные в брахисинклинальную складку, к осевой части которой приурочено рудоконтролирующее интрузивное тело. Все они содержат вулканогенный материал. Это туфоесчанники, туфоалевролиты, туфоаргиллиты, туфогенные микститы, а также лавокластиты, туфы и туффиты андезидацитов и дацитов [15, 16].

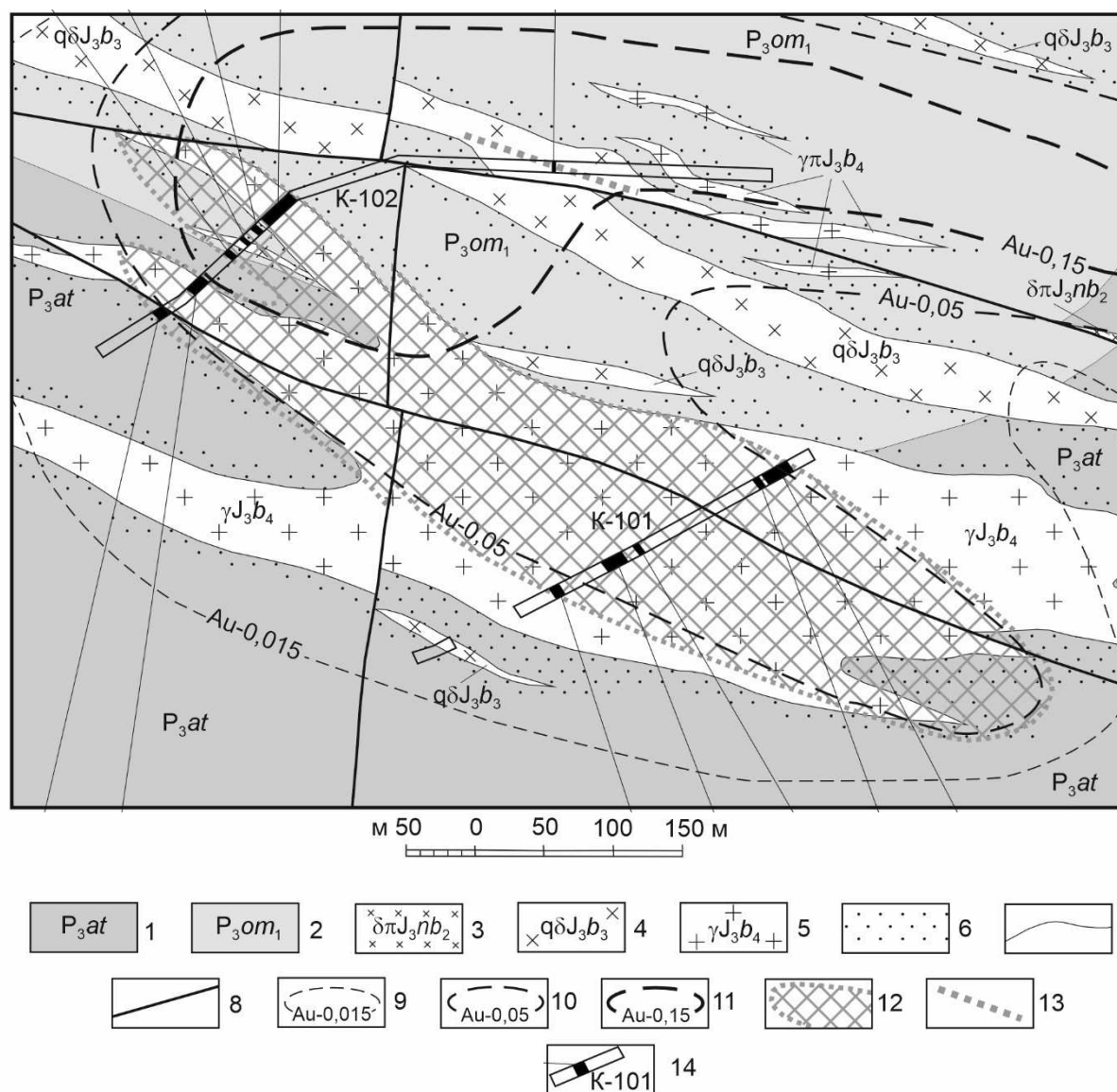


Рис. 1. Геологический план проявления Хугланнах: 1 – атканская свита; 2 – нижеомчакская подсвита; 3 – nera-бохапчинский комплекс; 4, 5 – басугуньинский комплекс (4 – кварцевые диориты; 5 – граниты и гранит-порфиры); 6 – контактовые роговики и ороговикованные породы; 7 – геологические границы между разновозрастными подразделениями; 8 – разрывные нарушения; 9–11 – литохимические аномалии золота во вторичных ореолах рассеяния концентраций; 12 – рудная зона, выделенная по данным горных работ; 13 – отдельные предполагаемые рудные тела; 14 – каналы с их номерами / Fig. 1. Geological plan of the Hooglannah ore occurrence: 1 - the Atkan formation; 2 - the Nizhneomchak sub-formation; 3 - the Nera-Bokhaphchinsky complex; 4, 5 - the Basuguninsky complex (4 - quartz diorites; 5 - granites and granite porphyrite); 6 - contact corneas and horny rocks; 7 - geological boundaries between age divisions; 8 - discontinuous faults; 9-11 - lithochemical gold anomalies in secondary halos of concentration scattering; 12 - ore zone identified according to mining data; 13 - individual suspected ore bodies; 14 - ditches with its numbers

*Туфопесчаники, туфоалевролиты, туфоаргиллиты* содержат пирокластический материал, который, как правило, крупнее терригенного. В основном это кристаллокласты полевых шпатов, а также обломки эффузивных пород и вулканического стекла. Отмечаются единичные овальные или изометричные зерна микроклин-пертита. Обломки эффузивных пород (андезидацита и дацита) имеют крупнопсаммитовую, реже гравийную размерность, таблитчатую, удлиненно-овальную форму, иногда с извилистыми очертаниями. Вокруг них часто наблюдается кайма, состоящая из смеси сфена, лейкоксена, железистых минералов и тонкорассеянного углефицированного органического вещества. Цемент в туфопесчаниках и туфоалевролитах порово-базальный, базально-поровый, поровый и контурно-поровый, сплошной, равномерный. Он, как правило, халцедоново-гидрослюдистый.

*Туфогенные микститы* представляют собой смешанные песчанисто-алевритисто-пелитовые породы с псевдослоистой, линзовидно-слоистой или плейчатой микротекстурой и псаммито-алевропелитовой структурой. Степень окатанности обломочного материала низкая. Микститы содержат пирокластический материал (до 50 % объема породы), представленный кристаллокластами (олигоклаз-андезин), а также обломками дацита и андезидацита. Цемент гидрослюдисто-серицитово-халцедоновый, содержит рассеянное углеродистое вещество.

*Лавокластиты* на 90 % и более состоят из лавокластичности псаммитовой размерности (обломки дацита и андезидацита с микрофельзитовой пилотакситовой структурой, редкие округлые частицы крупнопузырчатой пемзы и туфоалевролита), остроугольных изометричных и удлиненных кристаллокластов полевых шпатов и кварца. Цементирующая масса, составляющая до 10 % объема породы и равномерно распределенная в ней, имеет флюидальное строение и представляет собой тонковолокнистый гейландитово-гидробиотитово-серицитово-халцедоновый агрегат с вкраплениями тонкодисперсного рудного вещества (5 %). Присутствует в цементе вторичный мелко-среднекристаллический кальцит.

*Туфы* андезидацита и дацита содержат более 90 % пирокластического материала, представленного пеплом, лапилли, вулканическими бомбами и редкими вулканическими агломератами. По составу это кристаллокласты полевых шпатов, обломки андезидацитов и дацитов, а также вулканическое стекло. Цементирующая масса в туфах занимает менее 10 % объема породы и имеет гейландитово-халцедоновый состав, а также содержит вторичные сосюрит и кальцит.

*В туффитах дацита и андезидацита* преобладают корродированные и замещенные серицитом и сосюритом зерна плагиоклазов псаммитовой размерности. Фенокристаллы фемических минералов определяются только по скоплению вторичных минералов, особенно непрозрачных микроагрегатов титаномагнетита, ориентированных перпендикулярно общей слоистости. Характерны структуры гравитационной коррозии. Гейландитово-серицитово-халцедоново-гидрослюдистый цемент занимает 15–40 % объема породы (рис. 2А, Б, В).

На рудопроявлении различаются контактово-, динамо- и регионально-метаморфические образования.

*Контактный метаморфизм* связан непосредственно с внедрением интрузивных тел. Внутреннюю часть экзоконтакта слагают слюдяно-кварцевые роговики. Они имеют беспорядочную микротекстуру и роговиковую структуру, представляют собой лепидогранобластовый агрегат кордиерита, биотита, серицита и кварца, в котором равномерно распределены изометричные агрегаты тонкодисперсного рудного вещества (сульфиды железа), составляющие 5–7 %. Внешняя часть экзоконтакта сложена узловатыми сланцами с blastopelитовой структурой. Основная ткань породы представлена серицитизированным глинистым веществом грубопелитового строения, по которому развиваются тонкоагрегатные скопления-узелки биотита, кордиерита и андалузита, частично замещенные агрегатами серицита и хлорита. Описанные породы относятся к мусковит-роговиковой фации контактового метаморфизма.

*Динамометаморфизм* в районе Хугланнахского рудопроявления приурочен к зоне рудоконтролирующих тектонических нарушений северо-западного простирания. Он выражен кливажем течения в туфоаргиллитах, а также в туфоалевролитах и туфопесчаниках. Породы имеют механическую сланцеватость, однообразную ориентировку уплощенных зерен в породах и линейно-струйчатую текстуру основной ткани с явным обтеканием крупных обломков. Нередко наблюдаются следы вращения и S-образная деформация удлиненных зерен, ориентированных под углом к кливажу. Характерна сульфидизация пород, наличие жил и прожилков кварца, а также зон прожилкового окварцевания. Отмечается сложная дисгармоничная складчатость.

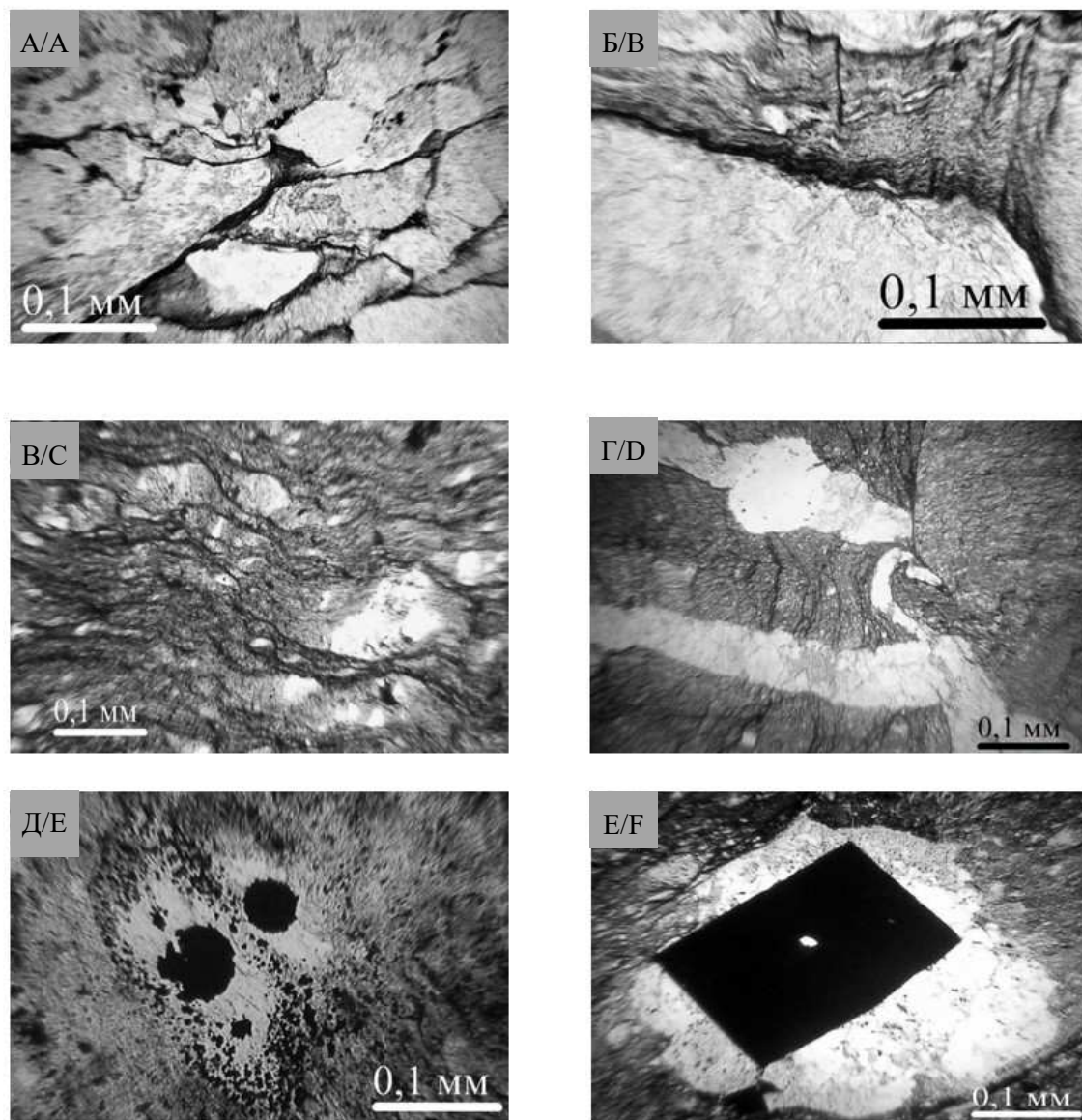


Рис. 2. Строение рудовмещающих пород рудопроявления Хугланнах: А – образец 8-4. Руч. Чужой. Пирокластическая структура туфа дацита псаммитового, кристалло-литокластического; цементирующая масса типа соприкосновения. Николи; Б – образец 9-2. Руч. Чужой. Лавокластит дацита псаммитовый, кристалло-литокластический. Цементирующая масса – хлоритизированное вулканическое стекло с флюидальной микротекстурой. Слева – николи; В – образец 7-4. Руч. Западный. Туффит дацита псаммито-алевритовый, кристалло-литокластический. Микротекстура плойчатая. Структура терригенно-пирокластическая с гравитационной коррозией обломочного материала. Николи; Г – образец 8-4. Руч. Чужой. Прожилки кварца, содержащие вкрапления арсенопирита, в березитизированном туффите дацита алевритовом, кристалло-литокластическом. Николи; Д – образец 6-2. Руч. Чужой. Кокардовая структура березита. Агрегаты арсенопирита, замещающие пустоты в центре березитизированного зерна плагиоклаза и по его краям; Е – образец 7-3. Руч. Чужой. Кристалл арсенопирита в литокласте дацита, подверженного гравитационной коррозии. Николи / Fig. 2. Structure of ore-bearing rocks of the Hooglannah ore occurrence: А - sample 8-4. Alien creek. Pyroclastic structure of dacite psammite tuff, crystal-lithoclastic; cementing mass of the contact type. Nicoli; В - sample 9-2. Alien creek. Dacite lavoclastite is psammite, crystal-lithoclastic. The cementing mass is chloritized volcanic glass with a fluid microtexture. On the left is nicoli; С - sample 7-4. Western creek. Dacite tuffite is psammite-siltstone, crystalline-lithoclastic. The microtexture is flattened. The structure is terrigenous-pyroclastic with gravitational corrosion of the clastic material. Nicoli; D - sample 8-4. Alien creek. Quartz veins containing inclusions of arsenopyrite in beresitized dacite siltstone tuffite, crystal-lithoclastic. Nicoli; E - sample 6-2. Alien creek. The cockade structure of the beresite. Arsenopyrite aggregates replacing voids in the center of the beresitized plagioclase grain and along its edges; F - sample 7-3. Alien creek. Arsenopyrite crystal in a dacite lithoclast subject to gravitational corrosion. Nicoli

Динамометаморфические образования формировались в течение длительного отрезка времени и до внедрения крупных гранитоидных масс позднеюрского возраста, одновременно с основными складчатыми деформациями. Об этом свидетельствует потеря сланцеватости и ороговикование тектонизированных глинистых пород в экзоконтактах интрузивов басугуньинского комплекса.

*Региональный метаморфизм* зеленосланцевой фации низкой ступени слабо выражен в осадочных породах палеозойского возраста. Он диагностирован только при изучении глинистых пород в шлифах. Минеральный состав новообразований однообразен. Глинистый цемент в кливажированных породах замещен хлоритом и серицитом, которые обычно приспособляются к направлениям сланцеватости. В незначительном количестве присутствуют новообразованные биотит и стильпномелан. Региональный зеленосланцевый метаморфизм связан с глубинными тепловыми потоками коллизионного этапа (поздняя юра), приведшего в конечном счете к магмообразованию.

Ареал распространения золоторудной минерализации в пределах Хугланнахского рудопроявления локализован в дайкообразном теле гранодиорит-порфириров и в его экзоконтакте.

*Оруденение.* Ведущим структурно-морфологическим типом оруденения является прожилково-вкрапленный, редко встречается жильно-прожилковый. Мощность прожилков варьирует от 1–2 мм до 3–5 см; часто встречаются единичные жилы мощностью до 0,3–0,5 м, сопровождающиеся субпараллельными прожилками мощностью от 2–3 мм до 3–5 см. Все рудные зоны линзообразные, протяженностью в первые метры. Они приурочены к висячим контактам интрузивных тел, вытянуты в северо-западном направлении, имеют северо-восточное падение (углы падения 50–75°), выполаживаются по простиранию от северо-западного к юго-восточному флангу. Состав жил и прожилков – сульфидно-кварцевый, сульфидно-карбонатно-кварцевый. Кварцевые прожилки имеют, как правило, симметрично-зональное строение. Центральная часть прожилка выполнена крупно-среднекристаллическим кварцем. Границы зерен корродированы в результате грануляции мелкокристаллическим кварцем. Этот кварц слагает зальбанды прожилков. В них вместе с мелкокристаллическим кварцем постоянно отмечаются таблитчатые кристаллы альбита, реже встречаются призматические кристаллы мусковита. Кварц белый и серый, мелкокристаллический. Текстура массивная, брекчиевая, в призальбандовых частях – неясно-полосчатая; текстурный рисунок обусловлен измененными обломками вмещающих пород и полосами серого, темно-серого цвета в зальбандовых частях жил и прожилков. В центральной части жилы встречаются небольшие пустоты, выполненные мелкими (до 1 мм) друзитовыми кристаллами прозрачного кварца. Рудная минерализация жил и прожилков представлена вкрапленностью арсенопирита, галенита, золота в темно-серых полосах в зальбандах.

Рудоносными также являются зоны березитизированных гранодиорит-порфириров и вулканогенно-осадочных пород, залегающих в экзоконтакте. В них арсенопирит образует густую мелкую вкрапленность. Березитизированные породы пронизаны густой сетью тонких ветвящихся или субпараллельных прожилков кварца с обильной вкрапленностью арсенопирита, редко галенита, приуроченной к зальбандовым частям прожилков мощностью более 5 мм, в прожилках же толщиной менее 2 мм арсенопирит приурочен к центральным частям, галенита в них нет. В прожилках и вдоль прожилков количество рудных минералов – до 20 %, по мере удаления от них снижается до 3–5 % (рис. 2Г).

Золото распределено неравномерно, как правило, внутри контура рудной зоны выделяется несколько обогащенных интервалов. Золото мелкое, до 0,1 мм; находится как в свободной форме в интерстициях кристаллов кварца, так и в сростаниях с арсенопиритом и галенитом. Пробность золота 790–800. В самородном золоте главной примесью является серебро (18–20 мас. %); также установлены примеси висмута, свинца, меди, никеля. Суммарное их количество не превышает 1 %.

Арсенопирит является самым распространенным минералом жил и прожилков и гидротермально измененных пород. Встречается в виде мелкой вкрапленности, непротяженных тонких мономинеральных прожилков и просечек. Галенит встречается довольно редко и только в кварцевых жилах и прожилках. В составе галенита установлены микропримеси висмута, серебра и сурьмы, что указывает на возможное нахождение в галените микровключений блеклых руд. Кроме этих минералов, визуальное в жильно-прожилковых образованиях постоянно отмечался пирит. Состав рудной минерализации прост и типичен для золоторудно-кварцевой формации.

*Гидротермально-метасоматические образования* в пределах рудопроявления Хугланнах формировались в два этапа. Первый – автометасоматический – связан с постмагматическими процессами, сопровождающими и завершающими формирование гранитоидных интрузий. Второй этап – рудообразующий мезотермальный гидротермально-метасоматический.

*Образования первого этапа* связаны главным образом с постмагматическими процессами деанортитизации плагиоклазов и альбитизации калиевых полевых шпатов, частичным замещением биотита тонкокристаллическими агрегатами мелкочешуйчатого серицита и пирита. По характеру протекания химических реакций процесс является щелочным и предшествует ранней кислотной стадии метасоматоза. Первичный калиевый полевой шпат гранитоидов подвергся альбитизации, в нем появились пятнистые пертиты замещения, по которым в дальнейшем развился шахматный альбит. В это же время в результате деанортитизации кальцийсодержащих плагиоклазов возникли более кислые плагиоклазы, иногда с реакционными каемками альбита. Интенсивнее всего деанортитизации были подвержены плагиоклазы, образующие порфиновые вкрапленники. Процесс альбитизации зональных плагиоклазов приводит к образованию плагиоклазов с обратной и рекуррентной зональностью. В измененных породах полевые шпаты представлены преимущественно альбитизированным олигоклазом, шахматным альбитом при исчезающе малом количестве калиевых полевых шпатов. Это указывает на более позднее их происхождение за счет интенсивной альбитизации гранодиорит-порфиоров. Породы, наиболее измененные в стадию автометасоматоза, приурочены к зонам дробления и трещиноватости, с ними связаны наиболее интенсивные гидротермально-метасоматические изменения второго этапа.

*Гидротермально-метасоматические образования второго этапа.* В гранодиорит-порфирах кислые плагиоклазы, представленные олигоклазом и альбитом, замещаются, соответственно, альбитово-серицитовыми и серицитово-мусковитовыми агрегатами. По плагиоклазам с большим содержанием анортита развивается сосюрит. В редких случаях по ним образуются волокнистые или тонкопластинчатые агрегаты пеннина.

Происходит микрогрануляция первичного кварца. Более поздний кварц прозрачный, микрозернистый, округлой или лапчатой формы, без трещин и газовой-жидких включений развивается вдоль границ зерен первичного кварца, а также в виде цементирующей массы расположен между отдельными крупными индивидами и минеральными скоплениями. Также он гранулирует реликтовые минералы внутри гломеробластов. Самый поздний, трещиноватый кварц обычно лимонитизирован (имеет бурую окраску), содержит большое количество газовой-жидких включений, пропитан тончайшей вкрапленностью рудных минералов.

Мусковит и серицит в гидротермально измененных породах образуют псевдоморфозы по полевым шпатам и биотиту, а также в виде пластинчатых агрегатов развиваются вдоль трещин и в интерстициях.

Рудные минералы часто наблюдаются на месте разложения биотита, по трещинам спайности и по краям зерен полевых шпатов, локализуются вдоль кварцевых прожилков и представлены мелкими бесформенными выделениями и кубиками пирита, ромбовидными и призматическими кристаллами арсенопирита (рис. 2Д, Е). По времени образования пирит является более ранним, чем арсенопирит.

Акцессорные минералы представлены игольчатыми кристаллами рутила, округлыми зернами и призматическими кристаллами апатита, округлыми зернами циркона. В наиболее измененных породах акцессорные минералы часто образуют скопления на месте реликтов первичных минералов и их содержание значительно выше.

Наибольшие изменения в интрузивных породах отмечены внутри обогащенных золотом интервалов. Околожильные изменения в гранодиорит-порфирах проявляются в замещении плагиоклазов тонковолокнистыми агрегатами серицита с большим количеством мельчайших выделений пирита. Биотит полностью замещен мусковитом и микрозернистым анкеритом; по спайности развиваются тонкие вкрапления пирита; часто вокруг таких псевдоморфоз образуются каемки мелкочешуйчатого серицита.

В березитизированных вулканогенно-осадочных породах цементирующее вещество замещено микрозернистым кварцем, скоплениями серицита и тонкодисперсным лейкоксенизированным рудным веществом, содержащими микрозернистые агрегаты сфена.

Таким образом, второй этап гидротермально-метасоматических изменений по характеру протекания химических реакций соответствует кислотной и последующей щелочной стадиям. Преобладающими формами минералов являются псевдоморфозы замещения первичных минералов, прожилки и образования в пустотах. Замещение минералов проходило поэтапно. В первую очередь разрушению подвергались железомagneйевые силикаты, представленные в основном биотитом. По биотиту развивались псевдоморфозы серицита, мусковита, иногда пеннина (или хлори-

та), рутила и пирита, полностью замещая биотит на участках интенсивной трещиноватости. Затем по средним плагиоклазам образовывались агрегаты сосюрита и пеннина, а по кислым – альбитово-серицитовые агрегаты. В результате разрушения полевых шпатов освобожденный кремнезем переотлагался в виде кварца, замещая полевые шпаты и первичный кварц, заполняя микротрещины и пустоты в породе.

Этот этап сопровождался интенсивными тектоническими подвижками, что привело к растрескиванию и дроблению пород и способствовало более глубокому проникновению гидротермальных растворов и интенсивному выщелачиванию боковых пород, компенсированным осаждением кварца. В породах появились жилы и прожилки, имеющие зональное строение. В зальбандах кварцевых жил происходило интенсивное замещение полевых шпатов, отмечается образование минералов, представленных мусковитом, агрегаты которого ориентированы вдоль прожилков, и альбитом.

Завершающий этап гидротермально-метасоматических изменений гранитоидов связан с кальцитизацией. Линзочки микрозернистого кальцита, реже скопления крупных кристаллов, отмечены как на месте разложения полевых шпатов и биотита, так и в интерстициях породы и пустотах кварцевых прожилков.

На рудопроявлении выделена зональность гидротермально-метасоматических и метаморфических образований (рис. 3): 1) внешняя зона распространения пород, затронутых зеленокаменными изменениями и слабой березитизацией; 2) зоны распространения интенсивно березитизированных и ороговикованных пород; 3) зоны распространения березитов и анкеритово-кварцевого прожилкования в ороговикованных и интенсивно березитизированных породах; 4) рудные зоны распространения интенсивно березитизированных кварц-полевошпатовых метасоматитов (эндоконтакт штокообразного тела), к которым примыкают интенсивно березитизированные контактово-метаморфические породы [17, 18].

Рудоконтролирующим процессом является околотрещинный кислотный метасоматоз (березитизация), наложенный на приконтактовое вторичное окварцевание (кварц-полевошпатовый метасоматоз).

*Геохимические особенности рудопроявления.* По положению относительно рудных зон химические элементы разделяются на три группы.

Первая группа – это золото, вольфрам, мышьяк. Они характеризуются максимальными концентрациями. Первичные ореолы этих элементов достаточно надежно фиксируют пространственное положение структур рудных зон. К этой же группе можно отнести свинец и серебро. Их ореолы характеризуются невысокими значениями, но в наибольшей степени они накапливаются в рудных зонах. Для всех элементов этой группы характерно присутствие в рудах самостоятельных минеральных форм – золота, арсенопирита, шеелита, галенита (серебро в рудах золотокварцевых месторождений минералов не образует, большая его часть находится в виде примесей в золоте или в галените). Контуры ореолов золота, мышьяка и вольфрама также подчеркивают элементы геологического строения.

Вторая группа – это элементы, имеющие тенденции выноса из рудных зон – барий, марганец, цинк. Их концентрации невысоки, их моноэлементные ореолы мало контрастны и не наглядны. Эти элементы группируются в основном в тектонически переработанных гранодиорит-порфирах и верхнепермских вулканогенно-осадочных породах.

Третья группа – висмут, бериллий, молибден, олово, медь, они распределены равномерно. Медь накапливалась в надрудных породах.

Для всех рудных зон характерны аномально высокие содержания золота, мышьяка, вольфрама. Они же в пределах рудных зон распределены неравномерно. В тектонитах, занимающих надрудное положение, отмечаются повышенные содержания марганца, бария, меди, цинка, которые образуют группу элементов выноса. Незначительно обогащены тектониты мышьяком и золотом, которые в данном случае отлагались во внешней зоне эндогенного ореола рудопроявления.

Рассмотренные первичные ореолы и закономерности распределения элементов в пределах рудоносной структуры позволяют сделать следующие выводы: положение рудных зон фиксируется высококонтрастными ореолами золота, мышьяка, вольфрама, в меньшей степени – серебра и свинца; ореолы остальных элементов мало контрастны, вариации содержаний незначительны. Обособляется группа элементов, имеющая хорошо выраженную тенденцию к выносу за пределы рудных зон, – это барий, марганец, цинк, причем для бария характерен к тому же вынос в верхне- и надрудные области.



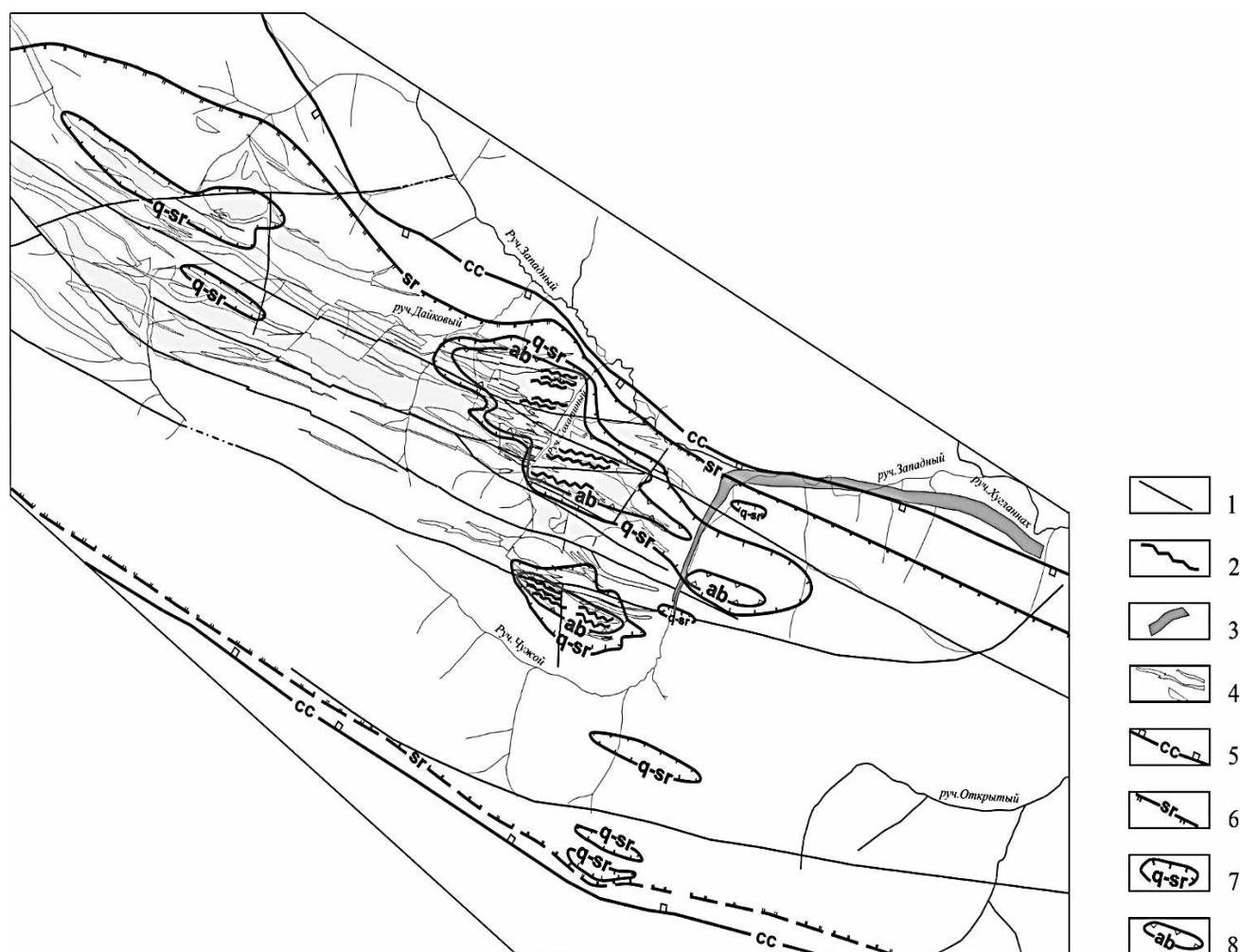


Рис. 3. Схема гидротермально-метасоматических и метаморфических образований рудопроявления Хугланнах: 1 – тектонические нарушения; 2 – рудные зоны; 3 – россыпь золота; 4 – басугуньинский интрузивный диоритово-гранитово-гранодиоритовый комплекс; 5 – границы развития полей площадного зеленокаменного изменения (приповерхностной пропилитизации) и слабой березитизации верхнепермских пород (cc) – хлорит + кальцит + серицит (берг-штриховка направлена внутрь зоны); 6 – границы развития полей березитизированных пород (sr) – серицит + кварц + пирит; 7 – границы развития полей интенсивно березитизированных верхнепермских пород (q-sr) – кварц + серицит + анкерит (кальцит) + пирит; 8 – границы полей развития кварцево-полевошпатовых метасоматитов, березитов, анкеритово-кварцевого и альбитово-кварцевого прожилкования, а также вторично окварцованных и интенсивно березитизированных верхнепермских пород и гранитоидов басугуньинского интрузивного комплекса (ab) – кварц + альбит + серицит + анкерит (кальцит) + пирит + арсенопирит / Fig. 3. Diagram of hydrothermal-metasomatic and metamorphic formations of the Hooglannach ore occurrence: 1 - tectonic disturbances; 2 - ore zones; 3 - gold placer; 4 - Basuguninsky intrusive diorite-granite-granodiorite complex; 5 - boundaries of the development of fields of areal greenstone alteration (near-surface propylitization) and weak beresitization of Upper Permian rocks (cc) - chlorite + calcite + sericite (berg hatching is directed inside the zone); 6 - boundaries of the development of fields of beresitized rocks (sr) - sericite + quartz + pyrite; 7 - boundaries of the development of fields of intensively beresitized Upper Permian rocks (q-sr) - quartz + sericite + ankerite (calcite) + pyrite; 8 - boundaries of the fields of development of quartz-feldspar metasomatites, beresites, ankerite-quartz and albite-quartz veining, as well as secondarily quarried and intensively beresitized Upper Permian rocks and granitoids of the Basugunin intrusive complex (ab) - quartz + albite + sericite + ankerite (calcite) + pyrite + arsenopyrite

Сформированная многофакторная модель рудопроявления Хугланнах включает в себя следующие элементы: 1) формационные; 2) тектонические (структурные); 3) магматические; 4) геохимические; 5) метаморфические и метасоматические; 6) минералогические. Основные прогнозно-поисковые таксоны, рассмотренные в модели, – рудное поле, месторождение. Элементы многофакторной модели приведены в таблице.



**Многофакторная модель малосульфидного золото кварцевого оруденения  
 Хугланнахского рудопоявления / Multifactorial model of low-sulfide  
 gold-quartz mineralization of the Hooglannach ore occurrence**

Элементы-признаки	Металлогенические таксоны	
	Рудное поле	Месторождение
Формационные	Приуроченность к границе распространения атканской и омчакской свит верхней перми	
Тектонические (структурные)	Общий контроль рудовмещающих структур системой протяженных тектонических нарушений северо-западного простирания: разломы Северный и Хугланнахский. Приуроченность к замыканию синклинальной складки 2-го порядка – Хугланнахской синклинали	Относительно пологий висячий контакт интрузивного тела. Системы сколовых трещин, зон дробления и растяжения, оперяющих крупные разрывные нарушения в условиях левосторонней сбросо-сдвиговой кинематики
Магматические	Выходы многофазной гранитоидной интрузии Хугланнахского штока диорит-гранодиорит-гранитной магматической формации (позднеюрский басугуньинский комплекс)	Апикальный выступ гранодиорит-гранитной интрузии четвертой фазы внедрения
Геохимические	Вторичные ореолы рассеяния золота, мышьяка, вольфрама в центральной части рудного поля; ореолы кобальта, марганца, ванадия по периферии	Наличие во вторичных ореолах рассеяния и первичных (эндогенных) ореолах контрастных аномалий золота и мышьяка, совпадающих с положением рудных зон
Метаморфические и метасоматические	Зональный, многоэтапный метасоматоз нескольких стадий: 1) ранний щелочной метасоматоз (альбитизация); 2) кислотный метасоматоз (пропилитизация и березитизация); 3) метасоматоз стадии понижающейся кислотности растворов (серицитизация, окварцевание, сульфидизация); 4) метасоматоз стадии остаточных нейтральных растворов (осаждение карбонатов)	
Минералогические	Ореолы шлиховой и россыпной золотоносности в долинах ручьёв Чужой, Западный, Хугланнах	Жильно-прожилковые зоны и зоны прожилкования штокверкового типа с вкрапленностью арсенопирита, пирита, галенита, халькопирита, сфалерита и золота

**Заключение**

Формационный тип оруденения рудопоявления Хугланнах – золоторудно-кварцевый. Это подтверждается минералогическим составом рудоносных образований (кварц, арсенопирит, галенит, золото), комплексом рудных элементов, имеющих тесные положительные корреляционные связи, – золото, мышьяк, вольфрам, а также характером рудоконтролирующих гидротермально-метасоматических процессов.

На рудопоявлении Хугланнах золото кварцевая минерализация локализована вдоль тектонической зоны северо-западного направления. Благоприятной рудовмещающей средой является северо-восточный относительно пологий висячий контакт интрузивного штокообразного тела гранодиорит-порфиров басугуньинского диорит-гранит-гранодиоритового интрузивного комплекса, а прослеживающаяся вдоль него мощная тектоническая зона играет роль экранирующей поверхности на пути следования рудоносных флюидов.

**Список источников**

1. Астахова А.А., Хардигов А.Э. Литогенез пермских толщ Аян-Юряхского антиклинория Яно-Колымской складчатой области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 1. С. 84–89.
2. Михайлов Б.К., Стружков С.Ф., Аристов В.В. Потенциал золотоносности Яно-Колымской провинции // Руды и металлы. 2007. № 5. С. 4–17.
3. Хардигов А.Э., Холодная И.А. Литолого-фациальные особенности и условия образования верхнепермских отложений Аян-Юряхского антиклинория Верхояно-Колымской складчатой области // Стратиграфия и седиментология нефтегазоносных провинций. 2010. № 1. С. 65–74.

4. Khardikov A.E., Kholodnaya I.A. Lithological conditions of gold content in the upper permian deposits of the Ayan-Yuryakh anticlinorium within the Yano-Kolyma folded region // *Stratigraphy and Sedimentology of Oil-Gas Basins*. 2010. № 1. P. 86–94.
5. Жуланова И.Л., Русакова Т.Б., Котляр И.Н. Геохронология и геохронометрия эндогенных событий в мезозойской истории Северо-Востока Азии. М.: Наука, 2007. 358 с.
6. Чехов А.Д. Тектоническая эволюция Северо-Востока Азии. М.: Научный мир, 2000. 204 с.
7. Шевченко В.М. Интрузивные комплексы верховьев реки Колымы. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1992. 83 с.
8. Акинин В.В., Прокопьев А.В., Торо Х., Миллер Э.Л., Вуден Дж., Горячев Н.А., Альшевский А.В., Бахареv А.Г., Трунилина В.А. U-Pb-SHRIMP-возраст гранитоидов Главного батолитового пояса (Северо-Восток Азии) // Докл. АН. 2009. Т. 426, № 2. С. 216–222.
9. Акинин В.В., Миллер Э., Вуден Дж., Альшевский А.В., Горячев Н.А. U-Pb SHRIMP-датирование циркона из батолитов и рудоносных даек Яно-Колымского коллизийного пояса: первые результаты и геологические следствия // Изотопное датирование процессов рудообразования, магматизма, осадконакопления и метаморфизма. М.: GEOS, 2006. С. 26–30.
10. Бяков А.С. Биостратиграфия пермских отложений Северного Приохотья (Северо-Восток Азии) // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2007. Т. 15, № 2. С. 47–71.
11. Бяков А.С., Ведерников И.Л. Стратиграфия пермских отложений северо-восточного обрамления Охотского массива, центральной и юго-восточной частей Аян-Юрхского антиклинория: препринт. Магадан: СВКНИИ ДВО АН СССР, 1990. 69 с.
12. Ганелин В.Г. Таймыро-Колымская подобласть // Основные черты стратиграфии пермской системы СССР. Тр. ВСЕГЕИ. Нов. серия. Л.: Недра, 1984. Т. 286. С. 111–142.
13. Геология СССР. Т. XXX: Северо-Восток СССР. Геологическое описание, кн. 2. М.: Недра, 1970. 536 с.
14. Легенда Неро-Бахапчинской серии государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000 / исп. Ю.М. Бычков, Н.Г. Маннафов, В.И. Шникерман и др. Магадан: Магаданский ТФГИ, 1999. Т. IV.
15. Астахова А.А., Хардииков А.Э., Холодная И.А. О роли вулканогенного материала в образовании атканской свиты Аян-Юрхского антиклинория Яно-Колымской складчатой области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 2. С. 78–85.
16. Хардииков А.Э., Парада С.Г., Холодная И.А. Литолого-фациальные условия золотоносности верхнепермских отложений Аян-Юрхского антиклинория Яно-Колымской складчатой области // Руды и металлы. 2009. № 3. С. 22–28.
17. Плющев Е.В., Шатов В.В., Кашин С.В. Металлогения гидротермально-метасоматических образований. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. 560 с.
18. Хардииков А.Э., Астахова А.А. Изучение низкотемпературного метаморфизма золотомещающих толщ Верхояно-Колымской складчатой области при проведении поисково-оценочных работ // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2017. № 3-1. С. 114–121.

## References

1. Astakhova A.A., Hardikov A.E. Permian strata lithogenesis of the Ayan-Yuryakh anticlinorium of the Yano-Kolyma folded region. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2016;(1):84-89. (In Russ.).
2. Mikhailov B.K., Struzhkov S.F., Aristov V.V. The potential of the Yano-Kolyma province gold content. *Rudy i metally = Ores and Metals*. 2007;(5):4-17. (In Russ.).
3. Hardikov A.E., Kholodnaya I.A. Lithological and facies features and conditions of Upper Permian deposits formation of the Ayan-Yuryakh anticlinorium of the Verkhoyano-Kolyma folded region. *Stratigrafiya i sedimentologiya neftegazonosnykh provintsii = Stratigraphy and Sedimentology of Oil and Gas Provinces*. 2010;(1):65-74. (In Russ.).
4. Khardikov A.E., Kholodnaya I.A. Lithological conditions of gold content in the upper Permian deposits of the Ayan-Yuryakh anticlinorium within the Yano-Kolyma folded region. *Stratigraphy and Sedimentology of Oil-Gas Basins*. 2010;(1):86-94.
5. Zhulanova I.L., Rusakova T.B., Kotlyar I.N. *Geochronology and geochronometry of endogenous events in the Mesozoic history of Northeast Asia*. Moscow: Nauka Publ.; 2007. 358 p. (In Russ.).
6. Chekhov A.D. *Tectonic evolution of Northeast Asia*. Moscow: Nauchnyi mir Publ.; 2000. 204 p. (In Russ.).
7. Shevchenko V.M. *Intrusive complexes of the Kolyma River upper reaches*. Magadan: Northeastern Integrated Research Institute FEB RAS Press; 1992. 83 p. (In Russ.).
8. Akinin V.V., Prokopiev A.V., Toro H., Miller E.L., Wooden J., Goryachev N.A., Alshevsky A.V., Bakharev A.G., Trunilina V.A. U-Pb-SHRIMP age of the Main batholith belt granitoids (Northeast Asia). *Dokl. RAN = RAS Reports*. 2009;426(2):216-222. (In Russ.).

9. Akinin V.V., Miller E.L., Wooden J., Alshevsky A.V., Goryachev N.A. U-Pb SHRIMP-dating of zircon from batholiths and ore-bearing dikes of the Yano-Kolyma collision belt: first results and geological consequences. *Isotopic dating of ore formation, magmatism, sedimentation and metamorphism*. Moscow: GEOS Publ.; 2006:26-30. (In Russ.).

10. Byakov A.S. Permian deposits biostratigraphy of the Northern Priokhotye (Northeast Asia). *Stratigrafiya. Geol. korrelyatsiya = Stratigraphy. Geological Correlation*. 2007;15(2):47-71. (In Russ.).

11. Byakov A.S., Vedernikov I.L. *Permian deposits stratigraphy of the northeastern framing of the Okhotsk massif, the central and southeastern parts of the Ayan-Yuryakh anticlinorium*: preprint. Magadan: Northeastern Integrated Research Institute FEB of the USSR Academy of Sciences Press; 1990. 69 p. (In Russ.).

12. Ganelin V.G. Taimyr-Kolyma subdistrict. *Main features of the Permian system stratigraphy of the USSR. VSEGEI Proceedings*. Leningrad: Nedra Publ.; 1984;286:111-142. (In Russ.).

13. *Geology of the USSR. Vol. 30. The North-East of the USSR. Geological description. Book 2*. Moscow: Nedra Publ.; 1970. 536 p. (In Russ.).

14. Bychkov Yu.M., Mannafov N.G., Shnikerman V.I. [et al.], comp. *Legend of the Nero-Bakhapchinsky state geological map series of the Russian Federation on a scale of 1:200 000*. Magadan: Magadan Territorial Fund of Geological Information Press; 1999;4. (In Russ.).

15. Astakhova A.A., Hardikov A.E., Kholodnaya I.A. Volcanogenic material capacity in the formation of the Ayan-Yuryakh anticlinory Atkan formation of the Yano-Kolyma folded region. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2016;(2):78-85. (In Russ.).

16. Hardikov A.E., Parada S.G., Kholodnaya I.A. Lithological and facies conditions of Upper Permian deposits gold content of the Yano-Kolyma folded region Ayan-Yuryakh anticlinory. *Rudy i metally = Ores and Metals*. 2009;(3):22-28. (In Russ.).

17. Plushev E.V., Shatov V.V., Kashin S.V. *Metallogeny of hydrothermal-metasomatic formations*. St. Petersburg: All-Russian Scientific Research Geological Institute Publishing House; 2012. 560 p. (In Russ.).

18. Hardikov A.E., Astakhova A.A. The study of gold-bearing strata low-temperature metamorphism of the Verkhoyansk-Kolyma folded region during prospecting and evaluation works. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2017;(3-1):114-121. (In Russ.).

#### **Информация об авторах**

*А.Э. Харди́ков – доктор геолого-минералогических наук, профессор, кафедра общей и инженерной геологии, Институт наук о Земле.*

*О.С. Бондарева – кандидат географических наук, доцент, кафедра общей и инженерной геологии, Институт наук о Земле.*

#### **Information about the authors**

*A.E. Hardikov – Doctor of Science (Geology and Mineralogy), Professor, Department of General and Engineering Geology, Institute of Earth Sciences.*

*O.S. Bondareva – Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of General and Engineering Geology, Institute of Earth Sciences.*

*Статья поступила в редакцию 12.04.2024; одобрена после рецензирования 18.05.2024; принята к публикации 16.10.2024.  
The article was submitted 12.04.2024; approved after reviewing 18.05.2024; accepted for publication 16.10.2024.*

Original article

UDK 551.435.627

doi: 10.18522/1026-2237-2024-4-2-139-149

## CONDITIONS FOR THE FORMATION OF LANDSLIDES IN THE TERRITORY OF THE NAKHCHIVAN AUTONOMOUS REPUBLIC

**Giyas H. Gurbanov**

*Nakhchivan Branch of the Azerbaijan National Academy of Sciences, Nakhchivan, Republic of Azerbaijan  
giyas.gurbanov92@gmail.com*

**Abstract.** The presented article investigates the geographical distribution, types, driving forces, and moisture conditions of landslides—one of the widespread slope processes in the territory of the Nakhchivan Autonomous Republic, using both traditional and modern remote sensing methods. The capabilities of the multizonal spectral images obtained during the study of landslides are thoroughly analyzed. Additionally, the geomorphological characteristics of landslides in the Nakhchivan Autonomous Republic, which have not been adequately studied, are characterized, and their impact on the formation and intensification of other natural processes, particularly mudflows, is demonstrated. As a result of the research, underground waters accumulated on various slopes have been identified, and landslide-prone slopes have been classified into four categories based on the degree of moisture. This outcome enables the prediction of the likelihood of large-scale landslides and the implementation of countermeasures in specific cases. To refine the prediction of landslide occurrence, a comparative analysis of infrared (IR) images taken at different times of the same areas was conducted, revealing a high probability of active landslides in the Batabat massif, Kechili, Boyahmed, Nasirvaz, and Khurs village settlements, as well as in the Tillak and Bichenek forests, and on the eastern and southeastern slopes of the Kuku mountain within the Nakhchivan Autonomous Republic.

**Keywords:** slope processes, moisture, gravitational force, soil composition, inclination

**For citation:** Gurbanov G.H. Conditions for the Formation of Landslides in the Territory of the Nakhchivan Autonomous Republic. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2024;(4-2):139-149. (In Russ.).

*This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).*

Научная статья

## УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОПОЛЗНЕЙ НА ТЕРРИТОРИИ НАХИЧЕВАНСКОЙ АВТОНОМНОЙ РЕСПУБЛИКИ

**Гияс Х. Гурбанов**

*Нахичеванский филиал Национальной академии наук Азербайджана, Нахичевань, Азербайджанская Республика  
giyas.gurbanov92@gmail.com*

**Аннотация.** С использованием как традиционных, так и современных методов дистанционного зондирования исследуются географическое распространение, виды, движущие силы и влажностный режим оползней — одного из распространенных склоновых процессов на территории Нахичеванской Автономной Республики. Подробно проанализированы возможности многозональных спектральных изображений, полученных при изучении оползней. Кроме того, охарактеризованы недостаточно изученные геоморфологические характеристики оползней в Нахичеванской Автономной Республике и показано их влияние на формирование и интенсификацию других природных процессов, в частности селей. В результате исследований выявлены подземные воды, скопившиеся на различных склонах, а оползнеопасные склоны классифицированы на четыре категории по степени увлажненности. Этот результат позволяет прогнозировать вероятность крупномасштабных оползней и принимать меры противодействия в конкретных случаях. Для уточнения прогноза возникновения оползней был проведен сравнительный анализ инфракрасных изображений, сделанных в разное время на одних

© Gurbanov G.H., 2024

и тех же территориях, выявивший высокую вероятность активных оползней в массиве Батабат, сельских населенных пунктах Кечили, Бойахмед, Насирваз и Хурс, а также в лесах Тиллак и Бичанак, а также на восточных и юго-восточных склонах горы Куку на территории Нахичеванской Автономной Республики.

**Ключевые слова:** склоновые процессы, влага, сила тяжести, состав почвы, уклон

**Для цитирования:** Gurbanov G.H. Conditions for the Formation of Landslides in the Territory of the Nakhchivan Autonomous Republic // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 4-2. P. 139–149.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

## Introduction

In the territory of the Nakhchivan Autonomous Republic, the significant elevation differences in the terrain, high slopes, the intensity of linear erosion, frequent seismic tremors, and various anthropogenic factors create favorable conditions for the activation and development of landslide processes. Although landslide events are spatially unevenly distributed, they are observed in almost all altitude zones. This process alters the dynamics of natural ecosystems and poses a direct threat to human life. Additionally, landslides result in the destruction of roads and infrastructure facilities. In various periods, landslides in the region have been studied by M.A. Abbasov [1], B.A. Budagov [2], S.Y. Babayev [3], N.N. Bababayli [4], N.A. Pashayev [5], N.S. Bababayli, G.H. Gurbanov, A.M. Asgarov [6], B.H. Galandarov, E.A. Mammadova, G.N. Huseynova, A.A. Mirzayev [7], S.A. Tarikhazer [8] and other individual scientists and specialists. However, the existing research has only focused on some landslides occurring in the area, without a comprehensive approach to the issue. Therefore, there is a great need for a comprehensive assessment of the factors influencing landslide formation. Considering the scope of the article, we have analyzed the geographical distribution of landslides in the autonomous republic, their types, driving forces, moisture conditions of the landslide slopes, and more.

## Studied area

The Nakhchivan Autonomous Republic, an inseparable part of Azerbaijan, currently has an exclave geographic position, bordered by Armenia to the north and northeast, Iran to the south and southwest, and a short distance from Turkey (Fig. 1). The mountainous part of the Nakhchivan Autonomous Republic predominantly consists of the Zangezur and Dereleyez mountain ranges and other numerous secondary ridges, covering a large area with elevations ranging from 1000 to 3904 meters above sea level. Tectonically, the mountainous region is part of the Small Caucasus Meganticlinorium, with the central and southern parts formed from Paleogene volcanic and volcanic-sedimentary facies. Within this facies, there are widespread intrusives of acid and intermediate composition, including granitoids, from the Third Period and Mesozoic. In the northwestern part of the region, the rocks are very ancient, formed from carbonates and terrigenous facies of the Devonian, Carboniferous, Permian, and Triassic systems [9]. Therefore, most of the landslides in the area involve deluvial sediments. Such landslides are most commonly observed along riverbanks and, to some extent, at the base of slopes where the thickness of the deluvial sediment cover increases.

Most of the area is part of the 8-point seismic zone. However, the southeastern part of the Zangezur mountain range is in the 9-point zone. The earthquake that occurred here in 1931 had a magnitude of 9. Several 9-point earthquakes have also occurred in the Kuku mountain area. According to [2], such seismic events are a major factor in the occurrence of landslides in certain areas of the Nakhchivan Autonomous Republic.

During the warm half of the year, the gray frost-covered mountains often form complex relief features due to arid-denudation and erosion-denudation processes. In addition to these erosion-denudation processes, gravitational processes are also occurring intensively. The dry summer conditions have led to a somewhat impoverished biosphere in the region. It is the only area in the Caucasus region where forests almost do not develop in a zonal manner up to the subalpine meadows. For this reason, the maximum extent of erosion observed here is 73.7%. In the intermountain plains, a semi-desert landscape reminiscent of a desert sometimes develops. Compared to the desert features and elements of Australia's Great Sandy, Victoria, and Gibson deserts, and Africa's Kalahari and Central Asia's Binkum deserts, the desert characteristics and elements here are more pronounced. It should be noted that while dwarf eucalyptus is characteristic of Australian deserts, saxaul is typical for Central Asian deserts, and baobab for the Kalahari, in the Aras Valley, xerophytic shrubs are found only sporadically in intrazonal landscapes [10]. The annual amount of sunshine here reaches 2500 hours in

the low mountains and 1900 hours in the high mountains. The annual total of solar radiation ranges from 145 to 160 kcal/cm<sup>2</sup>. Throughout the year, the evaporation deficit ranges from 100 mm (in high mountainous areas) to 900 mm (in low mountainous areas). The sharply continental climate of the region causes the absolute minimum temperature to drop to -30 °C and the absolute maximum temperature to rise above 40 °C. Analysis of multi-year (1991-2023) precipitation data shows that the average precipitation in the region is 305 mm (ranging from 203 to 515 mm). The majority of precipitation (58 %) falls during the warm half of the year. Relative humidity is low (30-50 %) in the low mountains throughout the year, while it is adequate (100-150 %) in the high mountains [11].

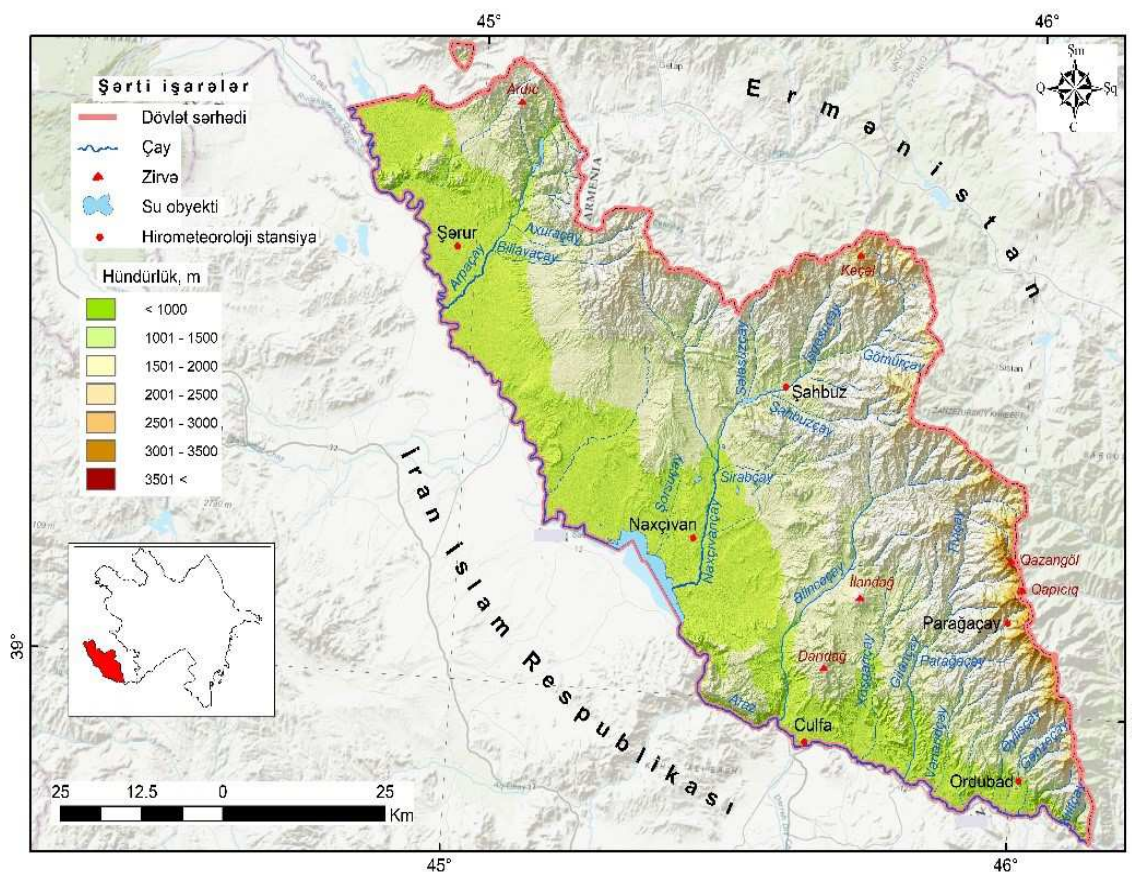


Fig. 1. The physical-geographic location of the Nakhchivan Autonomous Republic  
 / Рис. 1. Физико-географическое положение Нахичеванской Автономной Республики

The mountainous areas of the Autonomous Republic are sharply fragmented by numerous (up to 400 large and small) river valleys extending in both transverse and longitudinal directions. Due to intense erosion activity, most of the slopes of these valleys are in an unstable or near instability condition. GIS technology analyses show that slopes with inclinations greater than 30° cover nearly half of the total area (48.28 %).

### Material and methods

In addressing the problem posed in the article, primarily the traditional field expedition method was used. Additionally, references were made to topographic maps at scales of 1:25,000, 1:100,000, and 1:200,000, as well as to photo diagrams and data from various satellites such as Azersky, Landsat, and Sentinel-1. During the study, monographs, methodological guides, and map materials from experienced researchers who have conducted studies in this field in foreign countries, including Azerbaijan and the Nakhchivan Autonomous Republic, were also utilized [7, 12-15].

### Analysis and discussion

Landslides, characteristic of mountainous areas, differ in their activity and the extent of damage they cause compared to other slope processes [16]. Their formation, like other slope processes, occurs gradually. When reaching a critical threshold, driving forces overcome resisting forces, shaping the morphology

of the landslide. Often, it is not possible to eliminate the primary causes of landslides, and therefore some landslides occur rapidly in specific cases. The main driving forces are dependent on geological, hydrological, topographical, and climatic factors. Since the factors generating the driving forces are themselves influenced by many natural elements, preventing such events is rarely feasible.

This is particularly true for the gravitational force acting against the frictional forces. Various factors contribute to the disruption of equilibrium, such as the mechanical composition of rocks, their physical properties, moisture levels, and the increase in gravitational force on the slope.

Erosion, weathering, and underground vibrations are considered primary factors for driving forces. Erosion and weathering materials accumulate in valleys over many years due to the effects of gravitational flows. When the weathered materials collected at the bottom of a valley reach saturation with surface waters, the solid sliding mass starts to move in the direction of gravitational force, leading to the formation of various rapid sliding flows. Sometimes, multiple factors act simultaneously, making it difficult to determine which one is the primary driving force.

However, atmospheric precipitation should not be overlooked. Precipitation directly affects the stability of the soil and slopes. Particularly, frequent and short-duration rainfalls significantly increase the likelihood of landslides [17].

In all landslides, the initial process begins with the fragmentation of slopes. At the same time, any driving factor influences the formation, development, and activation of other factors. In such cases, these forces collectively contribute to the formation of the landslide. For example, gravitational force, rock bedding conditions, slope steepness, the presence of impermeable layers, and soil moisture content act together as primary driving forces.

Some authors, such as [10, 16], consider vegetation on slopes to be one of the primary factors mitigating landslides. However, our observations suggest that this view does not hold true in the territory of the autonomous republic, particularly in the middle and high mountain zones where slope steepness is significant. Trees, by their mass, add extra load on the slopes and simultaneously help retain soil moisture through their root systems, preventing evaporation [18]. On the other hand, in the middle and high mountain areas of the autonomous republic, strong mountain-valley winds can cause trees to move the soil, transforming them into a force that triggers landslides. This perspective is also reflected in several studies [19-21]. Thus, the impact of vegetation on landslides remains a topic of debate and discussion in some research [22].

In the initial stage of a landslide, transverse parallel cracks form on the slopes. Subsequently, the soil mass at the lower part of these cracks separates, and in areas with a large mass, the gravitational force causes the slope to begin moving downward. This movement is generally not linear. In some cases, the mass moves more rapidly in the larger sections, leading to a rotational movement of the overall mass. Typically, the volume of the detached mass ranges between 100 m<sup>3</sup> and 1 billion m<sup>3</sup> [23]. The detachment leads to the complete collapse and sliding of the slope in the next stage. This process depends on the direction of the rock movement, the size of the cracks, the composition of the soil, the moisture level of the impermeable layer, the coefficient of friction, and the steepness of the slope. In the subsequent stage, the sliding slope undergoes deformation. The deformation process occurs after the slope reaches the river valley. As a result, the lower part of the slope wrinkles, noticeable detachment occurs in some areas, trees on the surface bend and fall, and small lakes form along the creases. This part of the landslide is subject to erosion in the final stage and generally becomes sediment material.

In some cases, multiple landslides can occur on the same slope (Fig. 2). For instance, after a portion of the slope moves downward, the stationary upper part loses its stability and detaches from the main mass, moving downward freely as a separate entity. These blocks formed on the slope can also enter the sliding zone from the sides. This phenomenon is known as lateral sliding.

Typically, in large-scale landslides, the movement starts gradually, with local cracks forming on the slope, and subsequent slides developing over time (Fig. 3).

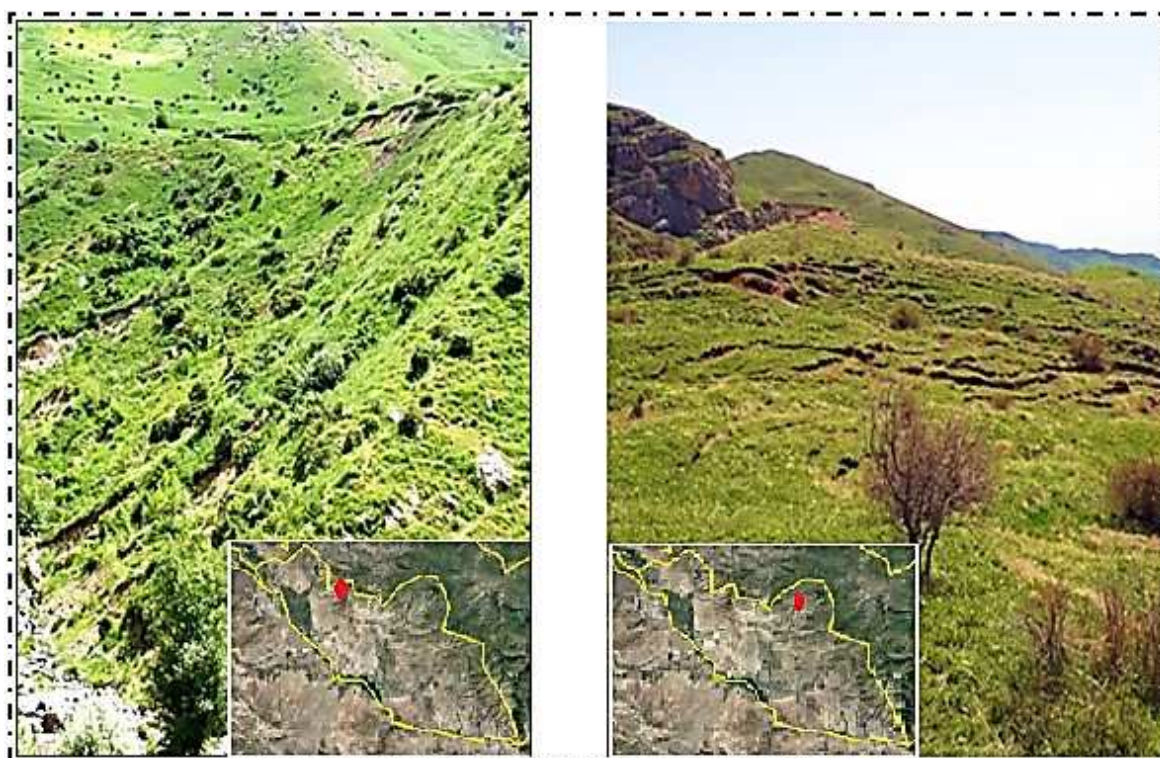
The formation and movement of these subsequent landslides can sometimes take several years to complete. For example, on the slope of the right bank of the river valley, located approximately 200 meters south of the Ashagi Batabat Lake, this process has been ongoing since 2001. The intensification of the sliding process in different years has led to the widening of the river valley (as the slope recedes due to ongoing landslide detachment).

Area-wide landslides usually consist of intact masses, but sometimes involve several blocks moving simultaneously. During movement, surface deformation is often not very pronounced and can sometimes be imperceptible.





Fig. 2. Landslide events occurring on the Same slope (Vanandchay Basin)  
/ Рис. 2. Оползни на склоне Сали (бассейн Ванандчай)



Кечили village of the Shahbuz region

Навуш village of the Sharur region

Fig. 3. Area-wide landslides in the initial stage (formation of localized cracks on the slope)  
/ Рис. 3. Начальная стадия развития оползней (локализованные трещины на склоне)

In some cases, the deformation is excessive, leading to the formation of numerous blocks on the slope. In the latter case, the landslide progresses more rapidly and typically transforms into a delapsive landslide or a glacier-type landslide. In the first case, the movement is relatively linear, whereas in the second case, the mass on the slope moves along a curved path by rotating around its axis. If the landslide covers a large area on the slope, its surface typically takes on a cylindrical shape during movement, with the cylinder's axis running parallel to the slope. In such cylindrical landslides, the upper part gradually narrows while

the lower part widens, and the central part bulges along the axis. This type of landslide is observed in the Bichenek forest, on the right bank of the Nakhivanchay River to the northwest of Bichenek village, as well as east of the previously mentioned Ashagi Batabat Lake, in the area where the valley's steepness sharply increases, on the right slope. Landslide blocks that change direction usually occur more frequently in heterogeneous rock formations. This is due to the differences in the thickness of the sliding layer, frictional forces, brittleness, moisture conditions, and specific weight in various rock types. Landslides with changing directions are rarely found in slopes composed of homogeneous rocks.

At the upper part of the slope where the landslide has occurred, a nearly perpendicular protrusion forms. In the subsequent stage, this protrusion breaks off under the influence of gravity and transforms into a relatively small landslide. As a result of this process, water collects in the depression formed at the upper part of the main landslide, further saturating the impermeable clay layer and increasing its driving force. A protrusion with a steep, amphitheater-like wall also forms at the upper part of the detached landslide. Over time, both the protrusions on the main slope and those created by the landslide collapse under the force of gravity, disintegrate, and allow a portion of the accumulated rocks to be carried away by surface runoff. Consequently, the slope stabilizes and its inclination decreases. As seen in the Bichenek, Kuku, and Zirnel landslides, due to the absence of humus, microelements, and soil layers, plant growth on the clay layer is absent for many years after the landslide.

The primary cause of the area-wide landslide occurring in the Kukuchay river basin is the erosion of the lower part of the slope, leading to a loss of stability. Additionally, numerous such area-wide landslides are present in the upper reaches of the river, particularly to the west of the Old Zirnel village. These landslides contribute to the formation of muddy floods during periods of high water flow, intense rainfall, and snowmelt, or become a component of existing floods.

Moving landslides are categorized into two groups: regressive and progressive. Landslides in the first group typically start in localized areas and then expand upwards and deeper. As mentioned earlier, a moving landslide may rotate to some extent and, in some cases, transform into a collapse due to the loss of equilibrium of the ground mass [24].

In progressive landslides, the moving mass expands downward. Some authors categorize landslides into complex, combined, repetitive, and sequential groups [12].

Complex landslides are more widespread and include not only area-wide landslides but also muddy flow slides. In these combined landslides, movement results partly from rotation and partly from the pressure of the overlying mass. Repeated landslides occur when the same type of landslide happens multiple times on the same slope. During this process, two or more blocks form. As the number of blocks increases, the overall characteristics of the landslide become more complex. In this scenario, the upper block affects the lower block and becomes the driving force for its movement. Sequential landslides occur repeatedly over a certain period, with many small blocks moving one after another in succession. In these types of landslides, individual blocks are clearly visible [12].

In the slopes where landslides occur, the rocks forming the landslide mass are usually classified into two groups. The first group includes "rocky" materials, which are characterized by their greater strength and durability. The second group, referred to as "soil", consists of unconsolidated or poorly consolidated hard, granular aggregates without organic compounds. This group is further divided into two categories: gravelly and soft soil. Gravelly soil, as its name suggests, is made up of coarse materials, with most particles larger than 2 mm. Soft soil, on the other hand, contains more than 80 % of materials with a diameter smaller than 2 mm, mainly composed of highly plastic clay and non-plastic sand [25].

In the eastern river basins of the Autonomous Republic, the landslide mass is composed of hard, coarse-grained rocks, whereas in the western river basins, it consists of soft, fine-grained rocks.

Landslide slopes can be categorized into four types based on the amount of moisture in the soil and relative humidity conditions.

1. Dry - moisture is not detectable.
2. Slightly moist - Contains non-free moisture that can barely cause plasticity and movement in the soil.
3. Moist soil - Contains enough moisture to induce movement in the soil, and this moisture can be felt on the slope surface.
4. Excessively moist - the soil is saturated with water, allowing free water flow on the slope.

In the research area, typical examples of dry landslides can be found to the west of the Zirnel River Gorge, 8 km northwest of the Bichenek village, as well as in the upper part of the Kaha Gorge, south of the Ashagi Batabat Lake with low humidity. On the other hand, landslides with moist ground can be observed in the



Kukuchay Gorge. Landslides in areas with extremely moist ground are widespread within the Bichenek forest massif. Most of these have created numerous small landslide-dammed lakes within the forest.

Overall, in the Nakhchivan Autonomous Republic, dry landslides are the most common, while extremely moist ground landslides are the least common. Groundwater, which participates in the moistening of the ground, has various forms, such as capillary, curtain water, hygroscopic water, pore water, and especially free water, all of which influence the formation of landslides to varying degrees. Only chemical bond water does not participate in the moistening of the slope.

The degree of moisture in the ground of slopes susceptible to landslides is often not easily determined visually but can be more easily assessed with the help of satellite images [26]. In this regard, near, medium, and far infrared (IR) imagery can clearly differentiate the degree of moisture on a slope through color tones. Extremely moist areas appear dark black, while less moist areas are shown in lighter tones. Using these images, slopes with a potential for landslides have been identified (Fig. 4). This is because, on inclined slopes, the flow of groundwater towards the riverbed leads to excessive moisture in the alluvial deposits. This situation weakens the structure of the alluvial deposits, causing a shift in their center of gravity and reducing their stability. Moist deposits decrease the compaction and density of the soil or rocks, causing them to move towards the riverbed. Thus, the flow of groundwater towards the riverbed on inclined slopes disrupts the stability of the deposits, leading to their sliding and movement towards the riverbed. This process, particularly as the moisture level of the alluvial deposits increases, enhances the risk of landslides and soil changes.

In the territory of the autonomous republic, the vast majority of landslides are more frequently observed in the difficult-to-access middle and high mountainous regions. For this reason, it is not possible to conduct stationary observations on these processes. Therefore, the study of landslide processes using aerospace methods allows for the acquisition of more timely and comprehensive information. Using spectral imagery taken in different ranges, the location, type, size, and other characteristics of the landslides have been studied, and a preliminary information database has been created. In the visible spectrum (340-780 nm), it is possible to accurately determine the movement direction, speed, and morphometry of the landslides, while in the near (0.7-0.9 μm), medium (0.9-3.5 μm), and far (3.5-5.0 μm) infrared (IR) ranges, it has been possible to study important factors such as the moisture conditions of the slope, and the amount and distribution of groundwater that contribute to the landslides. Analysis of the spectral brightness coefficients (SBC) of the images shows that in areas with higher concentrations of groundwater, the spectral brightness coefficient is lower, and these areas are distinguished by dark black tones. Conversely, in areas with lower concentrations of groundwater, the SBC is higher, and the tones are lighter (Fig. 5).

Using aerospace methods, subsurface waters collected from individual slopes were identified and categorized based on their moisture content into the previously mentioned dry, mildly moist, moist, and extremely moist landslide slopes. This result facilitates the determination of the likelihood of landslides occurring in the area and



Fig. 4. Identification of landslide-prone areas through the indication of groundwater in satellite imagery of the Kukuchay basin / Рис. 4. Выявление оползнеопасных территорий с помощью определения уровня грунтовых вод на спутниковых снимках бассейна р. Кюкучай

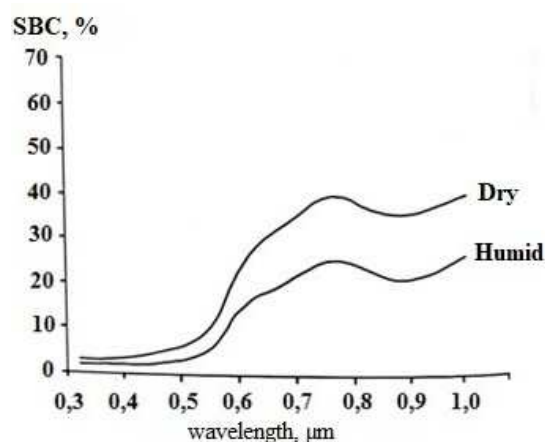


Fig. 5. Registry of changes in spectral brightness on dry and humid slopes / Рис. 5. Изменение спектральной яркости на сухих и влажных склонах

allows for targeted countermeasures to be implemented in specific cases. To refine the assessment of landslide probability, comparative analysis of infrared (IR) imagery taken at different times of the same areas was used. It was determined that the Batabat massif, Kechili, Boyahmed, Nasirvaz, and Khurs village settlements, the Tillek and Bichenek forests, and the eastern and southeast slopes of Kuku. Mountain have a high likelihood of active landslides throughout the Nakhchivan Autonomous Republic. Additionally, based on large-scale topographic maps, previous scientific-methodological articles, and field research materials, a landslide inventory map of the area was created (Fig. 6) [6, 27-29]. The map categorizes landslides and their influencing natural factors into three main categories.

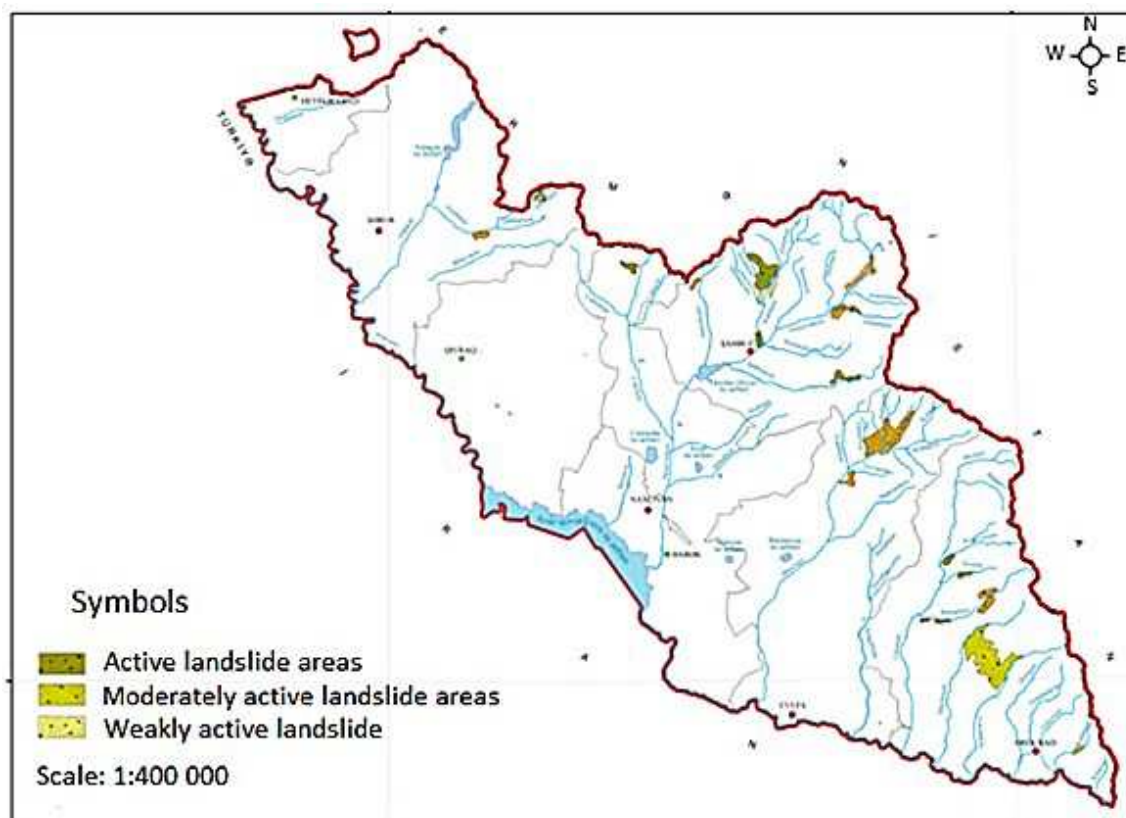


Fig. 6. Geographic distribution of landslides in the Nakhchivan Autonomous Republic  
/ Рис. 6. Географическое распределение оползней в Нахичеванской Автономной Республике

Field research and other methods and approaches indicate that the areas most vulnerable to landslides are the Nakhchivan River Gorge and its tributaries, particularly the Kuku River basin. However, landslides are developing practically along all major watercourses. Although there has been a slight increase in precipitation at the beginning of winter and spring in recent years, their tendency is observed to chaotically decrease from mid-spring to late autumn. Statistical analyses show that from 2011 to 2023, the amount of precipitation has decreased significantly, with higher reductions in Bichenek (14 %) and Shakbuz (15 %). As a result, the climatic conditions severely hinder the spatial development of landslides and regulate the stabilization of existing landslides.

The development dynamics of each landslide can be distinguished into three stages: 1) the preparation stage – the stability of the ground constituting the slope gradually decreases; 2) the actual landslide formation stage – the stability of the ground constituting the slope rapidly and sharply diminishes; 3) the existence stage – the stabilization of the landslide occurs with the restoration of ground stability. In the territory of the Nakhchivan Autonomous Republic, almost all existing landslides can be classified into the third stage. This can be explained by several reasons. Firstly, as mentioned above, the decrease in precipitation, and secondly, the lack of significant seismic activity in the autonomous republic since 2003. However, in the context of ongoing global warming, the relative stabilization of landslides is a temporary situation. This is because changing climatic conditions increase extreme precipitation and

lead to heavy rainfall over a few days. It is forecasted that this phenomenon will continue in the coming years and the number of landslides will increase.

## Results

1. The types, forms, distribution patterns, and geomorphological characteristics of landslides observed in the Nakhchivan Autonomous Republic have been thoroughly analyzed.

2. Landslide slopes have been classified based on the amount of moisture in the ground and relative moisture conditions, and areas with a high likelihood of active landslides have been identified based on this classification.

3. For the first time, an inventory map of landslides has been created for the territory of the Nakhchivan Autonomous Republic.

These results provide a starting point for more in-depth research on landslides in future studies. At the same time, studying the causes of landslide events and the geographical distribution patterns offers valuable resources for relevant institutions and can contribute to the development of effective measures against landslides.

## References

1. Abbasov M.A. *Relief of the Middle Arax depression of the adjacent mountains*. Baku: Elm Publ.; 1989. 187 p. (In Russ.).
2. Budagov B.A. Ecological-geomorphological zoning of the territory of the Republic of Azerbaijan according to the degree of ecological tension. *Materials of the scientific-practical conference dedicated to hazardous natural phenomena*. Baku: Elm Publ.; 1994. 11 p. (In Azerb.).
3. Babayev S.Y. *Geography of the Nakhchivan Autonomous Republic*. Baku: Elm Publ.; 1999. 226 p. (In Azerb.).
4. Bababayli N.N. *Water-gravitation and gravitation processes in the Nakhchivan Autonomous Republic*. Dissertation. Nakhchivan, 2005. 82 p. (In Azerb.).
5. Pashayev N.A. *Economic-geographic assessment of the impact of natural disasters on agriculture in the Republic of Azerbaijan*. Baku: AVROPA Publ.; 2018. 370 p. (In Azerb.).
6. Bababayli N.S., Gurbanov G.H., Asgarov A.M. Research on gravitational and water-gravitation processes in the Nakhchivan Autonomous Republic using aerospace methods. *Materials of the republican scientific conference dedicated to the 95th anniversary of the Nakhchivan Autonomous Republic*. Nakhchivan, 2019:326-330. (In Azerb.).
7. Galandarov B.H., Mammadova E.A., Huseynova G.N., Mirzayev A.A. Research on exogenous geological processes using aerospace methods (case of Nakhchivan AR), 21st century. *Geospatial data and space information infrastructure, innovations, efficient usage methods*. Materials of the Republican Scientific-Practical Conference. Baku, 2023:450-458. (In Azerb.).
8. Tarikhazer S.A. *Catalogue of landslide events in Azerbaijan*. Baku, 2024. 300 p. (In Azerb.).
9. Babayev Sh.A., Kangarli T.N., Mammadov A.B. *Stratigraphy of the Nakhchivan Autonomous Republic*. Baku, 2016. 965 p. (In Azerb.).
10. Bababayli N.S., Gurbanov G.H., Fatih Imat. Desert landscape and its dynamics in the Middle Arax natural region. *Current problems of modern nature and economic sciences*. Ganja: Ganja State University Press; 2019:342-344. (In Azerb.).
11. Huseynov C.S. *Research on the impact of global climate change on the precipitation regime in the territory of Azerbaijan*. Dissertation. Baku, 2022. 160 p. (In Azerb.).
12. Shuster R., Krizek R., eds. *Landslides: investigation and stabilization*. Moscow: Mir Publ.; 1981. 368 p. (In Russ.).
13. Mardanov I.I., Tarikhazer S.A., Karimova E.J., Kuchinskaya I.Y. Exogenic Relief-Forming Processes in the Azerbaijan part of Greater Caucasus. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences*. 2024;77(5):687-695.
14. Mardanov I.I. Landslide and erosion processes in the high-mountain areas of the Greater Caucasus, Azerbaijan. *Baltica*. 2024;37(1):15-23.
15. Guliyeva S., Kuchinskaya I., Tarikhazer S., Karimova E. Natural and anthropogenic factors in hazard assessment of the Alpine-Himalayan mountain ecosystems (at the example of the Azerbaijan Caucasus). *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences*. 2019;72(9):1227-1233. <https://doi.org/10.7546/CRABS.2019.09.10>.
16. Bathrellos G.D., Skilodimou H.D., Zygouri V., Koukouvelas I.K. Landslide: A recurrent phenomenon? Landslide hazard assessment in mountainous areas of central Greece. *Z. Geomorphol.* 2021;(63):95-114.
17. Mallick J., Alqadhi S., Talukdar S., Alsubih M., Ahmed M., Khan R. A., Kahla N. B., Abutayeh S.M. Risk assessment of resources exposed to rainfall induced landslide with the development of gis and rs based ensemble metaheuristic machine learning algorithms. *Sustainability (Switzerland)*. 2021;13(2):1-30. <https://doi.org/10.3390/su13020457>.



18. Imanov N., Bababayli H. Study of some geomorphological characteristics of landslides using multi-zone space images. *Materials of the All-Union Conference on Space Research*. Baku, 1984:26-28. (In Russ.).
19. Gokceoglu C., Ercanoglu M. Uncertainties related to the parameters used in the preparation of landslide susceptibility maps. *Bulletin of the Hacettepe University Earth Sciences Application and Research Center*. 2001;(23):189-206. (In Turkish).
20. Gray D.H. Influence of vegetation on the stability of slopes. *Proceedings of the International Conference on Vegetation and Slopes, Stabilisation, Protection and Ecology*. Oxford: University Museum, Thomas Telford; 1995:1-24.
21. Uzun A., Uzun S. Effects of the scattered settlement pattern and fundamental changes in land use on landslide formation in the Eastern Black Sea Coastal Zone. *Symposium on Transportation, Settlement Issues, and Solutions in Rural Areas of the Eastern Black Sea Region*. Trabzon, Turkey, 2003:30-42. (In Turkish).
22. Collinson J.C., Anderson M.G. Using a combined slope hydrology-stability model to identify suitable conditions for landslide prevention by vegetation in the humid tropics. *Earth Surf. Proc. Landforms*. 1996;(21):737-747.
23. De Freitas M.H., Waters R.J. Some Field Examples of Toppling Failure. *Geotechnique*. 1973;23(4):495-514.
24. Johnson A.M. *Physical Processes in Geology*. San Francisco: Freeman, Cooper, and Co.; 1970. 577 p.
25. Shroder J.F. Landslides of Utah. *Utah Geological and Mineralogical Survey Bulletin*. 1971;(90):51.
26. Wicki A., Lehmann P., Hauck C., Seneviratne S., Waldner P., Stähli M. Assessing the potential of soil moisture measurements for regional landslide early warning. *Landslides*. 2020;(17):1881-1896.
27. Gurbanov G.H. Landslides in the Axurachay basin. *Scientific works of the Nakhchivan Division of the Azerbaijan National Academy of Sciences. Series on Natural and Technical Sciences*. 2021;(2):283-289. (In Azerb.).
28. Imanov N., Bababayli N., Israfilov Sh. Use of aerospace information on forest cover in the study of landslide and debris flow phenomena in the Greater Caucasus region. *Aerospace Methods for Forest Research*. Krasnoyarsk: Institute of Forest and Timber of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences Press; 1984:103-104. (In Russ.).
29. *1:25000, 1:100000, 1:200000 scale maps*. Leningrad: Main Administration of Geodesy and Cartography under the USSR Council of Ministers Press; 1978-1984. (In Russ.).

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Аббасов М.А.* Рельеф среднеараксинской депрессии смежных гор. Баку: ЭЛМ, 1989. 187 с.
2. *Budaqov B.Ə.* Azərbaycan Respublikası ərazisinin ekoloji-gərginlik dərəcəsinə görə ekoloji-geomorfoloji rayonlaşması // Təhlükəli təbiət hadisələrinə həsr edilmiş elmi-praktik konfransın materialları. Bakı: Elm, 1994. 11 s.
3. *Babayev S.Y.* Naxçıvan Muxtar Respublikasının coğrafiyası. Bakı: Elm, 1999. 226 s.
4. *Bababəyli N.N.* Naxçıvan Muxtar Respublikasında su-qravitasiya və qravitasiya prosesləri. Magistr dissertasiyası. Naxçıvan, 2005. 82 s.
5. *Paşayev N.Ə.* Azərbaycan Respublikasında təbii fəlakətlərin təsərrüfata təsirinin iqtisadi-coğrafi qiymətləndirilməsi. Bakı: AVROPA, 2018. 370 s.
6. *Bababəyli N.S., Qurbanov Q.H., Əsgərov Ə.M.* Naxçıvan Muxtar Respublikası ərazisində cazibə, su-cazibə proseslərinin aerokosmik metodlarla tədqiqinə dair // Naxçıvan Muxtar Respublikasının 95 illik yubleyinə həsr olunmuş respublika elmi konfransının materialları. Naxçıvan, 2019. S. 326–330.
7. *Qələndərov B.H., Məmmədova E.A., Hüseynova G.N., Mirzəyev Ə.A.* Ekzogen geoloji proseslərin aerokosmik üsullarla tədqiqi (Naxçıvan MR misalında) XXI əsr // Geoməkan məlumatları və kosmik informasiya infrastrukturunu, innovasiyalar, səmərəli istifadə yolları: Respublika elmi-praktiki konfransının materialları. Bakı, 2023. S. 450–458.
8. *Tarixazər S.Ə.* Azərbaycan sürüşmə hadisələrinin katoloqu. Bakı, 2024. 300 s.
9. *Babayev Ş.Ə., Kəngərli T.N., Məmmədov A.B.* Naxçıvan Muxtar Respublikasının stratiqrafiyası. Bakı, 2016. 965 s.
10. *Bababəyli N.S., Qurbanov Q.H., Fatih İmat.* Orta Araz təbii vilayətində səhra landşaftı və onun dinamikası // Müasir təbiət və iqtisad elmlərinin aktual problemləri. Gəncə Dövlət Universiteti, 2019. S. 342–344.
11. *Hüseynov C.S.* Qlobal iqlim dəyişmələrinin Azərbaycan ərazisində yağıntı rejiminə təsirinin tədqiqi. Dissertasiya. Bakı, 2022. 160 s.
12. Оползни : исследование и укрепление / под ред. Р. Шустера, Р. Кризика; пер. с англ. А.А. Варги, Р.Р. Тизделя. М.: Мир, 1981. 368 с.
13. *Mardanov İ.İ., Tarikhaser S.A., Karimova E.J., Kuchinskaya İ.Y.* Exogenic Relief-Forming Processes in the Azerbaijani part of Greater Caucasus // Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences. 2024. Vol. 77, № 5. P. 687–695.
14. *Mardanov İ.İ.* Landslide and erosion processes in the high-mountain areas of the Greater Caucasus, Azerbaijan // Baltica. 2024. Vol. 37, № 1. S. 15–23.
15. *Guliyeva S., Kuchinskaya I., Tarikhaser S., Karimova E.* Natural and anthropogenic factors in hazard assesment of the Alpine-Himalayan mountain ecosystems (at the example of the Azerbaijan Caucasus) // Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences. 2019. Vol. 72, № 9. P. 1227–1233. <https://doi.org/10.7546/CRABS.2019.09.10>.

16. *Bathrellos G.D., Skilodimou H.D., Zygouri V., Koukouvelas I.K.* Landslide: A recurrent phenomenon? Landslide hazard assessment in mountainous areas of central Greece // *Z. Geomorphol.* 2021. № 63. P. 95–114.
17. *Mallick J., Alqadhi S., Talukdar S., Alsubih M., Ahmed M., Khan R. A., Kahla N. B., Abutayeh S.M.* Risk assessment of resources exposed to rainfall induced landslide with the development of gis and rs based ensemble metaheuristic machine learning algorithms // *Sustainability (Switzerland).* 2021. Vol. 13, № 2. P. 1–30. <https://doi.org/10.3390/su13020457>.
18. *Иманов Н., Бабабейли Н.* Изучение некоторых геоморфологических характеристик оползней с помощью многозональных космических снимков // *Материалы Всесоюз. конф. НПО космических исследований.* Баку, 1984. С. 26–28.
19. *Gökçeoğlu C., Ercanoğlu M.* Heyelan duyarlılık haritalarının hazırlanmasında kullanılan parametrelere ilişkin belirsizlikler // *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni.* 2001. № 23. P. 189–206.
20. *Gray D.H.* Influence of vegetation on the stability of slopes // *Proceedings of the International Conference on Vegetation and Slopes, Stabilisation, Protection and Ecology.* Oxford: University Museum, Thomas Telford, 1995. P. 1–24.
21. *Uzun A., Uzun S.* Doğu Karadeniz Kıyı Kuşağındaki Dağınık Yerleşme Dokusu ve Arazi Kullanımındaki Köklü Değişimlerin Heyelan Oluşumuna Etkileri // *Doğu Karadeniz Bölgesinde Kırsal Alanda Ulaşım, Yerleşim Sorunları ve Çözümleri Sempozyumu.* Trabzon, Türkiye, 2003. S. 30–42.
22. *Collinson J.C., Anderson M.G.* Using a combined slope hydrology-stability model to identify suitable conditions for landslides prevention by vegetation in the humid tropics // *Earth Surf. Proc. Landforms.* 1996. № 21. P. 737–747.
23. *De Freitas M.H., Watters R.J.* Some Field Examples of Toppling Failure // *Geotechnique.* 1973. Vol. 23, № 4. P. 495–514.
24. *Johnson A.M.* *Physical Processes in Geology.* San Francisco: Freeman, Cooper, and Co., 1970. 577 p.
25. *Shroder J.F.* Landslides of Utah // *Utah Geological and Mineralogical Survey Bulletin.* 1971. № 90. P. 51.
26. *Wicki A., Lehmann P., Hauck C., Seneviratne S., Waldner P., Stähli M.* Assessing the potential of soil moisture measurements for regional landslide early warning // *Landslides.* 2020. № 17. P. 1881–1896.
27. *Qurbanov Q.H.* Ахураçай hövzəsində sürüşmələr // *AMEA Naxçıvan Bölməsinin Elmi əsərləri. Təbiət və texniki elmlər seriyası.* 2021. № 2. S. 283–289.
28. *Иманов Н., Бабабейли Н., Исрафилов Ш.* Использование аэрокосмической информации о лесном покрове при исследовании оползневых и селевых явлений на территории Большого Кавказа // *Аэрокосмические методы исследования лесов : тез. докл. Всесоюз. конф. Красноярск: Ин-т леса и древесины СО АН СССР,* 1984. С. 103–104.
29. *Карты масштаба 1:25000, 1:100000, 1:200000.* Ленинград: Гл. управление геодезии и картографии при Совете министров СССР, 1978–1984.

#### **Information about the author**

*Giyas H. Gurbanov - PhD Candidate.*

#### **Информация об авторе**

*Г.Х. Гурбанов – кандидат в доктора наук.*

*Статья поступила в редакцию 01.07.2024; одобрена после рецензирования 15.09.2024; принята к публикации 16.10.2024.  
The article was submitted 01.07.2024; approved after reviewing 15.09.2024; accepted for publication 16.10.2024.*



## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция принимает рукописи статей с оригинальными результатами теоретических и экспериментальных исследований на русском, английском или французском языке. Объем рукописи строго не регламентируется. Рукописи проходят процедуру анонимного внешнего рецензирования и рекомендуются к печати редколлегией журнала на конкурсной основе. Оплата публикации производится после получения положительной рецензии и утверждения очередного номера на редколлегии. Не допускаются следующие нарушения правил публикационной этики: 1) фабрикация и фальсификация данных; 2) плагиат и самоплагиат; 3) подача рукописи в несколько журналов одновременно.

Материалы, предназначенные для публикации, могут быть представлены в редакцию одним из вариантов:

- присланы по электронной почте: [izvestiya@sfedu.ru](mailto:izvestiya@sfedu.ru);
- принесены в редакцию лично по адресу: г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 2, к. 110.

Все материалы проходят анонимное рецензирование. Рукопись, направленная авторам на доработку, должна быть возвращена в исправленном виде в течение одного месяца. По истечении этого срока она рассматривается как вновь поступившая. К переработанной рукописи необходимо приложить письмо от авторов, описывающее сделанные исправления и содержащее ответы на замечания рецензента. Рукописи авторам не возвращаются. Редколлегия вправе не вступать в переписку с автором относительно причин отказа в публикации статьи. После выхода номера высылается авторский экземпляр журнала, один на статью. Дополнительные экземпляры могут быть высланы по заявке авторов за отдельную плату. По вопросам, связанным с подготовкой и рассмотрением статей, можно обращаться в редакцию: тел. +7 (863) 218 40 00 доб. 11093, доб. 11094; e-mail: [izvestiya@sfedu.ru](mailto:izvestiya@sfedu.ru)

Статья оформляется в формате .doc или .docx (MS Word) через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Поля со всех сторон – 2,5 см. Не следует использовать знаки принудительного переноса и дополнительных пробелов, смешивать русские и латинские буквы в одном слове, набирать кириллицу сходными по начертанию латинскими буквами и наоборот. Текст должен быть написан ясным языком с понятной логикой изложения. Следует соблюдать единообразие в терминах, обозначениях, системах единиц измерения. Рекомендуется не перегружать текст сокращениями и аббревиатурами. Все сокращения должны быть расшифрованы в тексте при их первом упоминании.

К статье прилагаются на русском и английском языках следующие данные:

- сведения о каждом из авторов (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, учёная степень, звание, домашний, служебный и электронный адреса, ORCID, телефоны). Если авторов несколько, указать, с кем вести переписку;
- аннотация (1500–2000 знаков/150–200 слов);
- название статьи и фамилии авторов;
- ключевые слова (8–10);
- индекс УДК.

Единицы измерения следует давать в соответствии с Международной системой единиц (СИ).

Таблицы должны иметь заголовки на русском и английском языках; в них допускаются только общепринятые сокращения. Желательно, чтобы таблица не превышала одной страницы текста.

Надписи на рисунках должны быть на русском языке. Каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись на русском и английском языках. В печатной версии журнала публикуются только черно-белые рисунки в градации серого тона. В электронном варианте они могут быть цветными, однако должны быть различимыми и понятными при конвертации в оттенки серого тона для печатной версии. Цветные рисунки могут быть размещены в печатной версии за дополнительную плату. На все рисунки и таблицы должны быть ссылки в тексте статьи.

### Правила набора формул

Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Не допускается вставка формул в виде изображений. Все переменные, обозначаемые латинскими буквами, набираются курсивом. Векторы – прямым полужирным шрифтом без стрелочки. Матрицы – прописными буквами прямым полужирным шрифтом, если это не приводит к путанице обозначений. Греческие буквы и математические символы типа  $\sin$ ,  $\ln$ ,  $\Re$ ,  $\log$ ,  $\max$ ,  $\exp$  – прямым шрифтом. Десятичные дроби набираются с использованием запятой (а не точки).

### Список источников

Обычно имеет 15–30 наименований для обычных статей и 100 – для обзоров. Источники должны быть доступными для российских читателей. Литература приводится в порядке упоминания в конце статьи, ссылки в тексте – в квадратных скобках. Допускаются ссылки только на опубликованные материалы. При ссылке на электронный ресурс указывается дата обращения. Библиография оформляется согласно ГОСТу 7.0.5-2008. Список литературы должен быть продублирован на английском языке. Желательны ссылки на близкие по содержанию статьи в журнале «Известия вузов. Северо-Кавказский регион». Все ссылки даются на языке оригинала и нумеруются в соответствии с порядком их появления в статье. Каждый пункт списка должен содержать ссылку на один источник.

Более подробно правила для авторов см. на сайте <https://izvestiya.sfedu.ru/>

Над номером работали: Т.А. Ватульян, Л.С. Ворович, Е.М. Колосова, О.В. Назаренко, М.С. Шипитко

Подписано в печать 20.12.2024. Выход в свет 23.12.2024. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
Шрифт Times. Усл. печ. л. 17,44. Уч.-изд. л. 17,83. Тираж 250 экз. Заказ № 9789.

Адрес редакции и издателя (для переписки): 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42, ЮФУ,  
журнал «Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки»,  
e-mail: [izvestiya@sfedu.ru](mailto:izvestiya@sfedu.ru), адрес в Интернете: [www.izvestiya.sfedu.ru](http://www.izvestiya.sfedu.ru)

Адрес редколлегии: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 2, к. 110,  
тел.: +7 (863) 218-40-00 доб. 11-093; доб. 11-094.

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции  
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ,  
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 1, к 104, тел. +7 (863) 243-41-66

Magazine released: T.A. Vatulyan, L.S. Vorovich, E.M. Kolosova, O.V. Nazarenko, M.S. Shipitko

Signed print December 20, 2024. The publication December 23, 2024. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.  
Conv. print. sheets 17.44. Publ. sign. 17.83. Edition 250 copies. Order number 9789.

Address of Editorial Board: 344006, Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya St., 105/42,  
SFU, journal “Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science”,  
e-mail: [izvestiya@sfedu.ru](mailto:izvestiya@sfedu.ru), Web Address: [www.izvestiya.sfedu.ru](http://www.izvestiya.sfedu.ru)

Address of Editorial Board: 344090, Rostov-on-Don, Stachki Ave, 200/1, build. 2, room 110,  
phone +7 (863) 218-40-00 ext. 11-093; ext. 11-094.

Printed in the printing department, and corporate souvenirs,  
Publishing and printing complex KIBI MEDIA CENTER, SFU,  
344090, Rostov-on-Don, Stachki Ave, 200/1, build. 1, room 104, phone (863) 243-41-66

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
«ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ.  
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН. ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ»**

Рецензируемый журнал «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки» продолжает приём работ. Он имеет статус центрального издания и включён в перечень ВАК по следующим отраслям:

- физико-математические науки (математика, механика);
- науки о Земле.

Принимаются работы и по другим отраслям науки. Также печатаются материалы в разделах «Заметки о книгах», «Научная жизнь», «Штрихи к портрету».

Журнал издается с периодичностью 4 номера в год. С электронной версией можно ознакомиться на сайте Научной электронной библиотеки [http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=7362](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7362). Опубликованные статьи индексируются в российских и международных электронных библиотеках и наукометрических базах данных: РИНЦ (RSCI), РУКОНТ, «Киберленинка», ЭБС «Университетская библиотека онлайн», ИВИС, Ulrich, EBSCO, Chemical Abstracts. Журнал включен в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science.

Авторы, сохраняя за собой авторские права на работу и передавая журналу «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» право первой публикации, автоматически принимают на себя обязательство не печатать её ни полностью, ни частично в каком-либо издании без указания ссылки на оригинальную публикацию в этом журнале.

Издательские услуги оплачиваются организацией или автором после утверждения статьи на редколлегии.

Оформление работ осуществляется согласно правилам:

1. Представляется статья в электронном виде. Перед заголовком указать индекс УДК.
2. Статья оформляется в формате .doc или .docx (MS Word) через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman размером 14 пт, страницы пронумерованы.
3. Сведения об авторах с указанием автора, ответственного за переписку, на русском и английском языках. Экспертное заключение.
4. Полное название организации на русском и английском языках.
5. Название статьи и фамилии авторов на русском и английском языках.
6. Аннотация на русском и английском языках (1000–1500 знаков / 150–200 слов).
7. Ключевые слова на русском и английском языках (8–10 слов).

Журнал распространяется по подписке через объединённый каталог «Пресса России», интернет-каталог «Пресса по подписке». Подписной индекс – 70415 (подписка на полугодие).

Адрес для переписки: 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, ЮФУ, редакция журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки».

Тел./факс главной редакции (863) 218-40-00, добавочный 11-093, 11-094.

Е-mail: [izvestiya@sfedu.ru](mailto:izvestiya@sfedu.ru)

Адрес в Интернете: [www.izvestiya.sfedu.ru](http://www.izvestiya.sfedu.ru)