

ISSN 1026–2237

DOI 10.18522/1026–2237

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2022

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, чл.-корр. 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.Б. Климентов – доктор физ.-мат. наук, профессор, 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. Фатталь – 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, Corresponding Member, 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.B. Klimentov - Doctor of Physics and Mathematics, 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 10.18522/1026-2237-2022-4-2

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
Издаётся с 1973 г.
Периодичность серии 4 номера в год
№ 4-2 (216-2) 2022 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 (216-2) 2022

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

| | | | |
|--|----|---|----|
| Биарсланов А.Б., Джалалова М.И., Гаджиев И.Р., Асгерова Д.Б., Осипова С.В. Применение космических снимков в исследованиях постпирогенных территорий Северо-Западного Прикаспия | 4 | Biarslanov A.B., Dzhalalova M.I., Gadzhiev I.R., Asgerova D.B., Osipova S.V. Application of Space Images in Studies of Post-Fire Territories of the North-Western Caspian | 4 |
| Ерохин Ю.В., Хиллер В.В. Герхардит и ликазит из родингитов Баженовского офиолитового комплекса (Средний Урал) | 13 | Erokhin Yu.V., Khiller V.V. Gerhardtite and Likasite from Rodingites of Bazhenovsk Ophiolite Complex (Middle Urals) | 13 |
| Жарикова Е.А., Голодная О.М., Попова А.Д. Экологическое состояние почв придорожной полосы автомагистрали Уссурийск – Пограничный на приграничной территории ... | 21 | Zharikova E.A., Golodnaya O.M., Popova A.D. Ecological State of Roadside Soils of the Ussuriysk - Pogranichny Highway on the Border Territory | 21 |
| Латышева Л.А. Органическое вещество гранулометрических фракций и его роль в формировании морфогенетического своеобразия буроземов острова Русский | 28 | Latysheva L.A. Organic Matter of Particle-Size Fractions and Its Role in the Formation of Morphogenetic Specificity of Burozems on Russky Island | 28 |
| Лутфуллин Р.Н. Влияние глубинного положения кровли пласта С _{2b} и межсолевых мульд на добычные возможности скважин левобережной части Астраханского газоконденсатного месторождения | 38 | Lutfullin R.N. The Influence of the Deep Position of the Roof of the С _{2b} Formation and Salt Swally on the Production Capabilities of Wells in the Left-Bank Part of the Astrakhan Gas Condensate Field | 38 |
| Назаренко О.В. Изменение увлажнения в Ростовской области за период 1966–2019 годов | 45 | Nazarenko O.V. Moisture Changes in the Rostov Region in 1966-2019 | 45 |
| Радионов А.А. Математическая модель равновесия столба сжимаемой атмосферы. Часть 2: Стационарные решения для давления и плотности | 53 | Radionoff A.A. Mathematical Study of Equilibrium of the Column of Compressible Atmospheric Air. Part 2: Stationary Solutions for Pressure and Density | 53 |
| Саттар-заде Н.А., Имамвердиев Н.А. Геохимические особенности и зональность залежи Филизчайского колчеданно-полиметаллического месторождения (южный склон Большого Кавказа) | 60 | Sattar-zadeh N.A., Imamverdiyev N.A. Geochemical Features and Zoning of the Filizchay Pyrite-Polymetallic Deposit (Southern Slope of the Greater Caucasus) | 60 |

| | | | |
|--|----|--|----|
| Федоров Ю.А., Костенко Д.Ф., Доценко И.В. Поведение миграционных форм никеля в воде по континууму «эстуарий реки Миус – Таганрогский залив Азовского моря»..... | 77 | Fedorov Yu.A., Kostenko D.F., Dotsenko I.V. Behavior of Nickel's Migration Forms in Water Along the Continuum “The Mius River's Estuary - the Taganrog Bay of the Azov Sea” | 77 |
| Хаванский А.Д., Латун В.В., Бессмертный И.В. Комплексная оценка пространственного развития Ростовской области..... | 90 | Khavansky A.D., Latun V.V., Bessmertny I.V. Comprehensive Assessment of the Spatial Development of the Rostov Region | 90 |
| Харитонов А.Л. Геолого-геофизические исследования кольцевых геоморфологических структур на территории юга Русской платформы и перспективы поисков месторождений нефти и газа..... | 99 | Kharitonov A.L. Geological and Geophysical Studies of Ring Geomorphological Structures in the South of the Russian Platform and Prospects for Oil and Gas Exploration | 99 |

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

| | | | |
|---|-----|---|-----|
| Кузьмина Н.М., Федоров А.В., Николаев Н.В. Особенности фенологии и перспективность интродукции представителей рода <i>Hydrangea</i> в условиях Среднего Предуралья | 108 | Kuzmina N.M., Fedorov A.V., Nikolaev N.V. Features of Phenology and Prospects for the Introduction of Representatives of the Genus <i>Hydrangea</i> in the Conditions of the Middle Urals | 108 |
| Цепина Н.И., Колесников С.И., Минникова Т.В., Тимошенко А.Н., Казеев К.Ш. Сравнительная оценка экотоксичности четырех химических форм серебра по ферментативной активности почвы | 118 | Tsepina N.I., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Timoshenko A.N., Kazeev K.Sh. Comparative Assessment of the Ecotoxicity of Four Chemical Forms of Silver by the Enzymatic Activity of the Soil | 118 |
| Чохели В.А., Дмитриев П.А., Козловский Б.Л., Степаненко В.В., Дмитриева А.А., Бушкова А.А., Раджпут В.Д., Купрюшкин Д.П., Капралова О.А., Вардунни Т.В. Идентификация фитопатогенов сельскохозяйственных культур с применением генетических методов и технологий дистанционного зондирования Земли | 125 | Chokheli V.A., Dmitriev P.A., Kozlovsky B.L., Stepanenko V.V., Dmitrieva A.A., Bushkova A.A., Rajput V.D., Kupryushkin D.P., Kapralova O.A., Varduny T.V. Identification of Phytopatogenes of Agricultural Crops Using Genetic Methods and Remote Sensing Technologies | 125 |
| Шхатацев А.К., Грабенко Е.А., Казеев К.Ш. Биологическая активность буроземов в молодых «окнах» полога леса Кавказского биосферного заповедника..... | 139 | Shkhapatsev A.K., Grabenko E.A., Kazeev K.Sh. Biological Activity of Burozems in Young “Windows” of the Forest Canopy of the Caucasus Biosphere Reserve | 139 |

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

| | | | |
|--|-----|---|-----|
| Доценко И.В., Назаренко О.В., Федоров Ю.А., Положенцев А.Г. Выдающийся географ, исследователь, педагог (к 85-летию Виктора Трофимовича Богучарского)..... | 148 | Dotsenko I.V., Nazarenko O.V., Fedorov Yu.A., Polojentsev A.G. Outstanding Geographer, Researcher, Teacher (to the 85th Anniversary of Viktor Trofimovich Bogucharskov)..... | 148 |
| Колесников С.И., Тихонов А.В. Защитник природы степей (к 85-летию Виктора Аркадьевича Миноранского)..... | 151 | Kolesnikov S.I., Tikhonov A.V. Steppe Nature Protector (to the 85th Anniversary of Viktor Arkadyevich Minoransky)..... | 151 |

BIOLOGICAL SCIENCES

OUR PERSONS

НАУКИ О ЗЕМЛЕ SCIENCES OF EARTH

Научная статья
УДК 502.57(252.51):614.84
doi: 10.18522/1026-2237-2022-4-2-4-12

ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПОСТПИРОГЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПРИКАСПИЯ

А.Б. Биарсланов^{1✉}, М.И. Джалалова², И.Р. Гаджиев³, Д.Б. Асгерова⁴, С.В. Осипова⁵

^{1,2,3,4,5} Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

¹ab.biarсланov@mail.ru✉

²d.marina.66@mail.ru

³gislam@bk.ru

⁴asdi7408@mail.ru

⁵sosipova74@mail.ru

Аннотация. Рассматривается опыт применения материалов космической съемки спутника Landsat 8 для определения значений температур поверхности земли по данным канала Thermal Infrared. Данный опыт имеет важное значение в выявлении факторов, способствующих возникновению степных пожаров, оценке их последствий в условиях аридного климата Юга России.

Проведен анализ разносезонных космических снимков (КС) за 2018–2020 гг. с охватом наиболее крупных по площади пожаров, находящихся на территории Терско-Кумской низменности. КС отбирались по принципу – сцены, предшествующие событию пожара и после него, в различные сезоны года. На КС визуально были выделены пожары и заложены линейные профили. Линейные профили на КС закладывались таким образом, чтобы охватить одинаково территорию, подвергнувшуюся пожарам, и негорелую часть ландшафта. Протяженность профиля составила 1 км, точки закладывались с интервалом в один пиксель (30 м) и такой же шириной. Направление профиля с севера на юг с учетом однородности рельефа, ландшафта и характера землепользования. В результате по анализируемым отрезкам с использованием QGIS3 выполнено измерение температуры подстилающей поверхности для каждой точки профиля.

Установлено, что температурный режим прибрежной полосы отличается от континентальной части, что связано с близостью водных объектов, гидроморфизмом почвенного и растительного покровов, смещением периодов вегетации. В естественном, допозарном состоянии растительность во многом нивелирует температурный фон поверхности за счет частичного затенения поверхности и образования особых микроклиматических условий в приповерхностном слое. Полученные данные постпозарных снимков свидетельствуют о том, что температурные различия между горелыми и негорелыми участками максимальны в летний период (до 4 °С) и сохраняются в течение всех теплых сезонов года, вплоть до наступления постоянных отрицательных температур.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, степные пожары, температурный режим

Благодарности: работа выполнена по темам госзаданий: ПИБР ДФИЦ РАН (№ FMSW-2022-0032) «Мониторинг и прогноз динамики почвенного покрова и биопродуктивности ландшафтов Северо-Западного Прикаспия и дагестанской части Восточного Кавказа», лаборатории КИПР ДФИЦ РАН (№ FMSW-2022-0036) «Комплексное исследование почвенных, растительных и водных ресурсов и мониторинг экосистем в условиях Дагестана».

Для цитирования: Биарсланов А.Б., Джалалова М.И., Гаджиев И.Р., Асгерова Д.Б., Осипова С.В. Применение космических снимков в исследованиях постпирогенных территорий Северо-Западного Прикаспия // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 4-2. С. 4–12.

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

Original article

APPLICATION OF SPACE IMAGES IN STUDIES OF POST-FIRE TERRITORIES OF THE NORTH-WESTERN CASPIAN

A.B. Biarslanov^{1✉}, M.I. Dzhalalova², I.R. Gadzhiev³, D.B. Asgerova⁴, S.V. Osipova⁵

^{1,2,3,4,5} Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

¹ab.biarslanov@mail.ru✉

²d.marina.66@mail.ru

³gislam@bk.ru

⁴asdi7408@mail.ru

⁵sosipova74@mail.ru

Abstract. The paper considers the experience of using space imagery materials from the Landsat 8 satellite to determine the values of the earth's surface temperatures according to the data of the thermal infrared channel. This experience is important in identifying the factors contributing to the emergence of steppe fires, assessing their consequences in the arid climate of the South of Russia.

An analysis of multi-season space images (SI) for the period 2018-2020 was carried out covering the largest fires in terms of area located on the territory of the Tersko-Kuma lowland. SI were selected according to the principle - the scenes preceding the fire event and after it in different seasons of the year. Fires were visually identified at the SI and linear profiles were laid. Linear profiles at the SI were laid in such a way as to cover equally the territory subjected to fires and the non-burnt part of the landscape. The length of the profile was 1 km, the points were laid with an interval of one pixel (30 m) and the same width. The direction of the profile is from north to south, taking into account the uniformity of the relief, landscape and land use. As a result, for the analyzed segments, using QGIS3, the temperature of the underlying surface was measured for each point of the profile.

It has been established that the temperature regime of the coastal strip differs from the continental part, which is associated with the proximity of water bodies, the hydromorphism of soil and vegetation, and the shift in vegetation periods. In the natural state before the fire, the vegetation largely levels the temperature background of the surface due to the partial shading of the surface and the formation of special microclimatic conditions in the near-surface layer. The data obtained from post-fire images indicate that the temperature differences between the burnt and unburned areas are maximum in summer (up to 4 °C) and persist throughout all warm seasons of the year, up to the onset of constant negative temperatures.

Keywords: remote sensing, steppe fires, temperature regime

Acknowledgments: the work was carried out on the topics of state assignments: PIBR of the Russian Academy of Sciences (No. FMSW-2022-0032) "Monitoring and forecasting of soil cover dynamics and bioproductivity of landscapes in the North-Western Caspian region and the Dagestan part of the Eastern Caucasus", Laboratory of Integrated Research of Natural Resources of the RAS (No. FMSW-2022-0036) "Comprehensive study of soil, plant and water resources and monitoring of ecosystems in the conditions of Dagestan".

For citation: Biarslanov A.B., Dzhalalova M.I., Gadzhiev I.R., Asgerova D.B., Osipova S.V. Application of Space Images in Studies of Post-Fire Territories of the North-Western Caspian. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(4-2):4-12. (In Russ.).

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

В последнее десятилетие регион Западного Прикаспия является объектом повышенного внимания исследователей, в том числе и ввиду усиления антропогенного воздействия [1–3]. Изучаются факторы деградации почвенного покрова, вызванные добычей подземных вод, минерального сырья, возникновением пожаров, которые и рассматриваются подробно в данной работе.

Тенденции к увеличению количества и площади возгорания характерны как для аридных, так и гумидных условий формирования ландшафтов [4, 5], что может свидетельствовать о макрорегиональном охвате процессов активизации пожаров. Воздействию степных пожаров только на территории Терско-Кумской низменности за 2018–2020 гг. было подвержено, по предварительной оценке, около 15 тыс. га, что насчитывает около 5 очагов возгорания.

По данным дистанционного зондирования, предоставляемым онлайн-сервисом Earth Explorer, было определено местоположение пожаров. Проведены предварительные рекогносцировочные работы по полигонам, расположенным в центральной части Терско-Кумской низменности и в береговой полосе Кизлярского залива.

Роль и последствия пожаров, их воздействие на почвенный покров, продолжительность процессов восстановления остаются актуальными до настоящего времени, меняются только подходы и методы оценки. В нашем исследовании мы предлагаем анализ особенностей температурных режимов подстилающей поверхности и оценку продолжительности восстановительных процессов посредством дистанционных методов исследования.

В 2018 г. произошёл пожар в центральной части Терско-Кумской низменности. Информация об этом поступила из новостных лент средств массовой информации, что и послужило толчком к проведению исследования на данной территории. В последующем средствами онлайн-сервиса Earth Explorer были получены космоснимки по дате, максимально близкой к дате возникновения пожара (рис. 1а). При проведении полевых исследований уточнено местоположение гарей и их фиксация посредством GPS-приемника. В результате были уточнены дешифровочные признаки гарей, послужившие ключом к дальнейшему определению мест пожаров на приморской полосе Кизлярского залива в июле 2020 г. (рис. 1б).

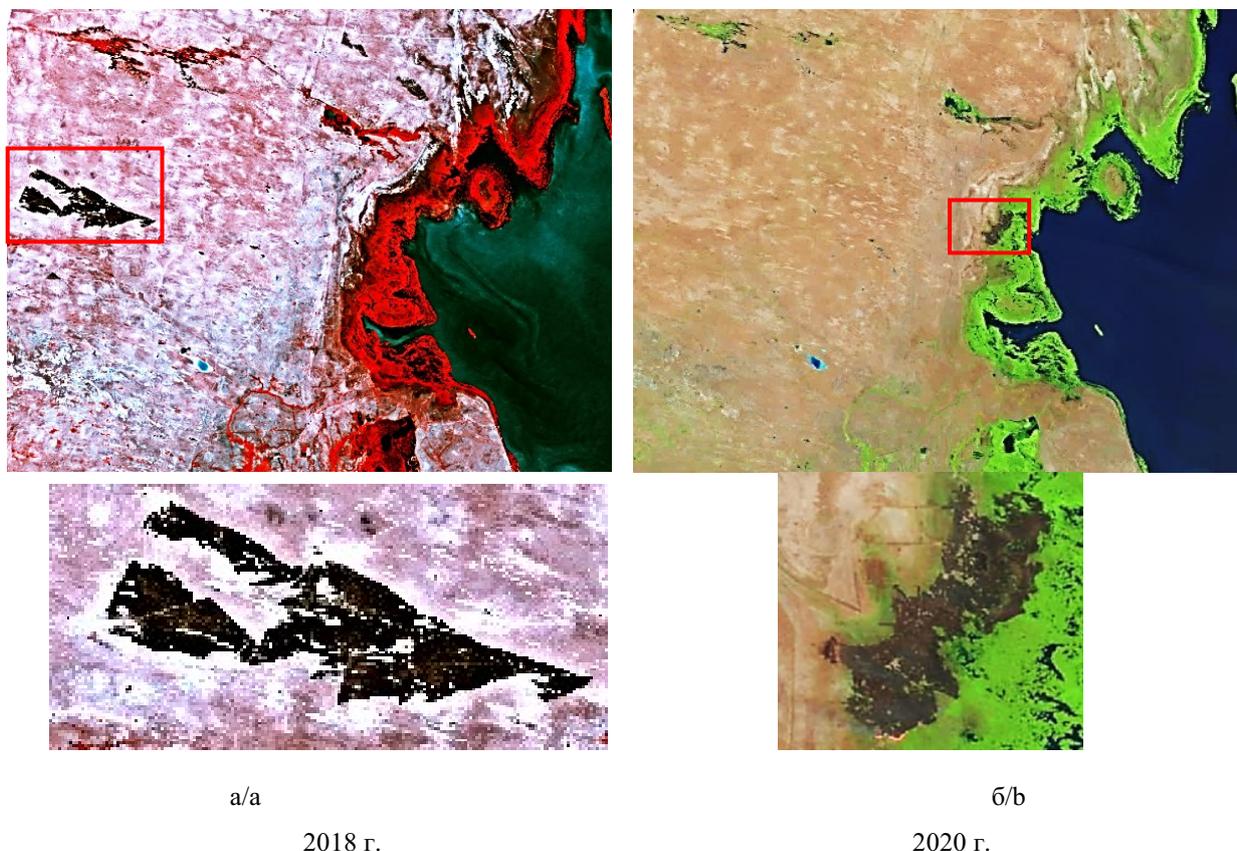


Рис. 1. Местоположение полигонов (данные спутника Landsat): а – в континентальной части; б – в приморской части / Fig. 1. Location of polygons (data from Landsat satellites): a - in the continental part; b - in the coastal part

Материалы и методы

В исследовании применялись материалы космической съемки спутника Landsat 8 [6]. Значение температур поверхности земли определяли по данным канала Thermal Infrared.

Для сравнительного анализа температурных показателей создан каталог разносезонных снимков за период 2018–2020 гг. с охватом наиболее крупных по площади пожаров, находящихся на территории Терско-Кумской низменности.

Каталог снимков включает в себя сцены, предшествующие событию пожара и после него, в различные сезоны года. Съемка изображений производилась в одно и то же время (07.03 по местному времени), что позволяет сравнивать полученные данные (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Каталог использованных снимков Landsat / Catalog of used Landsat images

| Состояние ландшафтов/ назначение | Дата пожара 27.05.2018 г. | | Состояние ландшафтов/ назначение | Дата пожара 04.07.2020 г. | |
|---|------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| | Дата съемки | Год съемки – день в году | | Дата съемки | Год съемки – день в году |
| Предпожарное | 26.04.2018 | 2018–116 | Предпожарное /луг (сенокосение) | 26.04.2018 | 2018–116 |
| Постпожарное / выпас скота (пастбище) | 28.05.2018 | 2018–148 | | 28.05.2018 | 2018–148 |
| | 13.06.2018 | 2018–164 | | 13.06.2018 | 2018–164 |
| | 16.08.2018 | 2018–228 | | 16.08.2018 | 2018–228 |
| | 12.03.2019 | 2019–071 | | 12.03.2019 | 2019–071 |
| | 31.05.2019 | 2019–151 | | 31.05.2019 | 2019–151 |
| | 16.06.2019 | 2019–167 | | 16.06.2019 | 2019–167 |
| | 02.07.2019 | 2019–183 | | 02.07.2019 | 2019–183 |
| | 18.07.2019 | 2019–199 | | 18.07.2019 | 2019–199 |
| | 19.08.2019 | 2019–231 | | 19.08.2019 | 2019–231 |
| | 11.09.2019 | 2019–254 | | 11.09.2019 | 2019–254 |
| | 22.10.2019 | 2019–295 | | 22.10.2019 | 2019–295 |
| | 23.11.2019 | 2019–327 | | 23.11.2019 | 2019–327 |
| | 30.03.2020 | 2020–090 | | 30.03.2020 | 2020–090 |
| | 15.04.2020 | 2020–106 | | 15.04.2020 | 2020–106 |
| | 04.07.2020 | 2020–186 | Постпожарное | 04.07.2020 | 2020–186 |
| 12.08.2020 | 2020–225 | 12.08.2020 | | 2020–225 | |
| 08.10.2020 | 2020–282 | 08.10.2020 | | 2020–282 | |

Данные космической съемки прошли стандартный уровень геометрической и радиометрической подготовки. На снимках визуально выделялись места пожаров и закладывались линейные профили с охватом неповрежденных ландшафтов.

Линейный профиль на снимке закладывался таким образом, чтобы охватить одинаково горелую и негорелую часть ландшафта с интервалом в один пиксель (30 м) протяженностью 34 пикселя, т.е. 1 км, и шириною в один пиксель. Направление профиля с севера на юг с учетом однотипности рельефа, ландшафта и характера землепользования.

Результаты и обсуждение

Таким образом, было заложено два профиля протяженностью 1 км каждый – 500 м на горелом участке и 500 м на неповрежденном участке. В результате по анализируемым отрезкам с использованием QGIS3 выполнено измерение температуры подстилающей поверхности для каждой точки профиля.

Согласно полученным данным, по указанному выше каталогу снимков проведен анализ температурного фона. Построена серия диаграмм с шагом 1 °С, достаточным для сопоставления различий между горелыми и негорелыми участками, и это позволяет оценить характер восстановления в различных типах ландшафтов (рис. 2). Данные спутника Landsat [7] имеют точность показателей температурных данных подстилающей поверхности в пределах от 1,3 до 2 °С.

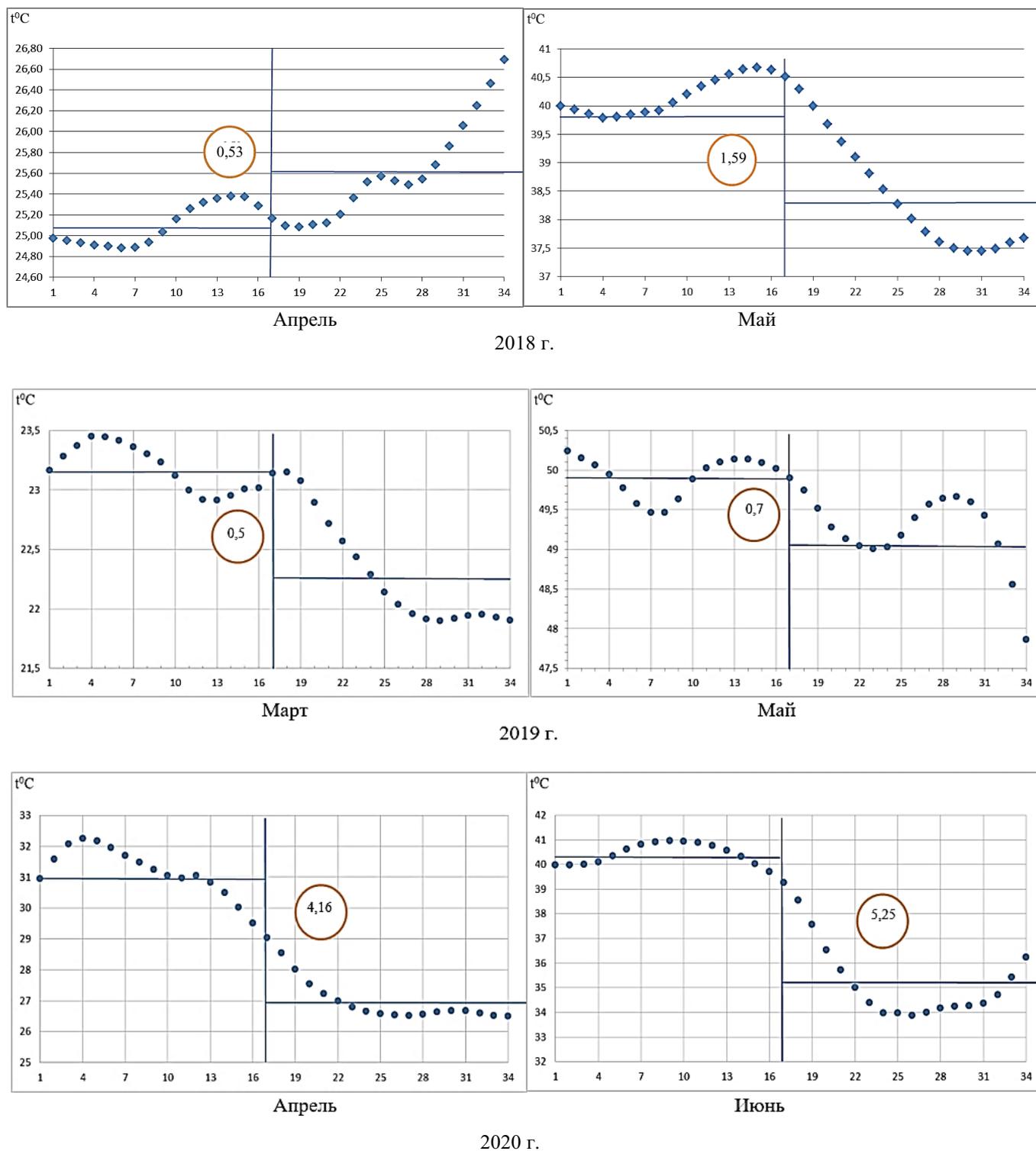


Рис. 2. Анализ сравнения температур приземного слоя опытных и контрольных участков / Fig. 2. Analysis of the comparison of temperatures of the surface layer of the experimental and control areas

Период вегетации эфемерной растительности в континентальной части Терско-Кумской низменности приходится на период с марта по июнь и отражает характерную особенность и различия температуры опытного и контрольного участков [8, 9]. До возникновения пожара показатели температуры опытного участка ниже контроля. В последующее время и непосредственно после пожара наблюдается обратная картина: температура на опытном участке выше показателей контрольного участка.

Проведенная оценка различий показателей температурного режима опытных и контрольных участков по t-критерию Стьюдента подтверждает, что контроль превышает пирогенный почти по всем месяцам, даже до возгорания, но в месяц возгорания значения противоположны.

В континентальной части контрольный участок имеет более высокий температурный режим, чем пирогенный (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Оценка различий показателей температурного режима опытных и контрольных участков по t-критерию Стьюдента (континентальная часть) / Evaluation of differences in the indicators of the temperature regime of experimental and control plots according to Student's t-test (continental part)

| Месяц | Среднее (опыт) | Среднее (контроль) | t-знач. | p |
|----------|----------------|--------------------|----------|----------|
| 2018 | | | | |
| Апрель | 25,10231 | 25,62695 | -4,09093 | 0,000271 |
| Май | 40,18402 | 38,39110 | 7,185445 | 0,000000 |
| Июнь | 28,38950 | 35,62710 | -8,97728 | 0,000000 |
| Август | 37,99703 | 38,44846 | -4,68079 | 0,000050 |
| 2019 | | | | |
| Март | 23,18210 | 22,27910 | 7,717494 | 0,000000 |
| Май | 49,91963 | 49,21935 | 5,435822 | 0,000006 |
| Июнь | 47,22757 | 46,43435 | 2,908982 | 0,006544 |
| Июль № 1 | 34,70806 | 34,39170 | 4,457276 | 0,000095 |
| Июль № 2 | 40,23252 | 39,39115 | 5,355483 | 0,000007 |
| Август | 37,18024 | 39,11787 | -4,40953 | 0,000109 |
| Сентябрь | 32,28396 | 31,85433 | 6,479919 | 0,000000 |
| Октябрь | 23,51995 | 23,10717 | 5,026971 | 0,000018 |
| Ноябрь | 3,114117 | 2,640323 | 3,327102 | 0,002214 |
| 2020 | | | | |
| Март | 23,31776 | 23,63014 | -7,44021 | 0,000000 |
| Апрель | 31,08142 | 26,91607 | 15,79243 | 0,000000 |
| Май | 31,08142 | 26,91607 | 15,79243 | 0,000000 |
| Июнь | 40,36762 | 35,12094 | 14,72599 | 0,000000 |
| Июль | 41,18223 | 40,22624 | 9,570305 | 0,000000 |
| Август | 32,29392 | 36,10475 | -8,20829 | 0,000000 |
| Октябрь | 24,28043 | 23,38320 | 10,30161 | 0,000000 |

Температурный режим прибрежной полосы отличается от континентальной, что связано с близостью водных объектов, гидроморфизмом почвенного и растительного покровов, смещением периодов вегетации. Здесь необходимо отметить, что не выявлено четких закономерностей в температурном режиме опытного и контрольного участков.

В приморской части оценка различия показателей температурного режима опытных и контрольных участков по t-критерию Стьюдента имеет следующие результаты (табл. 3).

В апреле и августе различия достоверны, но только на уровне $p < 0,05$.

В 2019 г. отмечены недостоверные различия в марте и июне. В августе-сентябре различия между участками наиболее существенные. В июле 2020 г. во время пожара различия по средним значениям большие, но они недостоверны из-за большого размаха значений внутри групп. Так же, как и в 2019 г., в 2020 г. в марте нет достоверных различий.

Таблица 3 / Table 3

Оценка различий показателей температурного режима опытных и контрольных участков по t-критерию Стьюдента (приморская часть) / Estimation of differences in the indicators of the temperature regime of the experimental and control plots according to Student's t-test (seaside part)

| Месяц | Среднее (опыт) | Среднее (контроль) | t-знач. | p |
|----------|----------------|--------------------|----------|----------|
| 2018 | | | | |
| Апрель | 23,36901 | 23,57063 | -2,44213 | 0,020307 |
| Май | 23,03087 | 22,31447 | 6,528168 | 0,000000 |
| Июнь | 24,58467 | 25,08570 | -3,90467 | 0,000457 |
| Август | 29,48778 | 29,29453 | 2,642184 | 0,012641 |
| 2019 | | | | |
| Март | 17,05650 | 16,97013 | 1,226216 | 0,229064 |
| Май | 36,70988 | 31,38519 | 10,84406 | 0,000000 |
| Июнь | 29,23048 | 29,17502 | 0,843789 | 0,405051 |
| Июль № 1 | 25,38294 | 25,21832 | 2,175319 | 0,037105 |
| Июль № 2 | 34,76004 | 29,65129 | 13,70061 | 0,000000 |
| Август | 41,01164 | 33,85681 | 19,52945 | 0,000000 |
| Сентябрь | 33,15795 | 29,32704 | 18,27512 | 0,000000 |
| Октябрь | 18,18891 | 18,38128 | -9,28203 | 0,000000 |
| Ноябрь | 0,151847 | 0,411594 | -5,91193 | 0,000001 |
| 2020 | | | | |
| Март | 17,26564 | 17,32105 | -1,61535 | 0,116053 |
| Май | 32,08462 | 28,92298 | 12,40944 | 0,000000 |
| Июль | 50,99800 | 41,35913 | 1,797952 | 0,081626 |
| Август | 37,90438 | 38,67226 | -10,8892 | 0,000000 |
| Октябрь | 27,14939 | 23,50052 | 18,47433 | 0,000000 |

Как было отмечено выше, температурный режим в теплые сезоны года, приходящиеся на первый период вегетации эфемерной растительности, на исследуемом участке имеет довольно сложную дифференцированную пространственную структуру с широким диапазоном температур.

Так, для предпозарного снимка (2018–116) амплитуда температур составляет 2 °С (+24...+26 °С). Основными факторами, определяющими температуру поверхности, являются: а) плотность травостоя (степень покрытия поверхности); б) наличие водных объектов и территорий с повышенным увлажнением; в) экспозиция и величина уклона поверхности склонов.

Относительно пониженной температурой (обычно на 5–7 °С) характеризуются долинно-речные и озерно-западные ландшафты. При этом диапазон с минимальными температурами (+21...+25 °С) относится исключительно к водным поверхностям и околводным пространствам. Максимальные температуры (+39...+45 °С) характерны для покатых склонов южной экспозиции. Диапазон температур +29...+37 °С охватывает большую часть условно естественных экосистем (пастбища). Именно в этот диапазон укладывается территория, впоследствии подвергшаяся пожару в мае 2018 г.

Снимок 2020–186, на котором отображен действующий на момент съемки фронт пожаров в прибрежной полосе Кизлярского залива, свидетельствует о том, что сенсорами Landsat зафиксированы наиболее горячие участки фронта пожаров. Естественно, что при разрешении снимка в 30 м температурные значения такого небольшого по площади объекта, как фронт (или очаг) пожара, являются усредненными. Поэтому диапазон температур непосредственно в очагах фиксируется в пределах 39,5–81,7 °С для снимка 2020–186. Кратковременность воздействия огня не приводит к формированию шлейфа с повышенными температурами, следующего за фронтом пожара. По подготовленным схемам отчетливо видно, что после прохождения огневого фронта поверхность земли практически моментально остывает до значений, соответствующих уровню инсоляции.

Данные постпожарных снимков свидетельствуют, что температурные различия в смежных (горелой и негорелой) частях в теплые сезоны года обычно не превышают 4 °С. Температурные различия между горелыми и негорелыми участками максимальны в летний период и сохраняются в течение всех теплых сезонов года, вплоть до наступления постоянных отрицательных температур.

Таким образом, в условно естественном, допожарном состоянии растительность во многом нивелирует температурный фон поверхности за счет частичного затенения поверхности и образования особых микроклиматических условий в приповерхностном слое.

В результате анализа данных космической съемки установлены дешифровочные признаки и описаны формы контуров гарей. Район пожара 2018 г. имеет вытянутую форму с юго-востока на северо-запад. В результате пожара пострадала территория, слагающаяся светло-каштановыми супесчаными почвами. В формировании образовавшегося контура определенную роль сыграли направление розы ветров, характер рельефа, растительный покров, водные объекты и сеть грунтовых дорог.

Контур гари 2019 г. имеет ясно очерченную треугольную форму. Пожар возник на территории лугово-болотных, среднесуглинистых почв прибрежной полосы Кизлярского залива. Небольшая площадь и форма пожара сформированы благодаря ограниченности камышовых зарослей водными преградами в виде протоков и каналов.

Сопоставление температурных данных по основным морфоструктурным элементам ландшафтов позволяет выявить различия в активности восстановительных процессов. Согласно полученным схемам, в наибольшей степени постпожарные изменения отражаются на увлажненных экотопах – прибрежная полоса, заросли луговой и луговой-болотной растительности, разнотравно-вейниковые луговины вдоль водотоков и в карстовых понижениях. Восстановление древесного и кустарникового покровов происходит в длительные сроки, но сопутствующий травяной покров, находясь в благоприятных условиях увлажнения, в кратчайшие сроки вегетационного периода накапливает фитомассу, соответственно, быстро воссоздается и пониженный температурный режим. С другой стороны, после пожара более значительными становятся температурные различия, обусловленные экспозиционной неоднородностью поверхности. Склоны южных экспозиций становятся более горячими, а северных экспозиций – более холодными.

Список источников

1. Залибеков З.Г. О закономерностях формирования продукционных ресурсов засоленных почв Терско-Кумской низменности // Аридные экосистемы. 2018. Т. 24, № 2 (75). С. 3–10.
2. Сератирова В.В., Бананова В.А. Оптимизация пастбищной нагрузки в Республике Калмыкия // Междунар. науч.-исслед. журн. 2016. № 11 (53), ч. 5. С. 98–100.
3. Радочинская Л.П., Кладиев А.К., Рыбашлыкова Л.П. Продукционный потенциал восстановленных пастбищ Северо-Западного Прикаспия // Аридные экосистемы. 2019. Т. 25, № 1 (78). С. 61–68.
4. Павлейчик В.М. Пространственно-временная структура пожаров на заповедном участке «Буртинская степь» // Бюл. Оренбургского НЦ УрО РАН. 2015. Вып. 4. С. 1–11. URL: <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2015-4/Articles/PVM-2015-4.pdf> (дата обращения: 10.08.2021).
5. Дубинин М.Ю., Луцкекина А.А., Раделоф Ф.К. Оценка современной динамики пожаров в аридных экосистемах по материалам космической съемки (на примере Черных Земель) // Аридные экосистемы. 2010. Т. 16, № 3 (43). С. 5–16.
6. Павлейчик В.М., Мячина К.В. Особенности термического режима земной поверхности послестепных пожаров по данным спутников Landsat // Вестн. Оренбургского гос. ун-та. 2016. № 4 (192). С. 83–89.
7. Weng Q., Fu P., Gao F. Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 145. P. 55–67.
8. Степные пожары и управление пожарной ситуацией в степных ООПТ: экологические и природоохранные аспекты: аналит. обзор. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2015. 144 с.
9. Иванов В.В. Степи Западного Казахстана в связи с динамикой их покрова. М.;Л.: АН СССР, 1958. 228 с.

References

1. Zalibekov Z.G. On the patterns of formation of productive resources of saline soils of the Tersko-Kuma lowland. *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2018;24(2):3-10. (In Russ.).

2. Seratirova V.V., Bananova V.A. Optimization of pasture load in the Republic of Kalmykia. *Mezhdunar. nauch.-issled. zhurn. = International Research Journal*. 2016;11(5):98-100. (In Russ.).
3. Radochinskaya L.P., Kladiev A.K., Rybashlykova L.P. Productive potential of restored pastures of the North-Western Caspian region. *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2019;25(1):61-68. (In Russ.).
4. Pavleychik V.M. Spatio-temporal structure of fires in the protected area "Burtinskaya steppe". *Byul. Orenburgskogo NTs UrO RAN = Bulletin of the Orenburg Scientific Center of the Ural Branch, Russian Academy of Sciences*. 2015;(4):1-11. Available from: <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2015-4/Articles/PVM-2015-4.pdf> [Accessed 10th August 2021]. (In Russ.).
5. Dubinin M.Yu., Lushchekina A.A., Radelof F.K. Estimation of modern dynamics of fires in arid ecosystems based on satellite imagery (on the example of the Black Lands). *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2010;16(3):5-16. (In Russ.).
6. Pavleichik V.M., Myachina K.V. Features of the thermal regime of the earth's surface of post-steppe fires according to Landsat satellite data. *Vestn. Orenburgskogo gos. un-ta = Bulletin of the Orenburg State University*. 2016;(4):83-89. (In Russ.).
7. Weng Q., Fu P., Gao F. Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*. 2014;145:55-67.
8. *Steppe fires and fire situation management in steppe protected areas: environmental and conservation aspects. Analytical review*. Moscow: Center for the Protection of Wildlife Press; 2015. 144 p. (In Russ.).
9. Ivanov V.V. *Steppes of Western Kazakhstan in connection with the dynamics of their cover*. Moscow; Leningrad: USSR Academy of Sciences Press; 1958. 228 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Ахмед Бийсолтанович Биарсланов – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория комплексных исследований природных ресурсов Западно-Каспийского региона.

Марина Ильясовна Джалалова – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Прикаспийский институт биологических ресурсов.

Ислам Русланович Гаджиев – лаборант-исследователь, лаборатория комплексных исследований природных ресурсов Западно-Каспийского региона.

Диана Бийболатовна Асгерова – кандидат биологических наук, научный сотрудник, Прикаспийский институт биологических ресурсов.

Светлана Викторовна Осипова – научный сотрудник, Прикаспийский институт биологических ресурсов.

Information about the authors

Ahmed B. Biarslanov - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Laboratory of Integrated Research of Natural Resources of the Western Caspian Region.

Marina I. Dzhalalova - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Precaspian Institute of Biological Resources.

Islam R. Gadzhiev - Laboratory Assistant-Researcher, Laboratory of Integrated Research of Natural Resources.

Diana B. Asgerova - Candidate of Science (Biology), Researcher, Precaspian Institute of Biological Resources.

Svetlana V. Osipova - Researcher, Precaspian Institute of Biological Resources.

Статья поступила в редакцию 01.06.2022; одобрена после рецензирования 05.08.2022; принята к публикации 15.11.2022.
The article was submitted 01.06.2022; approved after reviewing 05.08.2022; accepted for publication 15.11.2022.

Научная статья

УДК 549.751.3(470.5)

doi: 10.18522/1026-2237-2022-4-2-13-20

ГЕРХАРДТИТ И ЛИКАЗИТ ИЗ РОДИНГИТОВ БАЖЕНОВСКОГО ОФИОЛИТОВОГО КОМПЛЕКСА (СРЕДНИЙ УРАЛ)

Юрий Викторович Ерохин^{1✉}, Вера Витальевна Хиллер²

^{1,2} Институт геологии и геохимии Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

¹erokhin-yu@yandex.ru ✉

²hilvervit@mail.ru

Аннотация. Приводятся результаты изучения нитратной минерализации в родингитах Баженовского офиолитового комплекса, расположенного на восточном склоне Среднего Урала. Родингиты – метасоматические породы гранат-пироксенового состава, замещающие дайки габброидов и диоритов, секущие Баженовский гипербазитовый массив. Некоторые апогаббровые и аподиоритовые родингиты, в свою очередь, преобразованы под влиянием гидротермальных растворов, вероятно, порожденных низележащей гранитной интрузией. В гидротермально измененных родингитах главным сульфидным минералом является халькозин. Он образует скопления неправильной формы размером до 1 см. Сульфид меди часто покрыт зеленоватыми и голубоватыми пленками, которые при детальном изучении оказались агрегатом хризоколлы, долерофанита, лангита, коннеллита, митчерлихита с присутствием нитратной минерализации. Нитраты меди представлены герхардтитом и ликазитом, причем последний минерал, судя по всему, развивается по первому. Для обоих минералов приведены данные электронно-зондового рентгеноспектрального анализа и ИК-спектроскопии, а также показана морфология их агрегатов и индивидов. Кроме того, для герхардтита приведены данные рентгеноструктурного анализа, так как у него есть диморфный аналог – руаит. Образование нитратной минерализации, как нам представляется, имеет природное происхождение, так как мантийные породы являются источником азота.

Ключевые слова: герхардтит, ликазит, минералогия, родингиты, Баженовский офиолитовый комплекс, Средний Урал

Благодарности: авторы благодарны всем аналитикам за проведенные работы. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00027, <https://rscf.ru/project/22-17-00027>.

Для цитирования: Ерохин Ю.В., Хиллер В.В. Герхардтит и ликазит из родингитов Баженовского офиолитового комплекса (Средний Урал) // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 4-2. С. 13–20.

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

Original article

GERHARDTITE AND LIKASITE FROM RODINGITES OF BAZHENOVSK OPHIOLITE COMPLEX (MIDDLE URALS)

Yuriy V. Erokhin^{1✉}, Vera V. Khiller²

^{1,2} Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

¹erokhin-yu@yandex.ru ✉

²hilvervit@mail.ru

© Ерохин Ю.В., Хиллер В.В., 2022

Abstract. The results of studying nitrate mineralization in rodingites of the Bazhenovsk ophiolite complex located on the eastern slope of the Middle Urals are presented. Rodingites are metasomatic rocks of garnet-pyroxene composition that replace gabbroid and diorite dikes that cut across the Bazhenovsk ultramafic massif. Some apogabbro and apodiorite rodingites have in turn been altered by hydrothermal fluids, probably generated by an underlying granite intrusion. Chalcocite is the main sulfide mineral in hydrothermally altered rodingites. It forms clusters of irregular shape, up to 1 cm in size. Visually, chalcocite is often covered with greenish and bluish films, which, upon detailed study, turned out to be an aggregate of chrysocolla, dolerophanite, langite, connellite, and mitscherlichite with the presence of nitrate mineralization. Copper nitrates are represented by gerhardtite and likasite, the latter mineral apparently developing after the former. For both minerals, the data of X-ray electron probe analysis and IR spectroscopy are given, and the morphology of their aggregates and individuals is also shown. In addition, X-ray diffraction data for gerhardtite are given, since it has a dimorphic analogue – rouaite. The formation of nitrate mineralization, in our opinion, is of natural origin, since mantle rocks are a source of nitrogen.

Keywords: gerhardtite, likasite, mineralogy, rodingites, Bazhenovsk ophiolite complex, Middle Urals

Acknowledgments: the authors are grateful to all analysts for their work. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-17-00027, <https://rscf.ru/project/22-17-00027>.

For citation: Erokhin Yu.V., Khiller V.V. Gerhardtite and Likasite from Rodingites of Bazhenovsk Ophiolite Complex (Middle Urals). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(4-2):13-20. (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

Нитраты меди в природных условиях встречаются крайне редко, поэтому каждая их находка вызывает определенный интерес. На сегодняшний день в природе обнаружено всего четыре нитрата меди – герхардит, руаит, ликазит и буттгенбахит [1]. Обычно их встречают в зоне окисления медных месторождений, иногда в биогенных образованиях (термитники, пещерные осадки) и, как ни странно, часто в техногенных условиях, например вторичные минералы по металлургическим шлакам [2].

Нитратная минерализация, обнаруженная нами в родингитах Баженовского офиолитового комплекса, ранее в подобных условиях не встречалась, поэтому мы постарались её изучить как можно детальнее.

Методы исследования

Химический состав минералов определялся в Институте геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург) на электронно-зондовом микроанализаторе CAMECA SX 100 с пятью волновыми спектрометрами (аналитик В.В. Хиллер). Измерение азота в минералах проводилось на специальном кристалл-анализаторе РСЗ, предназначенном для определения легких элементов. На этом же приборе сделаны фотографии минералов в режиме BSE (обратно рассеянные электроны). Рентгеноструктурный анализ герхардита проводился в Уральском государственном горном университете (г. Екатеринбург) на УРС-2.0 (аналитик С.Г. Сустанов). ИК-спектры минералов сделаны в Институте проблем химической физики РАН (г. Черноголовка) на спектрометре Specord 75 IR (аналитик Н.В. Чуканов).

Объект исследования

Баженовский офиолитовый комплекс находится в 60 км к северо-востоку от г. Екатеринбурга на восточном склоне Среднего Урала. Он содержит одноименное месторождение хризотил-асбеста, которое приурочено к гипербазитовому массиву и обрабатывается открытым способом в виде трех гигантских карьеров. Геологическое строение и вещественный состав Баженовского офиолитового комплекса достаточно хорошо изучены [3, 4].

На современном эрозионном срезе Баженовский офиолитовый комплекс представляет собой полосу шириной 3,5–4 км, вытянутую в северо-северо-восточном направлении на 28 км. В составе комплекса выделяются габбро-нориты Асбестовского массива и гипербазиты Баженовского массива, предположительно ордовикского возраста. Последние залегают восточнее габброидов и в основном представлены серпентинизированными гарцбургитами при резко подчиненной роли дунитов, клинопироксенитов, оливковых вебстеритов, лерцолитов и верлитов. При этом пироксениты и верлиты имеют значительные объемы в северной части массива (рис. 1). С востока и юга офиолитовая пластина ограничивается Рефтинским габбро-плагиогранитным и Каменским гранитным массивами более молодого возраста.

Жильные тела основного и кислого состава пронизывают тело гипербазитов, фиксируя разноориентированные разломы протяженностью до 12–15 км. Этими разломами гипербазитовая пластина разделена на ряд блоков. В центральных частях блоки сложены относительно свежими гарцбургитами (содержание серпентина в пределах 30–70 об. %). По периферии, ближе к зонам разломов, они замещены серпентинитами и тальк-хлоритовыми породами, а в осевых частях разломов – тальк-карбонатными. Дайки, фиксирующие разломы, представлены габброидами, диоритами и плагиогранитами мощностью не более 1–2 м. Возраст даек плагиогранита, секущих гипербазитовое тело, определен как раннесилурийский [5]. Дайки габброидов и отчасти диоритов превращены в родингиты гранат-пироксенового состава.

Результаты исследования

На нижних горизонтах Центрального карьера, самого глубокого (до 400 м) из трех выработок, встречаются выходы необычных гидротермально измененных родингитов. Они представляют собой сложнопостроенные и пористые тела с преобладанием пренита, апофиллита, карбонатов и цеолитов [6]. Степень изменения пород очень высокая, никаких реликтов не сохранилось. По всей видимости, это апогаббровые и аподиоритовые родингиты, преобразованные под влиянием гидротермальных растворов, вероятно, порожденных нижежащей гранитной интрузией. В пользу этой гипотезы говорит появление большого количества калиевых, натриевых, бариевых минералов и карбонатов, что нехарактерно для «классических» родингитов и вмещающих их серпентинитов. Именно этот тип родингитов является главным «поставщиком» уникального музейно-коллекционного минералогического материала [4].

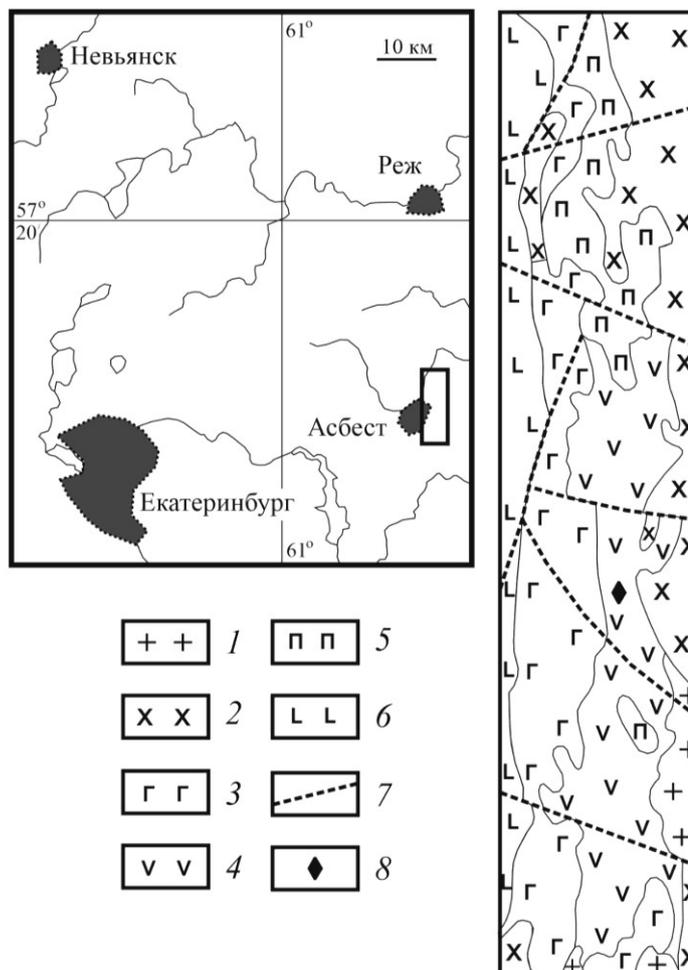


Рис. 1. Расположение и геологическая карта Баженовского офиолитового комплекса по [3] с упрощениями и дополнениями: 1 – гранитоиды Каменского комплекса (C_{1-2}); 2 – габбро-диориты и плагиограниты Рефтинского комплекса (S_2-D_1); 3 – габбро-нориты (S_1); 4 – гарцбургиты (O_{2-3}); 5 – клинопироксениты, вебстериты и верлиты; 6 – базальты (O_3-S_1); 7 – разрывные нарушения; 8 – место находки нитратной минерализации / Fig. 1. Location and geological map of the Bazhenov ophiolite complex after [3] with simplifications and additions: 1 - granitoides of the Kamensky complex (C_{1-2}); 2 - gabbro-diorites and plagiogranites of the Reftinsky complex (S_2-D_1); 3 - gabbro-norites (S_1); 4 - harzburgites (O_{2-3}); 5 - clinopyroxenites, websterites and wehlites; 6 - basalts (O_3-S_1); 7 - faults; 8 - places of discovery of nitrate mineralization

В гидротермально измененных родингитах главным сульфидным минералом является халькозин, который образует скопления неправильной формы размером до 1 см. Визуально халькозин часто покрыт зеленоватыми и голубоватыми пленками, которые при детальном изучении оказались агрегатом хризоколлы, долерофанита, лангита, коннеллита, митчерлихита, а также нитратов меди (герхардтит и ликазит). Описание последних приводится ниже.

Герхардтит ($\text{Cu}_2[\text{NO}_3](\text{OH})_3$) покрывает тонкой пленкой и примазками скопления халькозина, местами образует прожилки в сульфиде меди. Толщина жилок не превышает 0,5 мм. Минерал имеет нежно-голубой, местами зеленовато-голубой цвет. Под сканирующим микроскопом видно, что пленки представляют собой спрессованный параллельно-шестоватый агрегат, состоящий из короткопризматических кристаллов, ограненных ромбическими призмами. Размер отдельных индивидов не превышает 10 мкм по удлинению (рис. 2).

По данным микрозондового анализа (среднее значение из 6 анализов: CuO – 67,04 %; N_2O_5 – 21,44 %; H_2O (по разности) – 11,52 %), минерал определяется как соединение с кристаллохимической формулой $(\text{Cu}_{2,00}[\text{NO}_3]_{0,99}(\text{OH})_{3,04})$, т.е. является либо герхардтитом (ромбический [7]), либо руаитом (моноклинный [8]). При этом известно, что в условиях окружающей среды руаит является метастабильным по сравнению с ромбической фазой и со временем переходит в герхардтит [9, 10].

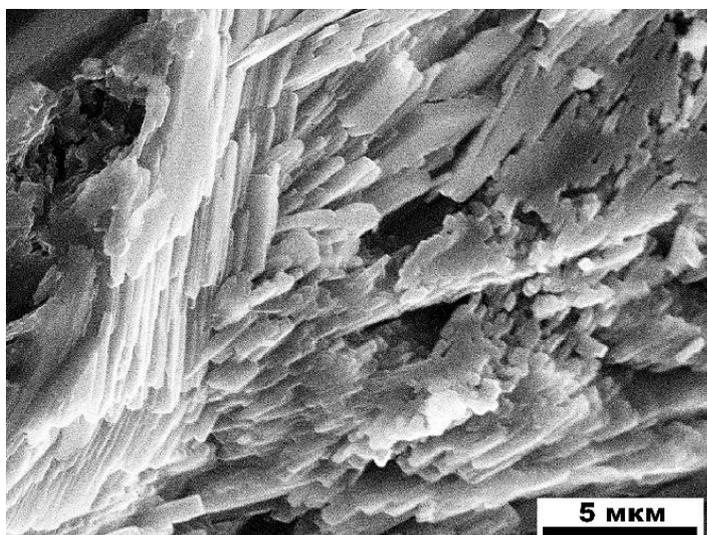


Рис. 2. Скопления призматических кристаллов герхардтита. BSE-фото, CAMECA SX 100 / Fig. 2. Clusters of prismatic gerhardtite crystals. BSE-photo, CAMECA SX 100

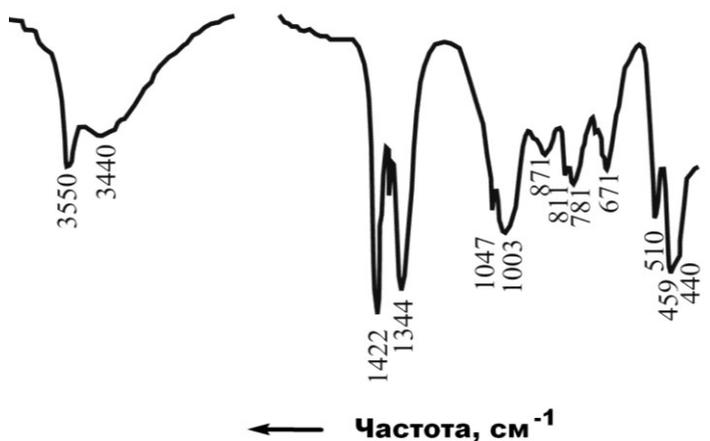


Рис. 3. ИК-спектр герхардтита из Баженовского комплекса. Пояснения в тексте / Fig. 3. IR spectrum of gerhardtite from the Bazhenovsk complex. Explanations in the text

Дебаеграмма минерала при расшифровке показывает почти полное сходство с эталоном герхардтита (главные линии минерала $[d, \text{Å} (I, \%)]$ – 6,87 (10); 3,943 (10); 3,441 (10); 2,663 (10); 2,544 (7); 2,520 (5); 2,791 (5)). Рассчитанные параметры элементарной ячейки, соответственно, следующие: $a_0 6,051 \pm 0,005 \text{ Å}$, $b_0 13,756 \pm 0,007 \text{ Å}$, $c_0 5,588 \pm 0,009 \text{ Å}$. ИК-спектр минерала так же полностью идентичен эталону герхардтита (основные полосы поглощения – 440, 459, 671, 781, 1003, 1344, 1422, 3440, 3550 cm^{-1}) (рис. 3).

Ликазит ($\text{Cu}_3[\text{NO}_3](\text{OH})_5 \times 2\text{H}_2\text{O}$) образует скопления темно-синего цвета (толщина – не более 0,2 мм) на поверхности агрегата герхардтита. Под сканирующим микроскопом видно, что скопления представляют собой спутанно-чешуйчатый агрегат, состоящий из пластинчатых и таблитчатых кристаллов. Размер отдельных индивидов достигает 20 мкм (рис. 4). По всей видимости, данный минерал развивается по агрегату герхардтита.

По данным микрозондового анализа (среднее значение из 5 анализов: CuO – 64,57 %; N_2O_5 – 14,22 %; H_2O (по разности) – 21,21 %), минерал определяется как соединение с кристаллохимической формулой $\text{Cu}_{2,98}[\text{NO}_3]_{1,02}(\text{OH})_{5,00} \times 1,82\text{H}_2\text{O}$, т.е. является ликазитом [11]. Никаких примесей не установлено.

По данным инфракрасной спектроскопии, минерал относится к водному нитрату меди. ИК-спектр показал сле-

дующие полосы поглощения, см^{-1} : (OH)-группировки – 3510, 3431, 3275, 3107, 2772, 2629, 2509, 1064, 1022, 989; (NO_3)-группировки – 1369, 864, 840; (Cu-O)-группировки – 1160, 687 (рис. 5), характерные для эталона ликазита.

Обсуждение результатов исследования

Нитратная минерализация в родингитах Баженовского месторождения хризотил-асбеста установлена нами еще в 1999 г. К сожалению, дефицит современных методов исследований не позволил нам на тот момент получить достоверную информацию по минералам, поэтому были опубликованы только краткие тезисы докладов [12]. На данном этапе исследования можно утверждать, что в родингитах Баженовского офиолитового комплекса нами действительно обнаружены герхардит и ликазит.

Герхардит многократно отмечался в зоне окисления различных медных и медно-колчеданных месторождений [13, 14]. Кроме того, он встречался как новообразованный минерал в термитниках Австралии [15], а также в измененных металлургических шлаках Восточной Европы [16]. Ликазит находили гораздо реже герхардита, он отмечался в некоторых медных рудниках, в том числе в зоне окисления Джезказганского медного месторождения (Казахстан) [13]. Кроме того, он обнаружен в зоне окисления Мурзинского золоторудного месторождения (Алтайский край) [17].

Происхождение баженовских нитратов меди, возможно, связано с применением взрывчатых веществ (аммонал, нитроглицерин, тротил и т.д.), в состав которых входят соединения азота. После взрыва эти соединения частично переходят в окружающую водную среду, где уже в виде азотной кислоты они воздействуют на халькозин с образованием нитратов. Но возникает вопрос, почему при таком вроде бы простом процессе образуются не чистые нитраты, а сложный минеральный агрегат нитратов с хризоколлой, долерофанитом, лангитом, коннеллитом и митчерлихитом? К тому же вряд ли ничтожное количество взрывчатого вещества могло бы раскислить карьерные воды до приемлемого раствора азотной кислоты.

Мы все же предполагаем, что нитратная минерализация в Баженовском офиолитовом комплексе имеет природное происхождение. Во-первых, нитраты меди встречаются в ассоциации с другими гипергенными, вполне обычными минералами – хризоколлой, долерофанитом, лангитом, коннеллитом и митчерлихитом, которые часто образуются совместно в зонах окисления медных месторождений [2]. Во-вторых, источник азота необязательно должен быть техногенным, он мог быть атмосферным или глубинным (мантийный). Биогенный источник мы не рассматриваем, так как в баженовских карьерах нет ни растительности, ни животных.

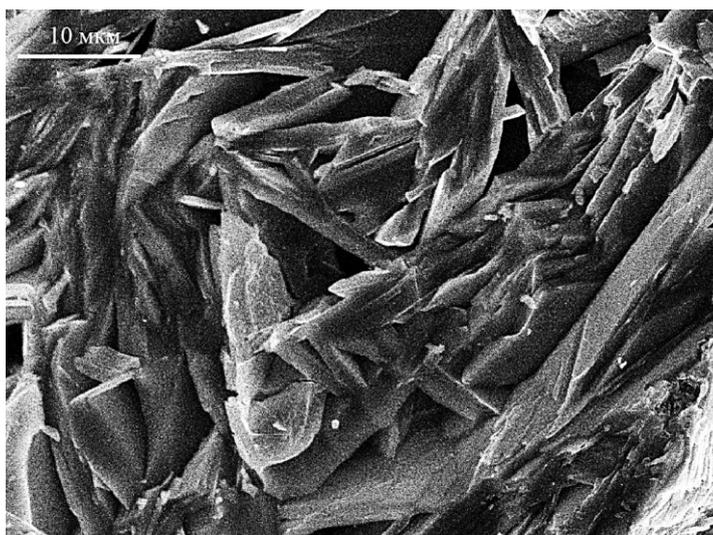


Рис. 4. Скопления пластинчатых кристаллов ликазита. BSE-фото, CAMECA SX 100 / Fig. 4. Clusters of lamellar likasite crystals. BSE-photo, CAMECA SX 100

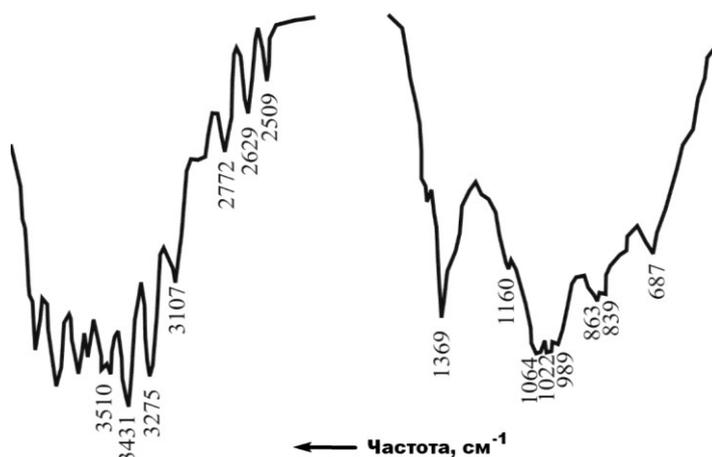


Рис. 5. ИК-спектр ликазита из Баженовского комплекса. Пояснения в тексте / Fig 5. IR spectrum of likasite from the Bazhenovsk complex. Explanations in the text

Всем известно, что наш воздух содержит значительное количество азота (75 мас. %, или 78 об. %), который с течением времени может корродировать самородную медь и сульфиды меди с образованием нитратов [18]. По всей видимости, именно таким способом и образуются нитраты в зонах окисления медных месторождений. Но данный способ образования не подходит к баженовским нитратам, так как время существования карьерных выработок ничтожно мало по сравнению с периодом формирования зон окисления на рудных объектах.

Мантйный источник азота для образования баженовских нитратов меди выглядит более аргументированным. В последнее время все больше исследователей указывают, что мантия и ядро нашей планеты являются главным резервуаром земного азота, где железо может присутствовать не только в виде карбидов, но и в форме нитридов [19, 20]. Это подтверждает находка нитридов и карбонитридов железа в нижнемантийных алмазах из кимберлитов Бразилии [21].

По всей видимости, нитратная минерализация в Баженовском офиолитовом комплексе образовалась следующим образом. Азот содержался в виде каких-либо включений (расплавные или минеральные) в первичных оливинах и пироксенах мантийных гипербазитов. В результате метаморфических и метасоматических процессов азот при серпентинизации первичных минералов переходил в водную среду и, в свою очередь, реагировал с сульфидами.

Заключение

Таким образом, мы изучили нитратную минерализацию в родингитах Баженовского офиолитового комплекса, расположенного на восточном склоне Среднего Урала. Нитраты меди образовались по матрице халькозина и представлены герхардитом и ликазитом, причем последний минерал, судя по всему, развивается по первому. Они отмечаются в ассоциации с другими минералами – хризоклоллой, долерофанитом, лангитом, коннеллитом и митчерлихитом. Образование нитратной минерализации, как нам представляется, имеет природное происхождение, так как мантийные породы являются источником азота.

Список источников

1. Hibbs D.E., Leverett P., Williams P.A. Buttgenbachite from Bisbee Arizona, USA: a single-crystal X-ray study // Neues Jahrbuch für Mineralogie. Monatshefte. 2002. S. 225–240.
2. Sharpe J.L., Williams P.A. Exotic secondary copper mineralization in the eastern Mt. Isa Block, Northwest Queensland // The Royal Society of New South Wales. 2000. Vol. 133. P. 31–32.
3. Баженовское месторождение хризотил-асбеста / ред. К.К. Золотов, Б.А. Попов. М.: Недра, 1985. 271 с.
4. Ерохин Ю.В. Минералогия родинитов Баженовского месторождения (Средний Урал) // Минералогический альманах. 2017. Т. 22, вып. 3. 136 с.
5. Ерохин Ю.В., Хиллер В.В., Иванов К.С. Раннесилурийский возраст даек плагиогранита из Баженовского офиолитового комплекса, Средний Урал (по данным Th–U–Pb-датирования монацита) // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Геология. 2018. № 3. С. 17–21.
6. Антонов А.А. Минералогия родинитов Баженовского гипербазитового массива. СПб.: Наука, 2003. 128 с.
7. Bovio B., Locchi S. Crystal structure of the orthorhombic basic copper nitrate, $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{NO}_3$ // J. Crystallographic and Spectroscopic Research. 1982. Vol. 12. P. 507–517.
8. Sarp H., Černý R., Guenee L. Rouaite, $\text{Cu}_2(\text{NO}_3)(\text{OH})_3$, un nouveau minéral: sa description et sa structure cristalline (Alpes-Maritimes, France) // Riviera Scientifique. 2001. Vol. 85. P. 3–12.
9. Oswald H.R. Über natürlichen und künstlichen Gerhardtit // Zeitschrift für Kristallographie. 1961. Vol. 116. S. 210–219.
10. Yoder C.H., Bushong E., Liu X., Weidner V., McWilliams P., Martin K., Lorgunpai J., Haller J., Schaeffer R.W. The synthesis and solubility of the copper hydroxyl nitrates, gerhardite, rouaite and likasite // Mineralogical Magazine. 2010. Vol. 74. P. 433–440.
11. Effenberger H. Likasite, $\text{Cu}_3(\text{NO}_3)(\text{OH})_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: Revision of the chemical formula and redetermination of the crystal structure // Neues Jahrbuch für Mineralogie. Monatshefte. 1986. S. 101–110.
12. Ерохин Ю.В., Малофеева Л.П. Нитраты меди Баженовского месторождения хризотил-асбеста // Материалы Уральской летней минерал. школы. Екатеринбург: УГГГА, 1999. С. 358–359.
13. Волошин А.В., Пахомовский Я.А., Степанов В.И., Булгак Л.В., Меньшиков Ю.П. Герхардит, ликазит и спертинит из зоны окисления халькозиновых руд Джезказгана (первые находки в СССР) // Новые данные о минералах. 1988. Вып. 35. С. 40–47.

14. Williams S.A. Gerhardtite from the Daisy shaft, Mineral Hill mine, Pima Co., AZ // *Arizona Geological Society Digest*. 1961. Vol. 4. P. 123.
15. Melchiorre E.B., Williams P.A., Rose T.P., Talyn B.C. Biogenic nitrogen from termite mounds and the origin of gerhardtite at the Great Australia mine, Cloncurry, Queensland, Australia // *Canadian Mineralogist*. 2006. Vol. 44. P. 1447–1455.
16. Katarzyna N. Mineralogical and chemical characteristics of slags from the pyrometallurgical extraction of zinc and lead // *Minerals*. 2020. Vol. 10, № 4. Article 371.
17. Касаткин А.В. Новые находки редких минералов на территории России. Ч. II // В мире минералов: минерал. альманах. 2021. Т. 26, вып. 2. С. 20–58.
18. Samie F., Tidblad J., Kucera V., Leygraf C. Atmospheric corrosion effects of HNO₃. Influence of temperature and relative humidity on laboratory-exposed copper // *Atmospheric Environment*. 2007. Vol. 41. P. 1374–1382.
19. Mysen B.O. Nitrogen in the Earth: abundance and transport // *Progress in Earth and Planetary Science*. 2019. Vol. 6. Article 38.
20. Litasov K.D., Shatskiy A., Ponomarev D.S., Gavryushkin P.N. Equations of state of iron nitrides ε-Fe₃N_x and γ-Fe₄N_y to 30 GPa and 1200 K and implication for nitrogen in the Earth's core // *J. Geophysical Research*. 2017. Vol. 122. P. 3574–3584.
21. Kaminsky F.V., Wirth R. Nitrides and carbonitrides from the lowermost mantle and their importance in the search for Earth's «lost» nitrogen // *American Mineralogist*. 2017. Vol. 102. P. 1667–1676.

References

1. Hibbs D.E., Leverett P., Williams P.A. Buttgenbachite from Bisbee Arizona, USA: a single-crystal X-ray study. *Neues Jahrbuch für Mineralogie. Monatshefte*. 2002;225-240.
2. Sharpe J.L., Williams P.A. Exotic secondary copper mineralization in the eastern Mt. Isa Block, Northwest Queensland. *The Royal Society of New South Wales*. 2000;133:31-32.
3. Zoloev K.K., Popov B.A., eds. *Bazhenovsk chrysotile-asbestos deposit*. Moscow: Nedra Publ.; 1985. 271 p. (In Russ.).
4. Erokhin Yu.V. Bazhenovsk Deposit (Central Urals, Russia): Mineralogy of Rodingites. *Mineralogicheskii al'manakh = Mineralogical Almanac*. 2017;22(3). 136 p. (In Russ.).
5. Erokhin Yu.V., Khiller V.V., Ivanov K.S. Early Silurian age of plagiogranite dikes from the Bazhenovsk ophiolite complex, Middle Urals (according to Th-U-Pb dating of monazite). *Vestn. Voronezhskogo gos. un-ta. Geologiya = Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geology*. 2018;(3):17-21. (In Russ.).
6. Antonov A.A. *Mineralogy of rodingites of the Bazhenovsk hyperbasic massif*. Saint Petersburg: Nauka Publ.; 2003. 128 p. (In Russ.).
7. Bovio B., Locchi S. Crystal structure of the orthorhombic basic copper nitrate, Cu₂(OH)₃NO₃. *Journal of Crystallographic and Spectroscopic Research*. 1982;12:507-517.
8. Sarp H., Černý R., Guenee L. Rouaite, Cu₂(NO₃)(OH)₃, a new mineral: its description and its crystalline structure (Alpes-Maritimes, France). *Riviéra Scientifique = Scientific Riviera*. 2001;85:3-12. (In French).
9. Oswald H.R. On natural and artificial gerhardtite. *Zeitschrift für Kristallographie = Journal of Crystallography*. 1961;116:210-219. (In German).
10. Yoder C.H., Bushong E., Liu X., Weidner V., McWilliams P., Martin K., Lorgunpai J., Haller J., Schaeffer R.W. The synthesis and solubility of the copper hydroxyl nitrates, gerhardtite, rouaite and likasite. *Mineralogical Magazine*. 2010;74:433-440.
11. Effenberger H. Likasite, Cu₃(NO₃)(OH)₅·2H₂O: Revision of the chemical formula and redetermination of the crystal structure. *Neues Jahrbuch für Mineralogie. Monatshefte*. 1986:101-110.
12. Erokhin Yu.V., Malofeeva L.P. Copper nitrates of the Bazhenovsk chrysotile-asbestos deposit. *Proceedings of the Ural summer mineralogical school*. Yekaterinburg: Ural State Mining University Press; 1999:358-359. (In Russ.).
13. Voloshin A.V., Pakhomovskiy Ya.A., Stepanov V.I., Bulgak L.V., Men'shikov Yu.P. Gerhardtite, likasite and spertiniite from the zone of oxidation of chalcocite ores of Dzhezkazgan (the first finds in the USSR). *Novye dannye o mineralakh = New Data on Minerals*. 1988;(35):40-47. (In Russ.).
14. Williams S.A. Gerhardtite from the Daisy shaft, Mineral Hill mine, Pima Co., AZ. *Arizona Geological Society Digest*. 1961;4:123.
15. Melchiorre E.B., Williams P.A., Rose T.P., Talyn B.C. Biogenic nitrogen from termite mounds and the origin of gerhardtite at the Great Australia mine, Cloncurry, Queensland, Australia. *Canadian Mineralogist*. 2006;44:1447-1455.
16. Katarzyna N. Mineralogical and chemical characteristics of slags from the pyrometallurgical extraction of zinc and lead. *Minerals*. 2020;10(4):371.

17. Kasatkin A.V. New finds of rare minerals in Russia. Part II. *V mire mineralov: mineral. al'manakh = In the World of Minerals. Mineralogical Almanac*. 2021;26(2):20-58. (In Russ.).

18. Samie F., Tidblad J., Kucera V., Leygraf C. Atmospheric corrosion effects of HNO₃. Influence of temperature and relative humidity on laboratory-exposed copper. *Atmospheric Environment*. 2007;41:1374-1382.

19. Mysen B.O. Nitrogen in the Earth: abundance and transport. *Progress in Earth and Planetary Science*. 2019;6:38.

20. Litasov K.D., Shatskiy A., Ponomarev D.S., Gavryushkin P.N. Equations of state of iron nitrides ϵ -Fe₃N_x and γ -Fe₄N_y to 30 GPa and 1200 K and implication for nitrogen in the Earth's core. *Journal of Geophysical Research*. 2017;122:3574-3584.

21. Kaminsky F.V., Wirth R. Nitrides and carbonitrides from the lowermost mantle and their importance in the search for Earth's "lost" nitrogen. *American Mineralogist*. 2017;102:1667-1676.

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

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

V.V. Khiller - Candidate of Science (Geology and Mineralogy), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 10.06.2022; одобрена после рецензирования 29.06.2022; принята к публикации 15.11.2022.
The article was submitted 10.06.2022; approved after reviewing 29.06.2022; accepted for publication 15.11.2022.

Научная статья

УДК 631.414

doi: 10.18522/1026-2237-2022-4-2-21-27

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВ ПРИДОРОЖНОЙ ПОЛОСЫ АВТОМАГИСТРАЛИ УССУРИЙСК – ПОГРАНИЧНЫЙ НА ПРИГРАНИЧНОЙ ТЕРРИТОРИИ

Елена Анатольевна Жарикова^{1✉}, Ольга Михайловна Голодная², Анастасия Дмитриевна Попова³

^{1,2,3} Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия

¹ ejarikova@mail.ru[✉]

² omgolodnaya@mail.ru

³ anastasia97@list.ru

Аннотация. Определены основные физико-химические свойства и содержание тяжелых металлов в верхнем слое почв придорожной полосы. Большинство почв являются тяжелыми суглинками, малогумусированы, имеют слабокислую и нейтральную среду. Выбросы автотранспорта служат главным источником загрязнения придорожных почв Co, Cu, Cr, Ni, средняя концентрация которых в 1,3–4,8 раза превышает фоновый уровень. Наибольшие значения индекса загрязнения NPI выявлены в почвах равнинного участка с высокой концентрацией большегрузного транспорта, работающего на холостом ходу. Существуют значительные различия при определении степени загрязнения почв тяжелыми металлами с использованием различных геохимических индексов.

Ключевые слова: почвы, тяжелые металлы, экологический риск, индексы загрязнения

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121031000134-6).

Для цитирования: Жарикова Е.А., Голодная О.М., Попова А.Д. Экологическое состояние почв придорожной полосы автомагистрали Уссурйск – Пограничный на приграничной территории // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 4-2. С. 21–27.

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

Original article

ECOLOGICAL STATE OF ROADSIDE SOILS OF THE USSURIYSK- POGRANICHNY HIGHWAY ON THE BORDER TERRITORY

Elena A. Zharikova^{1✉}, Olga M. Golodnaya², Anastasiya D. Popova³

^{1,2,3} Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

¹ ejarikova@mail.ru[✉]

² omgolodnaya@mail.ru

³ anastasia97@list.ru

Abstract. The main physical and chemical properties and the content of heavy metals in the topsoils of roadside's were determined. Most soils are heavy loams, low-humus, slightly acidic and neutral. Motor vehicle emissions are the main source of contamination of roadside soils with Co, Cu, Cr, Ni, average concentrations of which are 1.3-4.8

© Жарикова Е.А., Голодная О.М., Попова А.Д., 2022

times higher than the background level. The highest values of the NPI pollution index were found in the soils of a flat area with a high concentration of heavy-duty vehicles operating at idle. There are significant differences in determining the degree of soil contamination with using various geochemical indices.

Keywords: soils, heavy metals, environmental risk, pollution index

Acknowledgments: the research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 121031000134-6).

For citation: Zharikova E.A., Golodnaya O.M., Popova A.D. Ecological State of Roadside Soils of the Ussuriysk-Pogranichny Highway on the Border Territory. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(4-2):21-27. (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

Выгодное географическое положение определяет значимость Приморского края как для России в целом, так и для Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР). Важным направлением социально-экономического развития является создание современных международных транспортно-логистических коридоров (МТК), в частности МТК «Приморье-1». Развитие транспортной инфраструктуры предусматривает обновление, расширение и модернизацию автомобильных дорог от российско-китайской границы до морских портов. В условиях увеличивающегося транзитного грузооборота ведущим фактором, определяющим экологическое состояние окружающей среды, представляется воздействие автотранспорта, способное привести к трансформации или деградации почв, прилегающих к автомагистрали, что, в свою очередь, может представлять реальную угрозу как природным комплексам, так и жизнедеятельности населения [1]. Установлено, что в атмосферных выбросах при сгорании топлива и смазочных материалов присутствуют плотные частицы с высоким содержанием тяжелых металлов (ТМ) – Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, V и др., а износ шин и коррозия металлических частей автомобилей могут вызвать загрязнение придорожных почв Zn, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, W, Ni, Pb, Fe и др. [2].

Исследование состояния почвенного покрова приграничной территории, прилегающей к автотранспортной автомагистрали, в условиях все более увеличивающейся интенсивности движения актуально для оценки экологической ситуации и выработки мер по защите окружающей среды.

В России химическое загрязнение почв оценивается по суммарному показателю (Z_c), определяемому по формуле $Z_c = \sum(K_{ci} + \dots + K_{cn}) - (n-1)$, где n – число определяемых компонентов; K_{ci} – коэффициент концентрации i -го загрязняющего компонента, равный кратности превышения содержания данного компонента над региональным фоновым значением. Величина $Z_c < 16$ указывает на допустимый уровень загрязнения [3], но этот показатель не всегда позволяет корректно определить степень загрязнения почв [4, 5].

В мире используют иные геохимические показатели (табл. 1). Коэффициент концентрации (Single Pollution Index) $PI = C_i / GB$ применяется для установления загрязнения отдельными ТМ и вычисления комплексных показателей загрязнения (C_i – содержание элемента в поверхностном слое; GB – фоновое содержание), величина $PI = K_{ci}$. PLI – индекс загрязнения (Pollution Load Index) – свидетельствует о совокупном накоплении ТМ $PLI = (PI_1 \times PI_2 \dots PI_n)^{1/n}$, при $PLI < 1,0$ загрязнение отсутствует. Индекс загрязнения Nemerow (NPI) используют для оценки состояния почв, поскольку он учитывает долю не только каждого ТМ, но и опасность от металла с наиболь-

шим коэффициентом концентрации. $NPI = \sqrt{0,5(PI_{1\max}^2 + PI_{1\text{ave}}^2)}$, где $PI_{1\max}$ – самое высокое значение PI среди характеризуемых металлов; $PI_{1\text{ave}}$ – среднее значение PI . Показатель потенциального экологического риска (Potential Ecological Risk) указывает на уровень опасности для живых организмов: $PERI = \sum PI_i \times T_i$, где T_i – коэффициент токсичности i -го ТМ [6]. Целью исследований является выявление экологического состояния почв придорожной полосы участка автомагистрали на приграничной территории с использованием различных показателей загрязнения.

Таблица 1 / Table 1

Шкала значений геохимических показателей [5] / Interpretation of the values geochemical indices [5]

| Коэффициент концентрации (PI) | | Индекс загрязнения Nemerow (NPI) | | Потенциальный экологический риск (PERI) | |
|-------------------------------|---------------|----------------------------------|-----------------------|---|---------------------|
| Уровень | Загрязнение | Уровень | Загрязнение | Значение | Уровень риска |
| 1<PI<2 | Слабое | NPI< 0,7 | Отсутствует | <90 | Незначительный |
| 2<PI<3 | Среднее | 0,7 ≤ NPI< 1,0 | Пограничное состояние | 90–180 | Средний |
| 3<PI<5 | Сильное | 1,0 ≤ NPI< 2,0 | Слабое | 180–360 | Высокий |
| PI>5 | Очень сильное | 2,0 ≤ NPI< 3,0 | Среднее | 360–720 | Очень высокий |
| – | – | NPI> 3 | Сильное | >720 | Чрезвычайно высокий |

Объекты и методы

Исследования проводились на участке автомобильной трассы МТК «Приморье-1» Пограничный – Сергеевка, который примыкает к международному переходу Пограничный – Суйфэньхэ и испытывает на себе максимальную нагрузку со стороны транспортного потока (рисунок).



Район исследования. Топооснова <https://yandex.ru/maps/> / The research area

На расстоянии 30 м слева и справа от автомобильной трассы на целинных участках и на расстоянии 50 м на сельскохозяйственных угодьях были заложены разрезы и отобраны образцы из поверхностного слоя почв. Физико-химический анализ выполнен по общепринятым методикам [7]. Валовое содержание ТМ определяли на спектрометре EDX-800HS (Shimadzu) методом рентгенофлуоресцентного анализа по аттестованной методике [8] в аналитическом центре ФНЦ биоразнообразия ДВО РАН.

Результаты и обсуждение

На исследуемом участке выявлен следующий состав почвенного покрова: буроземы типичные (т. 4) и глееватые (т. 3), темногумусово-глеевые (т. 6), дерново-буро-подзолистые типичные (т. 5, т. 7) и глееватые (т. 1) и агродерново-подзолистые (т. 2, т. 8). Большинство почв тяжелосуглинистые, к легкосуглинистым относятся бурозем типичный (т. 4), к среднесуглинистым – бурозем глееватый (т. 3) и дерново-буро-подзолистая почва (т. 5) (табл. 2). Почвы преимущественно слабокислые (буроземы типичные – кислые), агропочвы – нейтральные. Среднее содержание гумуса отмечено в темногумусово-глеевых почвах (т. 6), в остальных оно ниже среднего.

В агрогенных почвах (т. 2, 8) содержание обменных катионов очень высокое, в естественных – высокое, в их составе в наибольшем количестве содержится кальций. Степень насыщенности основаниями низкая в буроземах типичных (т. 4) и повышенная и высокая – в остальных. В большинстве образцов содержание подвижного фосфора варьирует от очень низкого (т. 3) до повышенного (т. 6, 7), и только в пахотном слое т. 8 оно очень высокое. Все почвы хорошо обеспечены подвижным калием, его содержание повышено только в т. 3, в остальных оно высокое и очень высокое.

Таблица 2 / Table 2

Основные свойства почв / Basic soil properties

| Разрез, горизонт | Мощность, см | pH | | Гумус, % | Гк смоль | Са ⁺⁺ (экв)/кг | Mg ⁺⁺ почвы | V, % | P ₂ O ₅ мг/100 г | K ₂ O мг/100 г | Фракция <0,01 мм, % |
|------------------|--------------|------------------|-----|----------|----------|---------------------------|------------------------|------|--|---------------------------|---------------------|
| | | H ₂ O | KCl | | | | | | | | |
| 1AY | 0–23 | 6,5 | 5,3 | 2,5 | 3,4 | 18,2 | 7,8 | 88 | 3,7 | 19,3 | 47 |
| 2P | 0–35 | 6,5 | 5,3 | 2,7 | 2,2 | 23,2 | 21,1 | 95 | 4,7 | 24,5 | 42 |
| 3 AY | 0–20 | 5,8 | 4,6 | 3,6 | 5,1 | 12,1 | 8,9 | 77 | 1,3 | 12,5 | 31 |
| 4 AY | 0–16 | 4,8 | 3,5 | 3,8 | 9,9 | 22,8 | 7,6 | 60 | 3,4 | 18,0 | 24 |
| 5 AY | 0–17 | 5,5 | 4,5 | 3,6 | 5,8 | 10,3 | 9,3 | 77 | 2,1 | 25,3 | 31 |
| 6 AY | 0–18 | 6,0 | 4,8 | 4,8 | 4,8 | 15,6 | 9,9 | 84 | 5,6 | 26,5 | 53 |
| 7 AY | 0–24 | 6,2 | 5,1 | 3,4 | 3,6 | 17,7 | 7,3 | 87 | 5,3 | 25,6 | 43 |
| 8 P | 0–30 | 6,7 | 5,6 | 3,1 | 2,2 | 25,7 | 8,2 | 94 | 26,8 | 26,0 | 41 |

Примечание. Гк – гидролитическая кислотность; V – степень насыщенности основаниями.

Хотя содержание ТМ во всех исследованных пробах не превышает ОДК [2], в большинстве случаев оно выше фонового [9] (табл. 3). При этом содержание Cr и Ni сравнимо, содержание V и Co превышает, а содержание Cu, Zn, и Pb ниже, чем содержание этих ТМ в городских почвах Приморья и близлежащих городов Китая (за исключением содержания Cr в Шеньяне) [10, 11]. Содержание Cr, Ni, Cu, Zn и Pb в почвах сельскохозяйственных угодий приграничной китайской провинции Хейлудзян намного выше, чем в исследованных почвах [12]. Содержание Cr, Co, Mn повсеместно, Cu (т. 1, 2, 5, 6, 7), Zn (т. 4, 6, 7), Pb (т. 1, 5) превышает кларк [13].

Значения геохимических индексов PLI и NPI свидетельствуют о значительной деградации поверхностного слоя почв придорожной территории и сильной степени загрязнения ТМ (табл. 3). Наибольшие значения индекса загрязнения NPI получены на участке с равнинным рельефом от госграницы с Китаем до низкогорного участка, служащего своеобразным барьером для переноса поллютантов воздушными массами (точки 4–8). Кроме того, именно здесь регулярно отмечается высокая концентрация работающего на холостом ходу большегрузного транспорта, а при данном режиме работы в окружающую среду выделяется наибольшее количество ТМ от неполного сгорания топлива и от более интенсивного износа деталей в двигателе [14].

Значения показателя химического загрязнения Zc повсеместно не превышает 16, что указывает на допустимый уровень загрязнения почв придорожной полосы на исследуемом участке автотрассы, согласно российским нормативным документам. При этом значения показателя потенциального экологического риска PERI также характеризуют экологическую опасность почв как незначительную (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

Содержание ТМ, мг/кг, и оценка загрязнения / Heavy metal content, mg/kg, and pollution assessment

| Разрез, горизонт | V | Cr | Co | Ni | Cu | Zn | Mn | Pb | Zc | PLI | PERI | NPI |
|----------------------|------|-------|------|-----|------|-----|------|-----|----|-----|------|-----|
| 1 AY | 107 | 88 | 26 | 20 | 49 | 54 | 1060 | 33 | 8 | 1,4 | 43 | 3,4 |
| 2 P | 116 | 90 | 26 | 21 | 39 | 51 | 697 | 13 | 6 | 1,4 | 52 | 3,4 |
| 3 AY | 109 | 86 | 25 | 22 | 30 | 70 | 1014 | 20 | 6 | 1,5 | 43 | 3,2 |
| 4 AY | 93 | 79 | 31 | 21 | 33 | 82 | 797 | 19 | 7 | 1,5 | 47 | 4,0 |
| 5 AY | 99 | 87 | 29 | 20 | 51 | 55 | 882 | 34 | 9 | 1,5 | 54 | 3,8 |
| 6 AY | 102 | 97 | 29 | 26 | 44 | 74 | 836 | 19 | 8 | 1,5 | 51 | 3,7 |
| 7 AY | 102 | 85 | 31 | 22 | 58 | 76 | 929 | 14 | 8 | 1,6 | 48 | 3,9 |
| 8 P | 104 | 83 | 30 | 32 | 32 | 60 | 820 | 25 | 8 | 1,3 | 52 | 4,0 |
| ОДК [2] | 150 | – | – | 40 | 66 | 110 | 1500 | 65 | – | – | – | – |
| Фон [9] | 129* | 59,5* | 6 | 18 | 13 | 63 | 895 | 21 | – | – | – | – |
| Кларк [13] | 129 | 59,5 | 11,3 | 29 | 38,9 | 70 | 488 | 27 | – | – | – | – |
| Уссурийск [10] | 89 | 94 | 15 | 29 | 81 | 156 | – | 61 | – | – | – | – |
| Владивосток [10] | 94 | 92 | 16 | 29 | 81 | 259 | – | 89 | – | – | – | – |
| Шеньян [11] | – | 481 | – | – | 81 | 334 | – | 106 | – | – | – | – |
| Чанчунь [11] | – | 95 | – | – | 68 | 416 | – | 93 | – | – | – | – |
| Агрочуву, Китай [12] | – | 235 | 7 | 102 | 76 | 960 | 588 | 216 | – | – | – | – |

* – поскольку фоновые данные отсутствуют, в расчетах использовали кларк.

Согласно полученным коэффициентам концентрации PI придорожные почвы характеризуются как чистые в отношении V по всему участку, Zn – в точках 1, 2, 5, 8, Mn – в точках 2, 4–6, 8 и Pb – в точках 2–4, 6, 7 (табл. 4). Как слабозагрязненные характеризуются почвы в отношении Cr и Ni повсеместно, а Zn, Mn и Pb – в остальной части трассы. Загрязнение от среднего до сильного выявлено в отношении меди, а сильное и очень сильное – в отношении кобальта. Установлен следующий ряд элементов по степени загрязнения: Co>Cu>Cr>Ni>Zn>Mn>Pb>V. Наибольшие значения PI для двух элементов (Co и Zn) выявлены в среднесуглинистых сильноокислых буроземах, что подтверждает их слабую устойчивость к загрязнению [15].

Таблица 4 / Table 4

Значения коэффициента концентрации PI для разных ТМ / The values of the PI for different HM

| Разрез, горизонт | V | Cr | Co | Ni | Cu | Zn | Mn | Pb |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1AY | 0,83 | 1,48 | 4,33 | 1,13 | 3,75 | 0,86 | 1,18 | 1,56 |
| 2P | 0,90 | 1,51 | 4,38 | 1,15 | 2,99 | 0,82 | 0,78 | 0,63 |
| 3 AY | 0,84 | 1,44 | 4,18 | 1,22 | 2,33 | 1,12 | 1,13 | 0,94 |
| 4 AY | 0,72 | 1,32 | 5,23 | 1,15 | 2,55 | 1,30 | 0,89 | 0,90 |
| 5 AY | 0,76 | 1,46 | 4,87 | 1,09 | 3,91 | 0,87 | 0,99 | 1,63 |
| 6 AY | 0,79 | 1,64 | 4,83 | 1,46 | 3,38 | 1,18 | 0,93 | 0,92 |
| 7 AY | 0,79 | 1,43 | 5,18 | 1,21 | 4,45 | 1,20 | 1,04 | 0,07 |
| 8 P | 0,81 | 1,39 | 5,07 | 1,77 | 2,47 | 0,96 | 0,92 | 1,20 |

Заключение

В составе почвенного покрова участка приграничной территории преобладают различные буроземы, дерново-буро-подзолистые почвы и их агрогенные варианты. Большинство почв относятся к тяжелым суглинкам, имеют слабокислую и нейтральную среду и низкое содержание гумуса. Почвы обеспечены подвижным калием, содержание подвижного фосфора в них сильно варьирует. Использование различных показателей загрязнения выявило неоднозначную картину в оценке экологического состояния почв придорожных участков. Судя по величине геохимических индексов PI, PLI и NPI, в придорожных почвах выявлена сильная степень загрязнения ТМ, особенно Co. Показатель химического загрязнения Zc, напротив, позволяет оценить уровень загрязнения как допустимый, а значения потенциального экологического риска PERI характеризуют уровень опасности для живых организмов как незначительный. Но планируемое увеличение транспортной нагрузки способно ухудшить сложившуюся ситуацию.

Список источников

1. Добровольский Г.В., Куст Г.С., Чернов И.Ю., Добровольская Т.Г., Лысак Л.В., Андреева О.В., Степанов А.Л., Ковалева Н.О., Макеев А.О., Федотов Г.Н., Шалаев В.С., Соколов М.С., Розов С.Ю., Смагин А.В., Ковалев И.В., Медведева О.Е., Бессонова Е.А., Попова Л.В., Рыхликова М.Е., Рахлеева А.А., Мартыненко И.А. Почвы в биосфере и жизни человека. М.: МГУЛ, 2012. 584 с.
2. Krailertrattanachai N., Daojarus K., Worachart W. The Distribution of Trace Metals in Roadside Agricultural Soils, Thailand // Int. J. of Environmental Research and Public Health. 2019. Vol. 16, № 5. P. 714. Doi: 10.3390/ijerph16050714.
3. СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий. М., 2021. 75 с.
4. Богданов Н.А. Анализ информативности интегральных показателей химического загрязнения почв при оценке состояния территорий // Гигиена и санитария. 2012. № 1. С. 10–13.
5. Кунаков К.О. Противоречия в законодательстве и оценка категорий загрязнения почв тяжелыми металлами на стадии инженерно-экологических изысканий // Вестн. гос. экспертизы. 2017. № 3. URL: https://gge.ru/upload/iblock/ef3/VestnikGGE-2017-3-August_Electron.pdf (дата обращения: 04.04.2022).

6. Kowalska J. B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review // *Environmental Geochemistry and Health*. 2018. Vol. 40. P. 2395–2420.
7. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
8. М-02-0604-2007. Методика выполнения измерений массовой доли кремния, кальция, титана, ванадия, хрома, бария, марганца, железа, никеля, меди, цинка, мышьяка, стронция, свинца, циркония, молибдена в порошковых пробах почв и донных осадков рентгеноспектральным методом с применением энергодисперсионных рентгенофлуоресцентных спектрометров типа EDX фирмы Shimadzu. СПб., 2007. 17 с.
9. Загрязнение почв России токсикантами промышленного происхождения в 2015 году. Обнинск: Тайфун, 2016. 112 с.
10. Kabata-Pendias A. *Trace Elements in Soils and Plants*. 4th ed. Boca Raton: CRS Press, 2011. 548 p.
11. Жарикова Е.А. Тяжелые металлы в городских почвах: оценка содержания и экологического риска // Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2021. № 1. С. 164–173.
12. Yang L., Zhu G., Pan H., Shi P., Li J., Liu Y., Tong H. Surface dust heavy metals in the major cities, China // *Environmental Earth Science*. 2017. Vol. 76. P. 757–771. Doi: 10.1007/s12665-017-7084-9.
13. Xia X., Yang Z., Cui Y., Li Y., Hou O., Yu T. Soil heavy metal concentrations and their typical input and output fluxes on the southern Song-nen Plain, Heilongjiang Province, China // *J. of Geochemical Exploration*. 2014. Vol. 139. P. 85–96. Doi: 10.1016/j.gexplo.2013.06.03.
14. Орлов В. Холостой – это плохо. URL: <https://os1.ru/article/20604-esli-vasha-tehnika-rabotaet-na-holostom-hodu-ona-sjigaet-dengi-holostoy-eto-ploho> (дата обращения: 25.04.2022).
15. Колесников С.И., Кузина А.А., Евстегнеева И.А., Казеев К.Ш. Оценка устойчивости бурых лесных оподзоленных почв Черноморского побережья Кавказа к химическому загрязнению // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 1. С. 66–70.

References

1. Dobrovolsky G.V., Kust G.S., Chernov I.Yu., Dobrovolskaya T.G., Lysak L.V., Andreeva O.V., Stepanov A.L., Kovaleva N.O., Makeev A.O., Fedotov G.N., Shalaev V.S., Sokolov M.S., Rozov S.Yu., Smagin A.V., Kovalev I.V., Medvedeva O.E., Bessonova E.A., Popova L.V., Rykhlikova M.E., Rakhleeva A.A., Martynenko I.A. *Soils in the Biosphere and Human Life*. Moscow: Moscow State Forest University Press; 2012. 584 p. (In Russ.).
2. Kraillertrattanachai N., Daojarus K., Worachart W. The Distribution of Trace Metals in Roadside Agricultural Soils, Thailand. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019;16(5):714, doi: 10.3390/ijerph16050714.
3. SanPiN 2.1.3684-21. *Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of the territories of urban and rural settlements, for water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soils, living quarters, the operation of industrial, public premises, the organization and conduct of sanitary and anti-epidemic*. Moscow, 2021. 75 p. (In Russ.).
4. Bogdanov N. A. Analysis of the informative value of integral indicators of chemical soil contamination in the evaluation of the status of areas. *Gigiya i sanitariya = Hygiene and Sanitation*. 2012;(1):10-13. (In Russ.).
5. Kunakov K. O. Contradictions in legislation and assessment of categories of soil pollution by heavy metals at the stage of engineering and environmental surveys. *Vestn. gos. ekspertizy = Bulletin of State Expertise*. 2017;(3). Available from: https://gge.ru/upload/iblock/ef3/VestnikGGE-2017-3-August_Electron.pdf [Accessed 4th April 2022]. (In Russ.).
6. Kowalska J. B., Mazurek R., Gasiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. A review. *Environmental Geochemistry and Health*. 2018;40:2395-2420.
7. *Agrochemical methods of soil study*. Moscow: Nauka Publ.; 1975. 656 p. (In Russ.).
8. М-02-0604-2007. *Methods for measuring the mass fraction of silicon, calcium, titine, vanadium, chromium, barium, manganese, iron, nickel, copper, zinc, arsenic, strontium, lead, zirconium, and molybdenum in powder samples of soils and bottom*. St. Petersburg, 2007. 17 p. (In Russ.).
9. *Contamination of Russian soils with toxicants of industrial origin in 2015*. Obninsk: Taifun Publ.; 2016. 112 p. (In Russ.).
10. Kabata-Pendias A. *Trace Elements in Soils and Plants*. Boca Raton: CRS Press; 2011. 548 p.
11. Zharikova E. A. Assessment of heavy metals content and environmental risk in urban soils. *Izv. Tomskogo politekhn. un-ta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;(1):164-173. (In Russ.).
12. Yang L., Zhu G., Pan H., Shi P., Li J., Liu Y., Tong H. Surface dust heavy metals in the major cities, China. *Environmental Earth Science*. 2017;76:757-771, doi: 10.1007/s12665-017-7084-9.

13. Xia X., Yang Z., Cui Y., Li Y., Hou O., Yu T. Soil heavy metal concentrations and their typical input and output fluxes on the southern Song-nen Plain, Heilongjiang Province, China. *Journal of Geochemical Exploration*. 2014;139:85-96, doi: 10.1016/j.gexplo.2013.06.03.

14. Orlov V. *Single is bad*. Available from: <https://os1.ru/article/20604-esli-vasha-tehnika-rabotaet-na-holostom-hodu-ona-sjigaet-dengi-holostoy-eto-ploho> [Accessed 25th April 2022]. (In Russ.).

15. Kolesnikov C.I., Kuzina A.A., Evstegneeva I.A., Kazeev K.Sh. Assessment of stability of brown forest acidic podzolized soils of Black Sea coast of the Caucasus to chemical pollution. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2016;(1):66-70. (In Russ.).

Информация об авторах

Е.А. Жарикова – кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник.

О.М. Голодная – научный сотрудник.

А.Д. Попова – инженер.

Information about the authors

E.A. Zharikova - Candidate of Science (Biology), Associate Professor, Senior Researcher.

O.M. Golodnaya - Researcher.

A.D. Popova - Engineer.

Статья поступила в редакцию 11.05.2022; одобрена после рецензирования 01.09.2022; принята к публикации 15.11.2022.
The article was submitted 11.05.2022; approved after reviewing 01.09.2022; accepted for publication 15.11.2022.

Научная статья

УДК 631.43:631.417.2(571.63)

doi: 10.18522/1026-2237-2022-4-2-28-37

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИХ ФРАКЦИЙ И ЕГО РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ МОРФОГЕНЕТИЧЕСКОГО СВОЕОБРАЗИЯ БУРОЗЕМОВ ОСТРОВА РУССКИЙ

Лариса Алексеевна Латышева

*Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия
l.a.lat@mail.ru*

Аннотация. Охарактеризованы особенности закрепления гумусовых веществ отдельными гранулометрическими фракциями почвенных частиц для основных типов буроземов острова Русский. Показано, что диагностическим показателем морфологического разнообразия островных буроземов, отражающим различную интенсивность развития аккумулятивно-гумусового и иллювиально-гумусового процессов почвообразования в их профиле, является уровень аккумуляции углерода во фракциях ила и тонкой пыли, долевое участие углерода этих фракций в структуре общего гумуса и особенности его профилейной динамики. Установлено, что в буроземах типичных основная масса углерода приурочена к фракции ила, роль которого в закреплении органического вещества с глубиной только возрастает. В буроземах темных содержание углерода илистой фракции увеличивается почти в два раза по сравнению с буроземами типичными, а его доля в составе общего углерода почвы уменьшается. При этом возрастает насыщенность органического вещества верхнего гумусового горизонта углеродом фракции тонкой пыли. Наиболее существенные изменения в структуре общего углерода и в уровне его накопления по отдельным гранулометрическим фракциям отмечаются для буроземов темных иллювиально-гумусовых. Важной диагностической особенностью буроземов темных иллювиально-гумусовых является то, что тонкопылевая фракция участвует в накоплении органического вещества больше, чем илистая фракция, как в верхнем гумусовом горизонте, так и в подгумусовом. В нижней части профиля всех буроземов концентрация гумуса в иле возрастает почти в два раза, составляя больше половины его валового содержания в почве.

Ключевые слова: буроземы, остров, физическое фракционирование, органическое вещество, гранулометрические фракции, морфологическое разнообразие

Для цитирования: Латышева Л.А. Органическое вещество гранулометрических фракций и его роль в формировании морфогенетического своеобразия буроземов острова Русский // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 4-2. С. 28–37.

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

Original article

ORGANIC MATTER OF PARTICLE-SIZE FRACTIONS AND ITS ROLE IN THE FORMATION OF MORPHOGENETIC SPECIFICITY OF BUROZEMS ON RUSSKY ISLAND

Larisa A. Latysheva

*Pacific Institute of Geography, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia
l.a.lat@mail.ru*

© Латышева Л.А., 2022

Abstract. *The features of the fixation of humus substances by particle-size fractions of soil for the main types of burozems of the Russky Island are characterized. It is shown that the diagnostic indicator of the morphological diversity of island burozems soils, reflecting the different intensity of the development of accumulative-humus and illuvial-humus processes of soil formation in their profile, is the level of carbon accumulation in the fractions of silt and fine dust, the share of carbon of these fractions in the structure of the total humus and the features of its profile dynamics. It has been established that in typical burozem, the bulk of carbon is confined to the fraction of silt, with depth the role of silt in fixing the organic matter of these soils only increases. In dark burozem, the carbon content of the silty fraction increases almost twice as compared to typical brown soils, and its share in the composition of total soil carbon decreases. At the same time, the saturation of the organic matter of the upper humus horizon with carbon of the fine dust fraction increases. The most significant changes in the structure of total carbon and in the level of its accumulation by particle-size fractions are noted for dark illuvial-humus burozem. An important diagnostic feature of dark illuvial-humus burozem is that the fine-dusty fraction participates in the accumulation of organic matter more than the silty fraction, both in the upper humus horizon and in the sub-humus horizon. In the lower part of the profile of all burozems, the concentration of humus in the silt increases almost twice, accounting for more than half of its gross content in the soil.*

Keywords: *burozem (Cambisol), island, physical fractionation of the soil, organic matter, particle-size fractions, morphological diversity*

For citation: Latysheva L.A. Organic Matter of Particle-Size Fractions and Its Role in the Formation of Morphogenetic Specificity of Burozems on Russky Island. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(4-2):28-37. (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

Островные территории юга Приморья в силу биоклиматических особенностей условий почвообразования отличаются определенной спецификой проявления зонального процесса бурозеобразования. Исследованиями показано, что основными факторами, влияющими на формирование морфологического своеобразия островных буроземов, являются состав и динамика растительного покрова островов и морской гидротермически-импульверизационный режим увлажнения их территории [1, 2]. В проявлении интенсивности процессов почвообразования, прежде всего гумусообразования, хорошо прослеживается зависимость от расположения участков острова относительно береговой линии, движения воздушных масс, преобладающего направления ветров, а также стадии антропогенной сукцессии растительности, под которой формируются распространённые здесь буроземы, что отражается в их морфологических и химических характеристиках. Наиболее важным и чувствительным индикатором изменения природных условий почвообразования является органическое вещество почв, его количество, качество и структура. Ранее нами уже рассматривалось влияние антропогенной трансформации лесной растительности на формирование морфологического разнообразия буроземов острова Русский, проявляющееся в динамике содержания и состава их гумуса [3]. Однако современные исследования по изучению органического вещества почв напрямую связаны с представлениями о наличии в его составе различных фракций, отличающихся по прочности связи с минеральными компонентами почв. Качество и количество органического вещества, аккумулируемого отдельными гранулометрическими фракциями почвенных частиц, являются важной характеристикой, отражающей особенности и направленность почвообразовательного процесса. Поэтому для определения состава, свойств и динамики углерода в последние десятилетия активно используют физические, денситметрические методы фракционирования и их сочетания, позволяющие выявлять степень участия отдельных фракций элементарных почвенных частиц в закреплении почвенного гумуса, и их значимость в формировании его количества и качества [4, 5]. На территории Приморского края работы по изучению углерода на уровне отдельных фракций почвенных частиц не проводились, что и обусловило направление наших исследований. В настоящей публикации приводятся результаты исследований органического вещества буроземов острова Русский методом физического фракционирования, расширяющие представления о специфике процессов гумусообразования в островных буроземах и природе различий их морфологического строения и свойств.

Материалы и методики исследований

Остров Русский является самым крупным из островов в заливе Петра Великого. Его географические координаты – 42°59'44'' с.ш., 131°50'48'' в.д., площадь – около 100 км². Климатические условия острова формируются под влиянием холодных и сухих воздушных масс материкового происхождения, которые господствуют над его пространством в зимнее время (зимний муссон), и более теплых и влажных, морских воздушных масс, преобладающих в летнее время (летний муссон). Зима сухая и холодная, с сильными ветрами; лето влажное и теплое. За год выпадает до 830 мм осадков, из них до 85 % приходится на лето, когда ливневые дожди сочетаются с большим количеством дней с морозящими дождями и туманами. На территории острова хорошо прослеживаются микроклиматические различия. Во время летнего муссона на наветренной юго-восточной стороне острова чаще туманы, гуще морось и ниже температура воздуха, чем на северо-западной стороне [6]. При этом юго-западные склоны наиболее подвержены низовым пожарам и более теплообеспечены в вегетационный период.

Активное рекреационное использование территории острова и частые низовые пожары предопределили антропогенную трансформацию ее растительности, которая представлена преимущественно вторичными дубовыми, дубово-липовыми лесами, часто разреженными с хорошо развитым травяно-кустарниковым ярусом. Кустарниково-полукустарниковые заросли представлены леспедечниками или смешанными леспедцево-гмелинополынными зарослями. На открытых склонах морских террас широко распространены злаково-разнотравные сообщества, зачастую с преобладанием в составе полыни Гмелина [7].

В почвенном покрове острова доминируют буроземы, обладающие значительным разнообразием морфологических признаков и химических свойств. Диагностику и классификационное положение их проводили согласно современной классификации почв России и региональным работам [1, 3, 8, 9]. Для изучения структуры органического вещества почв методом физического фракционирования были исследованы образцы наиболее широко распространенных здесь подтипов буроземов: буроземов типичных, буроземов темных типичных и буроземов темных иллювиально-гумусовых. Последние были выделены среди типа буроземы темные на основании данных региональных исследований.

Буроземы типичные формируются на участках острова, занятых дубовыми лесами с очень слабо развитым травяно-кустарниковым ярусом. Они имеют следующее строение почвенного профиля: O–AY–BM–BC. Почвенный профиль, как правило, маломощный (50–65 см). Лесная подстилка сменяется аккумулятивно-гумусовым горизонтом AY темно-серого с буроватым оттенком цвета. Под ним залегает структурно-метаморфический горизонт BM с хорошо выраженной комковато-зернистой структурой, среднесуглинистого или глинистого состава. В средней части профиля отмечается присутствие обломков скелета крупного размера (7–15 см), доля которого увеличивается с глубиной и в горизонте BC может достигать до 80 % от объема почвы.

Морфологический облик буроземов темных типичных характеризуется наличием в верхней части их профиля темно-гумусового горизонта AU темно-серого цвета, который сменяется структурно-метаморфическим горизонтом BM или переходным AUBM с коричнево-бурой или буровато-серой окраской, который постепенно переходит в горизонт BMC. В итоге формируется профиль со следующим набором генетических горизонтов: O–AU–AUBM–BMC. Подобные почвы приурочены к изреженным дубовым лесам с примесью мелколиственных пород и сравнительно хорошо развитым травяно-кустарниковым ярусом.

Под изреженными дубовыми лесами с хорошо развитым травяно-кустарниковым ярусом (преимущественно из лещины) распространены буроземы темные иллювиально-гумусовые с набором горизонтов: O–AU–AUBMhi–BMhi–C. Главной особенностью морфологии этих почв является наличие под темногумусовым горизонтом AU хорошо выраженного иллювиально-гумусового горизонта BMhi (или переходного AUBMhi) с различной интенсивностью серых цветов окраски. Присутствие в горизонте BMhi гумусированных затеков и органоминеральных кутан на гранях почвенного скелета позволяет диагностировать его как иллювиально-гумусовый.

В ходе исследований использовались сравнительно-географический и профильно-генетический методы. Выделение гранулометрических фракций из почвенных образцов проводилось по методу Горбунова путем разминания образца до пастообразного состояния в водной среде без применения химических диспергаторов [10]. Содержание общего углерода в почве и в отдельных гранулометрических частицах определялось по методу Тюрина.

Результаты и обсуждение

Одним из факторов гумификации, определяющих важнейшие характеристики почвенного гумуса, является ее гранулометрический состав. Гумусовые вещества, аккумулируемые различными гранулометрическими фракциями почвенных частиц, значительно отличаются по своему составу, свойствам и формам связи с минеральными компонентами почв. Исследователи отмечают, что органическое вещество песчаных фракций состоит в основном из слабо- и среднеразложившихся остатков растительности и почвенной фауны. Оно наиболее подвержено минерализации и представляет собой самую лабильную часть органического вещества почв. В пылеватых частицах содержатся легкие фракции органического вещества гуматного и гуматно-фульватного типа, непрочные связанные с кристаллической решеткой минералов и наиболее чувствительные к изменению экологической ситуации окружающей среды. Органическое вещество илистой фракции представлено адсорбционными комплексами гумусовых веществ (преимущественно фульватного состава) с глинистыми минералами и оксидами-гидрооксидами железа и алюминия, достаточно устойчивых к биодegradации [11–19]. Считается, что для генетического типа лесных почв характерен более высокий уровень аккумуляции гумуса во фракции ила, для почв лесостепной и степной зоны – во фракции тонкой пыли. Изменение содержания и количественного соотношения пылеватых и илистых частиц, аккумулирующих разнокачественный гумус, свидетельствует о смещении признаков гуматности (фульватности) гумуса и смене направленности процессов гумификации в почвах [11, 12, 17–19].

Исследованные нами буроземы острова Русский характеризуются повышенной оглинённостью средней или нижней частей почвенной толщи, с хорошо выраженным элюво-иллювиальным характером профильного распределения ила и физической глины (таблица). В составе мелкозема всех подтипов буроземов преобладает фракция крупной пыли, составляющая от 25 до 34 % от общей почвенной массы. Основные различия в гранулометрическом составе рассматриваемого ряда буроземов отмечены в содержании и профильном распределении илистой и мелкопылеватой фракций. Буроземы типичные характеризуются легкоглинистым составом почвенного профиля и более высокой степенью насыщенности физической глины илом по сравнению с другими буроземами острова. Буроземы темные имеют более легкий гранулометрический состав и относятся к суглинку среднему в аккумулятивно-гумусовом горизонте, который сменяется суглинком тяжелым в переходном горизонте AUBM. В профиле буроземов темных, как и буроземов темных иллювиально-гумусовых, наблюдается более высокая степень насыщенности физической глины фракцией тонкой пыли, чем илом по всей почвенной толще, с общей тенденцией к увеличению этого показателя вниз по профилю. Данная закономерность наиболее выражена в буроземах темных иллювиально-гумусовых, что обуславливает утяжеление их гранулометрического состава до тяжелосуглинистого в AU горизонте и легкоглинистого в BMhi.

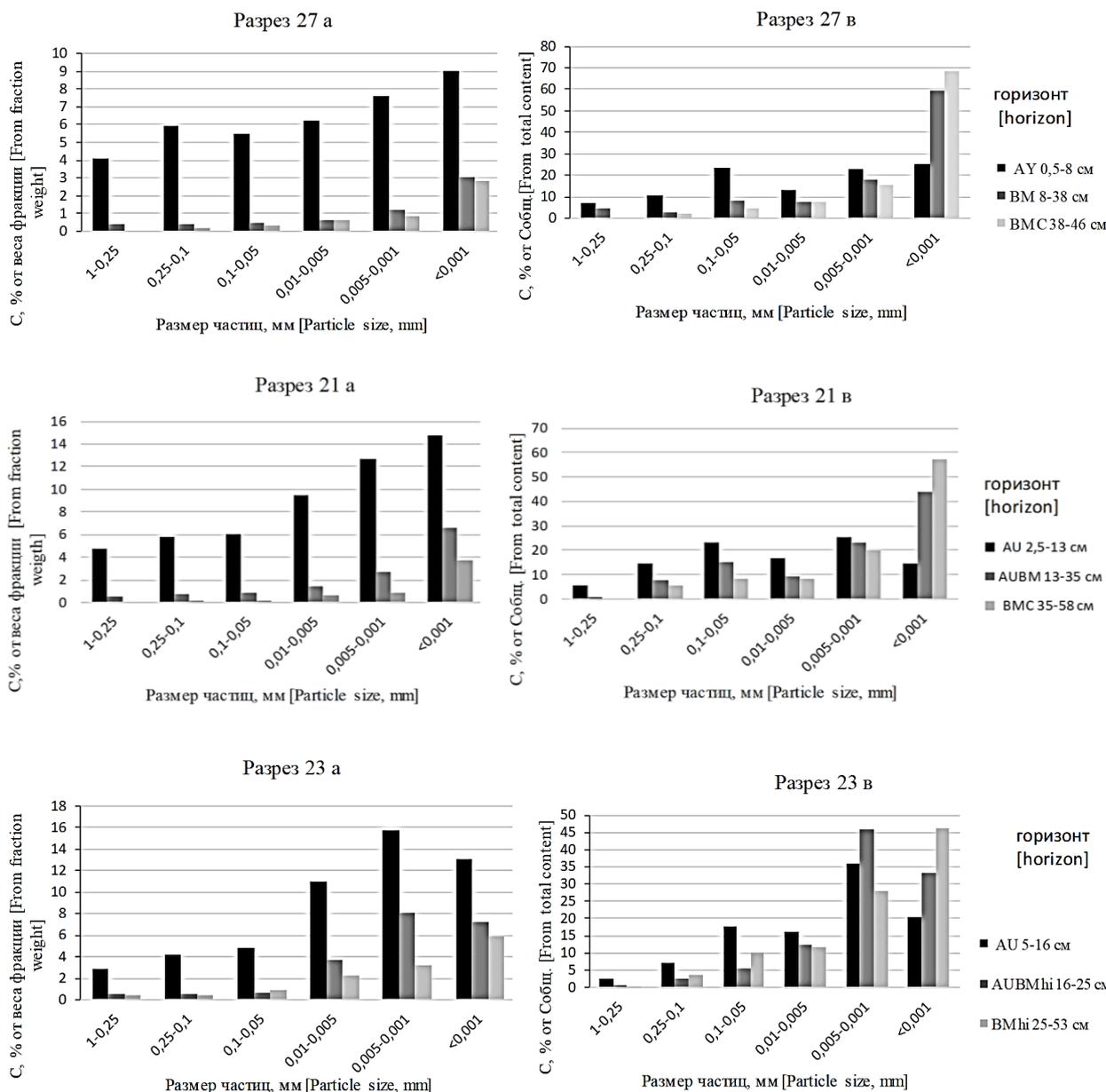
**Гранулометрический состав буроземов острова Русский
/ Particle-size distribution of the Russky Island Burozems**

| Горизонт | Глубина, см | Содержание фракций, % | | | | | | |
|---|-------------|-----------------------|-----------|-----------|------------|-------------|--------|-------|
| | | 1–0,25 | 0,25–0,05 | 0,05–0,01 | 0,01–0,005 | 0,005–0,001 | <0,001 | <0,01 |
| Размер частиц, мм | | | | | | | | |
| Бурозем типичный, разрез 27 | | | | | | | | |
| AУ | 0,5–8(15) | 10,59 | 11,68 | 27,25 | 13,57 | 19,08 | 17,83 | 50,48 |
| BM | 8(15)–38 | 12,21 | 8,05 | 24,41 | 16,16 | 17,38 | 21,79 | 55,33 |
| BMC | 38–46 | 30,13 | 10,28 | 11,23 | 12,02 | 15,77 | 20,57 | 48,36 |
| Бурозем темный, разрез 21 | | | | | | | | |
| AU | 2,5–13(27) | 9,98 | 20,28 | 30,97 | 14,58 | 16,25 | 8,04 | 38,87 |
| AUBM | 13(27)–35 | 2,91 | 20,58 | 33,96 | 12,62 | 16,90 | 13,03 | 42,55 |
| BMC | 35(40)–58 | 1,85 | 23,31 | 33,38 | 11,69 | 17,47 | 12,30 | 41,46 |
| Бурозем темный иллювиально-гумусовый, разрез 23 | | | | | | | | |
| AU | 5–16 | 7,40 | 14,29 | 32,18 | 12,82 | 19,79 | 13,52 | 46,13 |
| AUBMhi | 16–25(27) | 4,46 | 15,36 | 31,01 | 11,95 | 20,55 | 16,67 | 49,17 |
| BMhi | 25(27)–53 | 1,92 | 20,92 | 25,54 | 12,13 | 21,03 | 18,46 | 51,62 |

В условиях хорошо выраженной муссонности климата острова Русский и повышенной скелетности почвенной толщи исследуемых буроземов, обеспечивающей свободный внутрпочвенный дренаж, создаются предпосылки для пептизации и миграции пылевато-глинистых частиц и связанного с ними гумуса [20, 21]. Осаждение иллювируемого материала происходит не только в мелкоземе, но и на поверхности щебня в форме органоминеральных кутан. Процессы миграции и суспензионного переноса органоминеральных соединений по профилю буроземов обуславливают дифференциацию параметров их гумусовой системы и контролируются динамикой щелочно-кислотного состояния их почвенных растворов, отражающих пространственно-сезонное варьирование химического состава атмосферных осадков, импультверизацию морских вод и функционирование биоты [1, 20]. Ранее нами было установлено [9], что в ходе антропогенной трансформации растительности острова и сопряженного нарастания на этом фоне геохимического воздействия моря в ряду почв от буроземов типичных к буроземам темным и буроземам темным иллювиально-гумусовым наблюдается рост содержания гумуса в их аккумулятивно-гумусовых (11,02–14,05–14,92 %) и подгумусовых горизонтах (2,0–3,41–6,23 %). Наряду с этим отмечается увеличение содержания в них обменных оснований (28,93–40,4–36,02 мг-экв/100 г почвы) и снижение величины гидролитической кислотности (12,32–11,87–7,61 мг-экв/100 г почвы). Проведенные исследования органического вещества данных почв методом физического фракционирования показали, что при изменении условий гумусообразования изменяются не только их физико-химические показатели, качественный состав гумуса, но и его структура. Для лучшего понимания закономерностей распределения органического вещества по фракциям почв был сделан перерасчет содержания углерода на количество каждой из рассматриваемых фракций. Полученные результаты представлены на рисунке.

Буроземы типичные приурочены к дубово-широколиственным лесам со слаборазвитым напочвенным покровом и участкам дренируемых вершин и подветренных позиций склонов со слабым геохимическим воздействием моря. Они выделяются более кислыми условиями среды и меньшей степенью насыщенности основаниями по сравнению с другими буроземами острова, что способствует более низкому уровню стабилизации углерода в их профиле. Концентрация углерода в составе илистой фракции верхнего гумусового горизонта этих почв равна 9 %, а вклад фракции в общее содержание органики в почве занимает лидирующие позиции и составляет чуть выше 25 %. Это объясняет гуматно-фульватный тип гумификации в этой части профиля буроземов типичных (Сгк/Сфк равно 0,8) [3]. При этом содержание гумуса во фракции тонкой пыли также достаточно высоко (7,6 %). Вниз по профилю прослеживается заметное увеличение доли С илистой фракции (68 %), тип гумуса изменяется на фульватный (Сгк/Сфк равно 0,29). Согласно имеющимся литературным данным, во фракции ила накапливаются преимущественно фульвокислоты [11, 12, 14, 17–19]. Наши исследования также показали, что илистая фракция отличается преобладанием фульвокислот в составе ее гумуса [22]. В верхнем горизонте буроземов типичных отмечается наиболее высокий уровень накопления С фракции среднего и мелкого песка в составе общего С по сравнению с другими буроземами острова. Это, скорее всего, связано с превалированием поступления свежего органического вещества над процессами его минерализации на участках формирования данных почв [4, 11, 12]. Вниз по профилю содержание органики, сосредоточенной в грубых фракциях, резко снижается, и основная роль в закреплении почвенного гумуса приходится на илистую фракцию (67 %). В целом выявленные особенности распределения гумуса по гранулометрическим фракциям и профилю буроземов типичных характерны для почв лесного ряда и подтверждаются исследованиями целого ряда авторов [11, 12, 15–19].

Под антропогенными сукцессиями дубовых лесов наветренных склонов, в профиле буроземов активизируются процессы гумусонакопления, что способствует формированию более мощного, чем в буроземах типичных (8 см), темно-гумусового горизонта АU (38 см). Содержание гумуса по профилю возрастает, изменяется его структура. Уровень концентрации органического углерода во фракциях средней и мелкой пыли, а также илистой возрастает в 1,5–1,7 раза по сравнению с таковыми в буроземах типичных. Как и в буроземах типичных, в буроземах темных абсолютное содержание гумуса в илистой фракции выше (14,75 %), чем во фракции тонкой пыли (12,65 %). Однако, несмотря на это, доленое участие пылеватых частиц (25 %) в общем балансе углерода верхнего горизонта в них превышает вклад С илистой фракции (15 %). С этим фактом связан и фульватно-гуматный состав их гумуса (Сгк/Сфк равно 1,03).



Содержание углерода в гранулометрических фракциях буроземов: а – содержание углерода, % от веса фракции; в – содержание углерода, % от валового содержания в почве / Carbon content in the particle-size fractions of burozems: a - C, % from fraction weight; b - C, % from total content

Известно, что во фракции тонкой пыли накапливаются гуматы в результате обменных реакций гумусовых веществ с обменными катионами, что хорошо согласуется с данными по относительному росту содержания гуматов кальция в составе гумуса этих буроземов [3, 22]. При переходе к горизонту AUBM количество почвенного углерода, связанного с фракцией тонкой пыли, постепенно падает (23 %), а углерода илистой фракции – возрастает (44 %). Повышение содержания гумуса илистой фракции в составе общего С иллювиального горизонта буроземов темных обеспечивает рост доли фульвокислот в составе их гумуса и гуматно-фульватный тип гумусообразования. Вниз по профилю степень концентрации гумуса в иле только увеличивается, составляя в горизонте BMC более половины (57 %) от всей почвенной органики. При этом прослеживается практически однородное распределение по почвенной толще относительной доли углерода тонкопылевой фракции от его общего количества в почве, в то время как уровень закрепления гумуса этой фракцией снижается резко вниз по профилю. Такая закономерность профильного распределения этой фракции в составе почвенной органики буроземов темных отражает

начальную стадию развития в их профиле иллювиально-гумусового процесса почвообразования. Об этом свидетельствуют гумусовые затеки в нижней части аккумулятивно-гумусового горизонта, буровато-серый цвет AUBM горизонта, а также присутствие органоминеральных кутан на нижней стороне щебня в горизонте ВМС [1, 9, 20].

Более существенные изменения в структуре почвенного гумуса наблюдаются в профиле буроземов темных иллювиально-гумусовых. Уменьшение сомкнутости древостоя и увеличение в напочвенном покрове разнотравья способствуют активизации процессов гумусонакопления за счет поступления быстроразлагающихся растительных остатков, с одной стороны, и изменения гидротермического режима почв, обусловленного их геоморфологическим положением в нижней части наветренного склона в зоне активного капельно-импульверизационного привноса морских вод – с другой. Слабокислая реакция среды, высокое содержание поглощенных кальция и магния создает благоприятные условия для образования значительного количества подвижных органоминеральных соединений и активного передвижения их вниз по профилю этих буроземов. Содержание гумуса по профилю высокое, тип гумуса фульватно-гуматный как в аккумулятивно-гумусовом горизонте, так и в иллювиально-гумусовом. Наши исследования показали, что уровень концентрации углерода во фракции тонкой пыли этих буроземов (16 %) выше, чем в илистой (13 %). Доля этой фракции в составе углерода поверхностного горизонта преобладает и составляет 36 %. С ростом данного показателя связаны увеличение содержания гуминовых кислот в качественном составе их гумуса и, как следствие, фульватно-гуматный тип гумусообразования (Сгк/Сфк равно 1,15). Обращает на себя внимание более низкое абсолютное и относительное содержание в профиле углерода песчаных фракций по сравнению с другими буроземами острова. Это свидетельствует об усилении процессов минерализации растительных остатков на участке их формирования. Важной диагностической особенностью буроземов темных иллювиально-гумусовых является усиление роли тонкопылевой фракции в закреплении почвенного органического вещества в их иллювиально-гумусовых горизонтах. Доля углерода, связанного с тонкопылевой фракцией, возрастает до 45 % в горизонте AUBhi, что объясняет фульватно-гуматный (Сгк/Сфк равно 1,09) тип гумусообразования в этой части их почвенного профиля. Так как считается, что во фракции мелкой и средней пыли сосредоточено до 60 % общего количества гуминовых кислот почвы. О повышении подвижности гумусовых соединений предилистой фракции и усилении их профильной миграции вследствие развития иллювиально-гумусового процесса свидетельствуют данные исследований В.С. Аржановой и П.В. Елпатьевского [21]. Ими было установлено увеличение пылеватых накоплений мелкозема наряду с органоминеральными соединениями в составе пленочных кутан на поверхности щебня в иллювиальном горизонте буроземов япономорского побережья. Рост углерода фракции тонкой пыли в составе органического вещества иллювиального горизонта отмечал также и В.А. Кузьмин, изучавший дерново-подзолистые почвы со вторым гумусовым горизонтом, и связывал это с закреплением гумусовых веществ на поверхности пылеватых частиц и процессами их миграции вниз по профилю [23]. На распространение буроземов с высокой гумусированностью профиля под разреженными дубовыми лесами с хорошо развитым травянистым покровом на островах юга Дальнего Востока впервые обратил внимание С.В. Зонн [24]. Им отмечалось повышенное содержание в составе гумуса этих буроземов гуматов и фульватов кальция, являющихся определяющими фракциями фульватно-гуматного типа гумификации, характерного для почв лесостепной зоны. Эти данные согласуются с полученными нами ранее [3, 22, 25] и подтверждаются новыми результатами гранулометрического фракционирования органического вещества буроземов островных территорий. Более высокое содержание углерода фракции тонкой пыли по сравнению с илистой фракцией в общем содержании гумуса в почве характерно для степного и лесостепного почвообразования.

Заключение

Использование метода гранулометрического фракционирования в исследовании основных типов буроземов острова Русский позволило выявить ряд закономерностей и отличий в накоплении и закреплении гумуса отдельными гранулометрическими фракциями этих почв. Установлено, что наиболее информативно значимыми показателями для оценки различий в процессах гумусообразования в буроземах острова и формировании их морфологического разнообразия являются содержание углерода в илистой и тонкопылевой фракциях и доленое участие этих

фракций в составе почвенного органического вещества. Уровень аккумуляции углерода в гранулометрических фракциях обследованных буроземов регулируется составом и динамикой растительности островов, интенсивностью геохимического воздействия моря на участках их формирования. Для буроземов типична характерна преимущественная роль илистой фракции в связывании и закреплении органического вещества почв. В буроземах темных также наблюдается преимущественная аккумуляция гумуса илистой фракцией, в то время как долевое участие фракции пыли в формировании общего органического вещества в верхней части их профиля выше, чем илистой фракции. С глубиной степень концентрации гумуса в иле возрастает, что совпадает с ростом его фульватизации. Важной диагностической характеристикой буроземов темных иллювиально-гумусовых острова Русский является то, что тонкопылеватая фракция участвует в накоплении органики в большей степени, чем илистая, как в аккумулятивно-гумусовом горизонте, так и в иллювиально-гумусовом. Доля углерода фракции тонкой пыли от его валового содержания в почве возрастает почти в полтора раза по сравнению с другими исследованными буроземами. Это объясняет фульватно-гуматный тип гумусообразования в верхней и средней частях профиля этих буроземов. Выявленные особенности структуры органического вещества буроземов острова Русский и ее профильной динамики предопределяют своеобразие их морфологического облика и могут быть в дальнейшем использованы для решения спорных вопросов в диагностике данных почв.

Список источников

1. Пшеничникова Н.Ф., Пшеничников Б.Ф. Специфика формирования буроземов на островах залива Петра Великого (юг Дальнего Востока) // Вестн. ДВО РАН. 2013. № 5. С. 87–96.
2. Иванов А.Н., Иванов А.В. О специфике островного почвообразования (на примере островов Северо-Западной Пацифики) // Вестн. Московского ун-та. Почвоведение. 2020. № 2. С. 10–16.
3. Латышева Л.А. Влияние антропогенной трансформации лесной растительности на динамику содержания и состав гумуса в буроземах островных территорий юга Приморья // Вестн. Томского гос. ун-та. Биология. 2014. № 2 (26). С. 23–32.
4. Ерохова А.А., Макаров М.И., Моргунов Е.Г., Рыжова И.М. Изменение состава органического вещества дерново-подзолистых почв в результате естественного восстановления леса на пашне // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1308–1314.
5. Ванюшина А.Я., Травникова Л.С. Органоминеральные взаимодействия в почвах (обзор литературы) // Почвоведение. 2003. № 4. С. 418–428.
6. Ластовецкий Е.И., Якунин Л.П. Гидрометеорологическая характеристика Дальневосточного государственного морского заповедника // Цветковые растения островов Дальневосточного морского заповедника. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1981. С. 18–33.
7. Урусов В.М., Чипизубова М.Н. Динамика растительного покрова Дальнего Востока. Владивосток: Дальневосточный фед. ун-т, 2013. 126 с.
8. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
9. Пшеничников Б.Ф., Пшеничникова Н.Ф., Латышева Л.А. Антропогенная динамика морфологического строения и лесорастительных свойств буроземов острова Русский // Вестн. КрасГАУ. 2010. № 12 (51). С. 24–28.
10. Горбунов Н.И. Высокодисперсные минералы и методы их изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 302 с.
11. Тищенко С.А., Безуглова О.С. Гумусное состояние почв локально переувлажненных ландшафтов Нижнего Дона // Почвоведение. 2012. № 2. С. 156–165.
12. Трофименко К.И., Кизяков Ю.Е. Органическое вещество отдельных гранулометрических фракций основных типов почв Предкавказья // Почвоведение. 1967. № 2. С. 82–90.
13. Asano M., Wagai R. Distinctive organic matter pools among particle-size fractions detected by solid-state ^{13}C -NMR, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analyses only after strong dispersion in an allophanic Andisol // Soil Science and Plant Nutrition. 2015. Vol. 61, № 2. P. 242–248.
14. Tarchitzky J., Hatcher P.G., Chen Y. Properties and distribution of humic substances and inorganic structure-stabilizing components in particle-size fractions of cultivated Mediterranean soils // Soil Science. 2000. Vol. 165, № 4. P. 328–342.
15. Kanda T., Tamura K., Asano M., Tsunekawa A., Nakamura T. The ^{13}C and ^{15}N natural abundances to characterize soil organic matter associated with clay minerals in Eurasian steppe soils // J. of Arid Land Studies. 2015. Vol. 25, № 3. P. 153–156.

16. Grüneber E., Schöning I., Hessenmöller D., Schulze E.D., Weisser W.W. Organic layer and clay content control soil organic carbon stocks in density fractions of differently managed German beech forests // *Forest Ecology and Management*. 2013. Vol. 303. P. 1–10.

17. Овчинникова М.Ф. Влияние длительного осушения на содержание и состав гумуса в дерново-подзолистых почвах и их механических фракций // *Вестн. Московского ун-та. Почвоведение*. 2016. № 4. С. 24–32.

18. Овчинникова М.Ф. Особенности трансформации гумусовых веществ дерново-подзолистой почвы, нарушенной строительством трассы магистрального трубопровода // *Вестн. Московского ун-та. Почвоведение*. 2019. № 1. С. 35–41.

19. Крыщенко В.С., Рыбьянец Т.В., Замулина И.В., Бирюкова О.А., Кравцова Н.Е. Моделирование отношений элементов полидисперсной системы почв с использованием эталона сравнения // *Живые и биокосные системы*. 2013. № 2. С. 9.

20. Пшеничников Б.Ф., Пшеничникова Н.Ф. Генезис и эволюция приокеанических буроземов (на примере японского побережья). Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2002. 292 с.

21. Аржанова В.С., Елпатьевский П.В. Геохимия ландшафтов и техногенез. М.: Наука, 1990. 196 с.

22. Латышева Л.А. Роль органического вещества илистой фракции в динамике качественного состава гумуса буроземов острова Рейнеке // *Вестн. Томского гос. ун-та. Биология*. 2015. № 3 (31). С. 17–26.

23. Кузьмин В.А. Органическое вещество механических фракций дерново-подзолистых почв со вторым гумусовым горизонтом Окско-Ангарского междуречья // *Почвоведение*. 1969. № 6. С. 3–11.

24. Зонн С.В. Особенности аллитного почвообразования на островах Приморья и Дальнего Востока // *Изучение и освоение природной среды*. М.: Наука, 1976. С. 125–137.

25. Латышева Л.А. Органическое вещество отдельных гранулометрических фракций и его роль в антропогенной динамике буроземов острова Рейнеке // *Вестн. КрасГАУ*. 2013. № 1. С. 35–39.

References

1. Pshenichnikova N.F., Pshenichnikov B.F. Specificity of burozems formation on the Peter the Great Bay Island (south of the Russian Far East). *Vestn. DVO RAN = Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2013;(5):87-96. (In Russ.).

2. Ivanov A.N., Ivanov A.V. About specifics of the Island soil formations (on the example of the Islands of Northwest Pacific). *Vestn. Moskovskogo un-ta. Pochvovedenie = Moscow University Bulletin. Soil Science*. 2020;(2):10-16. (In Russ.).

3. Latysheva L.A. Influence of forest vegetation anthropogenic transformation on dynamics of humus content and composition in burozems of the island territory in the southern part of Primorsky Krai (Russia). *Vestn. Tomskogo gos. un-ta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2014;(2):23-32. (In Russ.).

4. Erokhova A.A., Makarov M.I., Morgun E.G., Ryzhova I.M. Effect of the natural reforestation of arable land of the organic matter composition in soddy-podzolic soils. *Eurasian Soil Science*. 2014;(11):1110-1106.

5. Vanyushina A.Ya., Travnikova L.S. Organic-mineral interaction in soils: a review. *Eurasian Soil Science*. 2003;36(4):379-387.

6. Lastovetskiy E.I., Yakunin L.P. Hydrometeorological characteristics of the Far Eastern State Marine Reserve. *Flowering plants of the Far Eastern Islands Marine Reserve*. Vladivostok: Far Eastern Scientific Center of the USSR Press; 1981:18-33. (In Russ.).

7. Urusov V.M., Chipizubova M.N. *The dynamics of the vegetation cover of the Far East*. Vladivostok: Far Eastern Federal University Press; 2013. 126 p. (In Russ.).

8. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Russian soil classification system*. Smolensk: Oikumena Publ.; 2004. 342 p. (In Russ.).

9. Pshenichnikov B.F., Pshenichnikova N.F., Latysheva L.A. Antropogenous dynamics of burozem morphological structure and properties for forest growing in the Russian island. *Vestnik KrasGAU = Bulletin of KrasGAU*. 2010;(12):24-28. (In Russ.).

10. Gorbunov N.I. *Highly dispersed minerals and methods of their study*. Moscow: USSR Academy of Sciences Press; 1963. 302 p. (In Russ.).

11. Tishchenko S. A., Bezuglova O.S. The humus state of the soils of locally hydromorphic landscapes in the lower reaches of the Don river. *Eurasian Soil Science*. 2012;45(2):132-140.

12. Trofimenko K.I., Kizyakov Yu.E. Organic matter of separate granulometric fractions of the main types of Ciscaucasian soils. *Pochvovedenie = Soil Science*. 1976;(2):82-90. (In Russ.).

13. Asano M., Wagai R. Distinctive organic matter pools among particle-size fractions detected by solid-state ^{13}C -NMR, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analyses only after strong dispersion in an allophanic Andisol. *Soil Science and Plant Nutrition*. 2015;61(2):242-248.

14. Tarchitzky J., Hatcher P.G., Chen Y. Properties and distribution of humic substances and inorganic structure-stabilizing components in particle-size fractions of cultivated Mediterranean soils. *Soil Science*. 2000;165(4):328-342.
15. Kanda T., Tamura K., Asano M., Tsunekawa A., Nakamura T. The ¹³C and ¹⁵N natural abundances to characterize soil organic matter associated with clay minerals in Eurasian steppe soils. *Journal of Arid Land Studies*. 2015;25(3):153-156.
16. Grüneberg E., Schöning I., Hessenmöller D., Schulze E.D., Weisser W.W. Organic layer and clay content control soil organic carbon stocks in density fractions of differently managed German beech forests. *Forest Ecology and Management*. 2013;303:1-10.
17. Ovchinnikova M.F. Effect of long-term drainage on the content and composition of humus in soddy-podzolic soils and their mechanical fractions. *Vestn. Moskovskogo un-ta. Pochvovedenie = Moscow University Bulletin. Soil Science*. 2016;(4):24-32. (In Russ.).
18. Ovchinnikova M.F. Peculiarities of transformation of humus substances in the soddy-podzolic soil, disturbed by the main pipeline construction. *Vestn. Moskovskogo un-ta. Pochvovedenie = Moscow University Bulletin. Soil Science*. 2019;(1):35-41. (In Russ.).
19. Kryshchenko V.S., Rybyanets T.V., Zamulina I.V., Biryukova O.A., Kravtsova N.E. Simulation of correlation the elements of a polydisperse soil system based on a reference standart. *Zhivye i biokosnye sistemy = Living and Biocontainable Systems*. 2013;(2):9. (In Russ.).
20. Pshenichnikov B.F., Pshenichnikova N.F. *Genezis and evolution of maritime burozems (at the example of the Japanese Sea coast)*. Vladivostok: Far Eastern University Press; 2022. 292 p. (In Russ.).
21. Arzhanova V.S., Elpat'evskii P.V. *Geochemistry of landscapes and technogenesis*. Moscow: Nauka Publ.; 1990. 196 p. (In Russ.).
22. Latysheva L.A. The role of clay fraction organic matter in the dynamics of the qualitative composition of humus burozems of Reineke Island. *Vestn. Tomskogo gos. un-ta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2013;(3):17-26. (In Russ.).
23. Kuzmin V.A. The organic matter of mechanical fractions of OB-Angara inter-fluve soddy-podzolic soils with second humus horizon. *Pochvovedenie = Soil Science*. 1976;(6):3-11. (In Russ.).
24. Zonn S.V. Specifics of allitic soil formation on the island of the Primorye and the Far East. *Study and development of the natural environment*. Moscow: Nauka Publ.; 1976:125-137. (In Russ.).
25. Latysheva L.A. Organic matter of separate granulometric fraction and its role in antropogenic dynamic of humus status of burozem of Reineke Island. *Vestnik KrasGAU = Bulletin of KrasGAU*. 2013;(1):35-39. (In Russ.).

Информация об авторе

Л.А. Латышева – научный сотрудник, лаборатория биогеографии и экологии.

Information about the author

L.A. Latysheva - Researcher, Laboratory of Biogeography and Ecology.

Статья поступила в редакцию 06.06.2022; одобрена после рецензирования 30.06.2022; принята к публикации 15.11.2022.
The article was submitted 06.06.2022; approved after reviewing 30.06.2022; accepted for publication 15.11.2022.

Научная статья

УДК 553.98

doi: 10.18522/1026-2237-2022-4-2-38-44

ВЛИЯНИЕ ГЛУБИННОГО ПОЛОЖЕНИЯ КРОВЛИ ПЛАСТА С₂В И МЕЖСОЛЕВЫХ МУЛЬД НА ДОБЫЧНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СКВАЖИН ЛЕВОБЕРЕЖНОЙ ЧАСТИ АСТРАХАНСКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Роман Назифович Лутфуллин^{1,2}

¹Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия,

²ООО «Газпром добыча Астрахань», Астрахань, Россия

roman.lutfullin@mail.ru

Аннотация. Строительство горизонтальных скважин требует более точного прогноза фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллектора для оперативной корректировки их траектории. Практическая значимость и актуальность работы состоят в обосновании возможности наиболее полной реализации потенциала эксплуатационных скважин при разбуривании новых площадей в левобережной части Астраханского газоконденсатного месторождения.

Цель исследования – выявление корреляционных зависимостей зон обводнения и низких ФЕС от геологических факторов; формирование рекомендаций по проводке горизонтальных скважин.

Проанализировано обводнение скважин в зависимости от их положения на структурной поверхности продуктивного пласта С₂в, продолжительности периода безводной эксплуатации, периода обводнения и работы. Изучены особенности расположения зон с низкими ФЕС продуктивных отложений. По результатам проведенных исследований установлено: высокая величина водогазового фактора и быстрое обводнение эксплуатационных скважин обусловлены высокими отметками вскрытия продуктивного горизонта (выше –3850 м) и зонами вертикальной трещиноватости; зоны с низкими ФЕС продуктивного пласта С₂в приурочены по кровле соляной толщи Р₁к_г к наиболее глубоким областям межсолевых мутьд. Сформированы следующие рекомендации по проводке скважин для наиболее полной реализации их потенциала: 1) в зонах с высоким либо низким расположением кровли башкирского горизонта целесообразно бурить скважины с горизонтальным профилем; 2) при проводке горизонтальных скважин в межсолевых мутьдах и попадании при вскрытии продуктивного пласта в зоны низких ФЕС необходимо рассмотреть возможность смены азимута в направлении борта мутьды.

Ключевые слова: горизонтальные скважины, обводнение, фильтрационно-емкостные свойства, водогазовый фактор, межсолевые мутьды, газонасыщенные толщины, продуктивный горизонт, вертикальная трещиноватость, геонавигация, депрессия на пласт

Для цитирования: Лутфуллин Р.Н. Влияние глубинного положения кровли пласта С₂в и межсолевых мутьд на добычные возможности скважин левобережной части Астраханского газоконденсатного месторождения // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 4-2. С. 38–44.

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

Original article

THE INFLUENCE OF THE DEEP POSITION OF THE ROOF OF THE С₂В FORMATION AND SALT SWALLY ON THE PRODUCTION CAPABILITIES OF WELLS IN THE LEFT-BANK PART OF THE ASTRAKHAN GAS CONDENSATE FIELD

Roman N. Lutfullin^{1,2}

¹Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia,

²Gazprom Dobycha Astrakhan LLC, Astrakhan, Russia

roman.lutfullin@mail.ru

© Лутфуллин Р.Н., 2022

Abstract. *The construction of horizontal wells requires a more accurate prediction of the filtration and reservoir properties of the reservoir for operational correction of their trajectory. The practical significance and relevance of the work consists in substantiating the possibility of the fullest realization of the potential of production wells when drilling new areas on the Left Bank of the Astrakhan gas condensate field.*

The purpose of the study is to identify the correlation dependencies of watering zones and low porosity and permeability properties on geological factors and to form recommendations for the horizontal wells drilling.

The watering of wells is analyzed depending on the position of drilled wells on the structural surface of the productive reservoir C_{2b}, the duration of the period of "waterless" operation of wells, the period of watering and well operation. The features of the location of zones with low porosity and permeability properties of productive deposits are studied. According to the results of the conducted research, definitely: the high value of the water-gas factor and the rapid watering of production wells is due to the high opening marks of the productive horizon (above -3850 m) and zones of vertical fracturing; zones with low porosity and permeability properties of the productive reservoir C_{2b} are confined along the roof of the salt strata P_{1kir} to the deepest areas of salt swally. The following recommendations on the drilling of wells for the fullest realization of their potential have been formed: 1) in areas with a high or low location of the roof of the Bashkir horizon, it is advisable to drill wells with a horizontal profile; 2) when conducting horizontal wells in salt swally and getting into the zones of low porosity and permeability properties during the opening of the productive reservoir, it is necessary to consider the possibility of changing the azimuth in the direction of the side of the swally.

Keywords: *horizontal wells, watering, porosity and permeability properties, water-gas factor, salt swally, gas-saturated thicknesses, producing horizon, vertical fracturing, geonavigation, depression on the formation*

For citation: Lutfullin R.N. The Influence of the Deep Position of the Roof of the C_{2b} Formation and Salt Swally on the Production Capabilities of Wells in the Left-Bank Part of the Astrakhan Gas Condensate Field. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(4-2):38-44. (In Russ.).

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

С 2014 г. в левобережной части Астраханского газоконденсатного месторождения (АГКМ) началось строительство горизонтальных скважин, что потребовало более точного прогноза фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллектора для оперативной корректировки траектории скважины при строительстве на неразбуренной части АГКМ.

Поэтому оценка ФЕС сложного карбонатного коллектора и выявление корреляционной зависимости от структурной поверхности, трещиноватости и зон пониженных ФЕС, которые при дальнейшей разработке могут вызвать проблемы по обводнению и малым дебитам эксплуатационных скважин в левобережной части АГКМ, являются актуальной темой исследования.

Практическая значимость работы состоит в обосновании возможности наиболее полной реализации потенциала эксплуатационных скважин при расширении добычи углеводородного сырья и разбуривании новых площадей в левобережной части АГКМ. Геолого-геофизическая оценка сложных типов коллекторов на основе обобщения геолого-геофизических данных и анализа строительства горизонтальных скважин АГКМ позволит выбирать наиболее эффективную траекторию горизонтальных скважин при проектировании, принимать оперативные решения по корректировке траектории при строительстве эксплуатационных скважин.

Среди наиболее важных геолого-технических факторов, кроме технического состояния, не позволяющих наиболее полно реализовать потенциал эксплуатационной скважины, можно выделить катастрофическое обводнение скважины, которое может проявиться либо в ближайшие годы после ввода скважины в эксплуатацию, либо в течение 15 лет эксплуатации; пониженные ФЕС коллектора. Эти геолого-технические факторы не обеспечивают ожидаемого дебита скважины, а иногда приводят к ее ликвидации, что может негативно повлиять на поддержание или увеличение добычи.

Вопрос механизма обводнения скважин стоит перед специалистами, занимающимися разработкой левобережной части АГКМ, уже на протяжении многих лет [1–3]. Но однозначного ответа на него пока нет. ФЕС продуктивной толщи башкирских известняков по площади и разрезу не позволяют выявить четкие закономерности распределения эффективных коллекторов. Это связано с фациальной неоднородностью, а также седиментационными и тектоническими факторами. Закономерности образования и сохранения емкости карбонатных каменноугольных отложений еще не до

конца изучены [4]. Анализ продолжительности периода безводной эксплуатации скважин, положения их пробуренных забоев и интервалов перфорации/открытого ствола относительно положения газодляного контакта (ГВК) не обнаружил никакой зависимости от различных факторов геолого-технического порядка [1, 3]. Обводненность эксплуатационных скважин объяснялась литологическими и петрофизическими характеристиками коллекторов, а также наличием зон вертикальной трещиноватости, которые не поддаются картированию.

В процессе анализа работы скважин и особенностей их обводнения [5, 6] автором была выявлена закономерность – высокая величина водогазового фактора (ВГФ) в большинстве случаев соответствует высоким отметкам вскрытия продуктивного горизонта в интервале глубин от –3718 до –3850 м. На рис. 1 показаны скважины с наиболее сильной обводненностью (601, 220Д, 97, 206, 87, 215, 253).

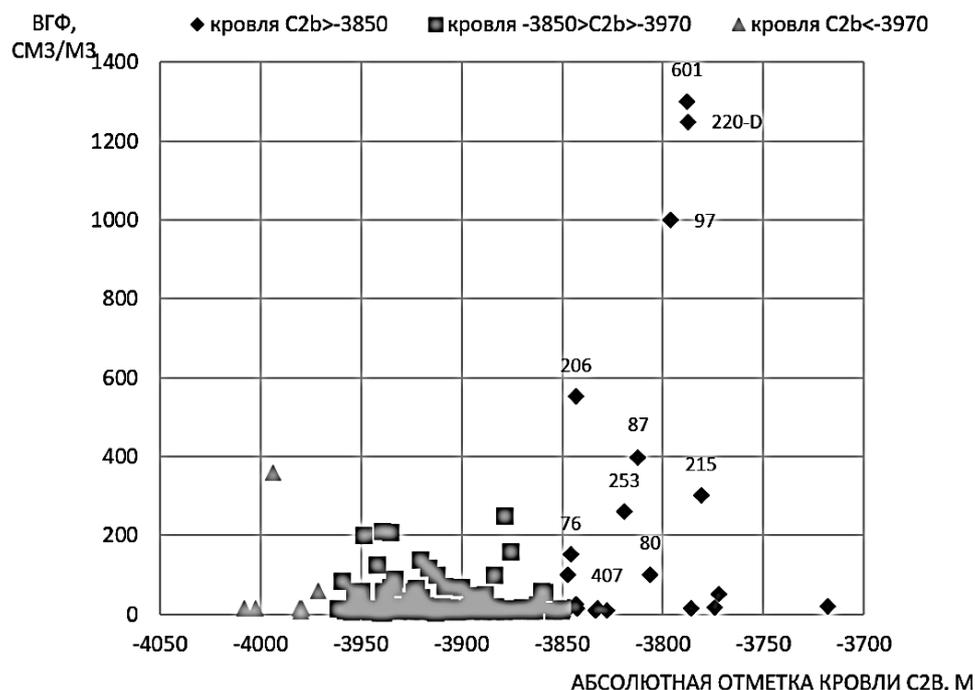


Рис. 1. Корреляционная связь между обводнением продукции скважин и положением кровли продуктивного пласта C_{2b} / Fig. 1. Correlation between the watering of well production and the position of the roof of the productive reservoir C_{2b}

Для скважин с низкой структурной поверхностью продуктивного пласта вероятность обводнения выше, чем со средней, однако по причине обводненности выводятся из эксплуатации преимущественно скважины с высоким залеганием кровли C_{2b}.

Процесс обводнения ряда скважин с высоким залеганием кровли C_{2b} идет очень быстро и не поддается регулированию притока подошвенных вод с помощью ограничения по дебиту или периодической остановки скважин в отличие от скважин с низким или средним залеганием кровли C_{2b}. Прогрессирующее обводнение скважин при соизмеримом с соседними скважинами отборе газа (накопленная добыча) и большем расстоянии до ГВК возможно из-за преобладания трещинно-порового коллектора (развиты микротрещины преобладающей вертикальной ориентировки со значительной сообщаемостью). Трещиноватость обуславливает анизотропию проницаемости [3].

Таким образом, из 189 скважин с ВГФ от 5 до 1300 см³/м³ у 22 абсолютная отметка выше 3850,4 м, из них 10 имеют ВГФ более 100 см³/м³; из остальных скважин с абсолютной отметкой ниже 3850,4 м всего у 11 скважин ВГФ более 100 см³/м³. При этом скважины с абсолютной отметкой 3850,4 м и выше обводнились катастрофически, что требует их периодической остановки в процессе эксплуатации (220Д, 601, 97, 87, 253, 206) и даже ликвидации. У скважин с абсолютной отметкой 3850,4 м и ниже ВГФ не превышает 212 см³/м³. Они работают очень длительное время.

Кроме фактора обводнения скважин, еще один важный фактор, не позволяющий полно реализовать потенциал эксплуатационной скважины, – это зоны пониженных ФЕС коллектора. Продуктивные отложения левобережной части АГКМ представлены толщей органогенных карбонатных известняков башкирского яруса, залегающих на глубинах от –3720 до –4060 м. Они сложены разнофациальными известняками и характеризуются довольно резкой седиментационной неоднородностью, поэтому фильтрационно-емкостные параметры пород-коллекторов подвержены значительной изменчивости как по площади, так и по разрезу. Залежь месторождения массивная.

Неоднородность строения коллекторов можно оценить по параметрам, характеризующим ФЕС пород: общие и эффективные газонасыщенные толщины, а также значения средневзвешенной пористости и газонасыщенной емкости.

Если оценить распределение средневзвешенных значений пористости газонасыщенной толщи месторождения, то минимальные значения составят 6,3 %, а максимальные – 13,6 %. Распределение средневзвешенных значений пористости пород-коллекторов определяется в основном тектоно-седиментационным фактором. Возможно, эти узкие зоны связаны с зонами разуплотнения (зона дробления), которые с течением геологического времени в периоды тектонической пассивности и стабилизации подвергаются интенсивному воздействию циркулирующих пластовых вод, в результате чего первоначально высокопроницаемые каналы оказываются залеченными выпавшими из растворов гидротермальными минералами [7]. Наиболее характерными и распространенными для продуктивной толщи месторождения являются процессы кальцитизации. Повсеместно распространена катагенетическая кальцитизация заполнения, приведшая в отдельных зонах к полному запечатыванию или частичному сокращению объема пор и трещин. На месте седиментационных пор среднего и крупного размера сформировалась сеть тонких и ультратонких остаточных пор кальцитизации [8].

Основные черты геологической модели АГКМ [2]:

- резервуар АГКМ представляет собой гидродинамически единое проницаемое тело, в котором в виде изолированных линз залегают пласты-неколлекторы;
- продуктивная толща экранируется сверху нижнепермской крышкой;
- в строении башкирского резервуара принимает участие мощная толща генетически однородных пористых и проницаемых карбонатных отложений;
- пористость эффективных пород-коллекторов изменяется, по данным исследования керна, от 6 до 19 % при среднем значении 9,2 %, проницаемость – от 0,01 до 10,0 мД при среднем значении 0,2 мД;
- коллекторы обладают значительной трещиноватостью, в силу чего среднее значение проницаемости по гидродинамическим исследованиям составляет 1,17 мД.

В разрезе АГКМ выделяются подсолевой (продуктивный) и надсолевой этажи осадочного чехла, которые разделяются регионально выдержанным флюидоупором толщи соленосных пород раннепермского возраста. Структурный план надсолевых отложений обусловлен проявлением соляной тектоники. В пределах левобережной части АГКМ расположены соляные купола и компенсационные мульды. Вследствие проявления соляной тектоники мощность соленосных нижнепермских отложений на небольших расстояниях значительно варьирует и достигает 3,5 км. Выполнение мульды включает породы триаса, юры, нижнего и верхнего мела и палеогена. Наиболее высокие отметки залегания поверхности соли в куполах – 500–1000 м.

Кунгурские соленосные отложения являются одним из факторов, опосредованно влияющих на продуктивность скважин и в какой-то мере – на газодинамические условия в самом продуктивном горизонте. Некоторые теоретические предпосылки зависимости повышенной продуктивности от наличия и мощности кунгурских отложений могут быть объяснены в том числе и различием в плотности горных пород – в мульдах и в районе соляных куполов, если предположить, что определяющее влияние на величину пластового давления в системе оказывает геостатическое давление. Качественная и в первом приближении количественная оценка территории месторождения по удельной продуктивности скважин зависит от двух главных компонент – эффективной газонасыщенной емкости продуктивного горизонта и мощности перекрывающих продуктивный горизонт кунгурских отложений [9].

Мы видим, что есть определенная связь строения подсолевого комплекса и структурной поверхности солевого. При анализе структурных поверхностей продуктивных отложений башкир-

ского яруса и соленосных отложений кунгурского яруса нижней перми выявлена закономерность. Зоны с низкими ФЕС в левобережной части АГКМ располагаются под самыми глубокими частями межкупольных мульд. В левобережной части АГКМ в процессе разбуривания и разработки выявлено всего три такие зоны: 1-я зона расположена в Ширяевской мульде и охватывает скважины 54, 60, 69; 2-я зона – в Южно-Аксарайской мульде, скважина 316; 3-я зона – в Аксарайской мульде, скважины 714, Д-2, 901, 903 (рис. 2). Эффективные газонасыщенные толщины в этих зонах составляют 0,8–28,3 м. В зонах со средними и высокими ФЕС эта величина находится в диапазоне от 32,1 до 206,4 м [2].

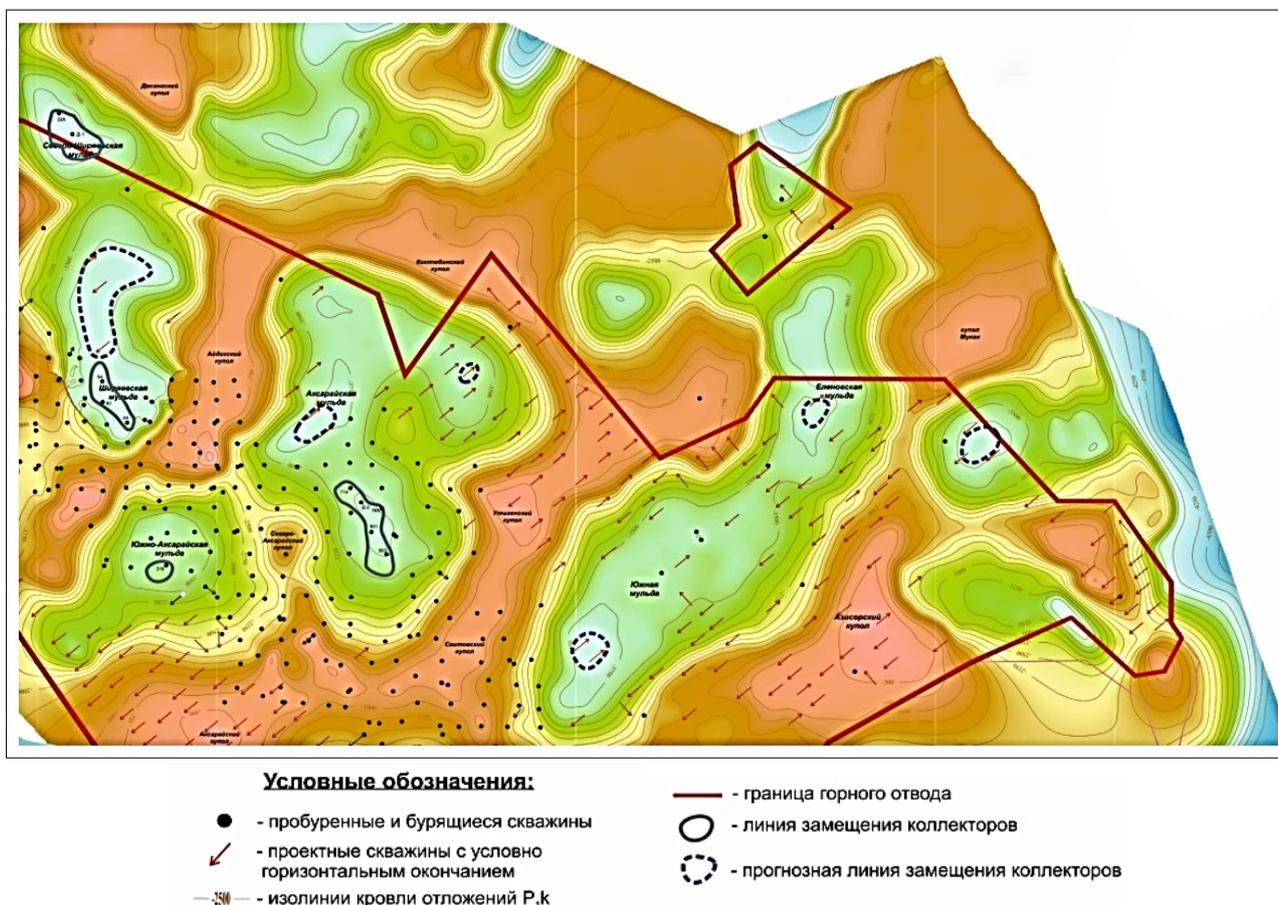


Рис. 2. Расположение зон с низкими ФЕС продуктивной толщи в левобережной части АГКМ в зависимости от солянокупольной тектоники / Fig. 2. Location of zones with low filtration-capacitance properties of the productive strata on the left-bank part of the Astrakhan gas condensate field depending on salt dome tectonics

Таким образом, определены факторы риска для прогноза зон с низкими ФЕС. Это позволит выявлять по сейсморазведочным данным зоны с низкими ФЕС в левобережной части АГКМ на неразбуренных участках и, возможно, скорректировать окончание горизонтальных скважин по траектории и азимуту. На неразбуренной части в предполагаемых зонах с низкими ФЕС могут оказаться следующие проектные скважины: 1) 14041 и 14042; 2) 10012; 3) 551, 572 и 574; 4) 732 и 735; 5) 769. При низких значениях коэффициента пористости по данным геонавигации возможно рассмотреть изменение азимута ствола в продуктивном горизонте в направлении борта межсолевой мульды (увеличение мощности соли).

Выявленные закономерности:

1) высокая величина ВГФ и быстрое обводнение эксплуатационных скважин в подавляющем большинстве случаев соответствуют высоким отметкам вскрытия продуктивного горизонта в интервале глубин от –3718 до –3850 м и зонам вертикальной трещиноватости;

2) наличие геоморфологической (корреляционная) связи межсолевых мульд с пространственным расположением зон с низкими ФЕС продуктивного коллектора может иметь значение при проектировании дальнейшего разбуривания и эксплуатации левобережной части

АГКМ горизонтальными скважинами с различными вариантами заканчивания в продуктивном пласте [2].

В технологическом проекте разработки [2], принятом в 2015 г., предусматривалось для дальнейшего освоения месторождения применение наклонно направленных скважин, которые заканчиваются открытым стволом длиной до 800 м, с забоем на 40 м выше ГВК и три варианта окончания горизонтального ствола в продуктивном горизонте: 1) с постоянным набором кривизны (зенитный угол от 80° до 90°); 2) с наклонным участком; 3) с восходящим участком. Но в процессе строительства ряда скважин оказалось, что наиболее приемлемым является J-образный профиль с постоянным набором кривизны открытого ствола в продуктивном горизонте и выходом на пологий (зенитный угол от 60° до 80°) или горизонтальный (зенитный угол от 80° до 90°) участок. Это отражено в дополнении к технологическому проекту разработки, принятом в 2021 г. [10]. При проектировании конструкции скважин и их профилей на конкретных точках заложения необходим индивидуальный подход в зависимости от горно-геологических условий и особенностей на различных участках месторождения.

В зонах с высоким расположением кровли башкирских отложений и вероятным преобладанием вертикальной трещиноватости коллектора предлагается строить скважины с постоянным набором угла и горизонтальным стволом в целевых отложениях. Данная конструкция может быть целесообразна для снижения скорости подъема подошвенных вод из-за уменьшения разности пластового и забойного давления. Для зон с низким расположением кровли башкирских отложений также необходимо вскрывать целевой интервал с постоянным набором угла и горизонтальным стволом в нем вследствие близкого расположения зоны ГВК и малой мощности продуктивных отложений. Для остальных зон можно вскрывать продуктивный пласт стволом с наклонным окончанием. В дальнейшем учет глубины залегания кровли башкирских отложений при выборе конструкции скважин может способствовать увеличению срока эксплуатации скважин, продлению безводного периода и, как следствие, увеличению добычных возможностей.

Результаты работы целесообразно использовать при планировании и организации мероприятий по проектированию и бурению скважин на подсолевые продуктивные отложения на Астраханском, Западно-Астраханском, Ковыктинском и ряде других нефтегазовых месторождений, что повысит обоснованность принятия технико-технологических решений.

Список источников

1. Лапшин В.И., Масленников А.И., Калачихина Ж.В. [и др.]. Методические основы контроля за процессом обводнения скважин при разработке Астраханского ГКМ. М.: Газпром, 1999. 62 с.
2. Технологический проект разработки Астраханского газоконденсатного месторождения: в 3 т., 5 кн.: отчет. Развилка: Газпром ВНИИГАЗ, 2015.
3. Авторское сопровождение (надзор) разработки Астраханского ГКМ и подготовка рекомендаций по его дальнейшему освоению на 2020–2022 гг.: отчет / рук. С.С. Ярыгин. Развилка: Газпром ВНИИГАЗ, 2020.
4. Поляков Е.Е., Федорова Е.А., Комаров А.Ю. [и др.]. Решение научных проблем при подсчете запасов углеводородов Астраханского газоконденсатного месторождения // Вести газовой науки : науч.-техн. сб. 2017. № 3 (31). С. 141–150.
5. Лутфуллин Р.Н. Особенности обводнения скважин в левобережной части Астраханского ГКМ // Нефть и газ – 2021 : сб. тр. 75-й Междунар. молодеж. науч. конф. М.: Изд. центр РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2020. С. 233–240.
6. Лутфуллин Р.Н. Обводнение эксплуатационных скважин левобережной части Астраханского ГКМ в зависимости от геологического строения продуктивной толщи // Сб. трудов 65-й Междунар. науч. конф. Астраханского гос. техн. ун-та. Астрахань: АГТУ, 2021.
7. Казаева С.В., Григоров В.А. Физико-литологические свойства пород-коллекторов Астраханского ГКМ // Наука и технология углеводородов. 2001. № 4 (17). С. 20–25.
8. Политыкина М.А., Ильин А.Ф., Кан В.Е. Геологическое строение продуктивной толщи Астраханского газоконденсатного месторождения как объекта разработки. М.: ВНИИЭгазпром, 1988. 37 с.
9. Токман А.К., Масленников А.И., Рожков В.Н., Захарчук В.А., Казаева С.В. Прогнозная оценка удельной продуктивности скважин АГКМ // Сб. науч. тр. АНИПИгаз. 2004. № 5.
10. Дополнение к технологическому проекту разработки Астраханского ГКМ: отчет. Развилка: Газпром ВНИИГАЗ, 2021.

References

1. Lapshin V.I., Maslennikov A.I., Kalachikhina Zh.V. [et al.]. *Methodological foundations of control over the process of well watering during the development of the Astrakhan GCF*. Moscow: Gazprom Press; 1999. 62 p. (In Russ.).
2. *Technological project for the development of the Astrakhan gas condensate field*: in 3 vol., 5 books: Report. Razvilka: Gazprom VNIIGAZ Press; 2015. (In Russ.).
3. *Author's support (supervision) of the development of the Astrakhan GCF and preparation of recommendations for its further development for 2020-2022*. Report. S.S. Yarygin, head. Razvilka: Gazprom VNIIGAZ Press; 2020. (In Russ.).
4. Polyakov E.E., Fedorova E.A., Komarov A.Yu. [et al.]. Solving scientific problems when calculating hydrocarbon reserves of the Astrakhan gas condensate field. *Vesti gazovoi nauki = News of Gas Science. Scientific and Technical Collection*. 2017;(3):141-150. (In Russ.).
5. Lutfullin R.N. Features of well flooding in the Left-bank part of the Astrakhan GCF. *Oil and Gas - 2021. Proceedings of the 75th International Youth Scientific Conference*. Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas Press; 2020:233-240. (In Russ.).
6. Lutfullin R.N. Watering of production wells of the Left-bank part of the Astrakhan GCF depending on the geological structure of the productive strata. *Proceedings of the 65th International Scientific Conference of the Astrakhan State Technical University*. Astrakhan: Astrakhan State Technical University Press; 2021. (In Russ.).
7. Kazaeva S.V., Grigorov V.A. Physical and lithological properties of reservoir rocks of the Astrakhan GCF. *Nauka i tekhnologiya uglevodorodov = Science and Technology of Hydrocarbons*. 2001;(4):20-25. (In Russ.).
8. Politykina M.A., Ilyin A.F., Kan V.E. *Geological structure of the productive strata of the Astrakhan gas condensate field as an object of development*. Moscow: VNIIEgazprom Press; 1988. 37 p. (In Russ.).
9. Tokman A.K., Maslennikov A.I., Rozhkov V.N., Zakharchuk V.A., Kazaeva S.V. Predictive assessment of specific productivity of wells of AGKM. *Sb. nauch. tr. ANIPIgaz = Collection of scientific papers of ANIPIgaz*. 2004;(5). (In Russ.).
10. *Supplement to the technological development project of the Astrakhan GCM*: Report. Razvilka: Gazprom VNIIGAZ Press; 2021. (In Russ.).

Информация об авторе

Р.Н. Лутфуллин – аспирант, кафедра геологии нефти и газа, Институт нефти и газа, Астраханский государственный технический университет; ведущий инженер, отдел моделирования месторождений инженерно-технического центра, ООО «Газпром добыча Астрахань».

Information about the author

R.N. Lutfullin - Postgraduate Student, Department of Oil and Gas Geology, Institute of Oil and Gas, Astrakhan State Technical University; Leading Engineer, Field Modeling Department, Engineering and Technical Center, Gazprom Dobycha Astrakhan LLC.

Статья поступила в редакцию 10.06.2022; одобрена после рецензирования 05.09.2022; принята к публикации 15.11.2022.
The article was submitted 10.06.2022; approved after reviewing 05.09.2022; accepted for publication 15.11.2022.

Научная статья
УДК 551.582
doi: 10.18522/1026-2237-2022-4-2-45-52

ИЗМЕНЕНИЕ УВЛАЖНЕНИЯ В РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ ЗА ПЕРИОД 1966–2019 ГОДОВ

Олеся Владимировна Назаренко

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия
ovnazarenko@sfedu.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований тенденций изменчивости количества осадков на территории Ростовской области за период 1966–2019 гг. Ростовская область – важный сельскохозяйственный район, отличительной особенностью которого является недостаточное увлажнение. В работе рассматривается изменение количества осадков по метеостанциям, расположенным в Ростовской области. Проведен анализ как многолетних данных, так и за период 2001–2019 гг. Опорные станции расположены в разных ландшафтных зонах: степь умеренно засушливая (Чертково), степь засушливая (Матвеев Курган, Таганрог, Ростов-на-Дону, Гигант), степь сухая (Цимлянск), полупустыня (Ремонтное). На основе архивных данных установлено, что в целом для территории Ростовской области прослеживается положительная динамика изменения количества осадков с 1966 по 2019 г. Выделяется сухой (2007 г.) и влажный (2004 г.) периоды. Динамика осадков за год, в теплый и холодный период показала, что большая амплитуда изменения осадков характерна для летнего периода, в то время как зимний отличается большей стабильностью. Таким образом, для территории Ростовской области изменение осадков носит сложный характер.

Ключевые слова: изменение климата, осадки, степь, увлажнение, аридные условия, Ростовская область

Для цитирования: Назаренко О.В. Изменение увлажнения в Ростовской области за период 1966–2019 годов // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 4-2. С. 45–52.

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

Original article

MOISTURE CHANGES IN THE ROSTOV REGION IN 1966-2019

Olesya V. Nazarenko

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia
ovnazarenko@sfedu.ru

Abstract. The results of research of variability precipitation trends in the Rostov region for the period 1966-2019 are presented. Rostov region is an important agricultural area, the distinctive feature of which is insufficient moisture. The paper considers the change in precipitation by stations located in the Rostov region. The analysis of both long-term data and for the period 2001-2019 is carried out. The support stations are located in different landscape zones: moderately arid steppe (Chertkovo), arid steppe (Matveev Kurgan, Taganrog, Rostov-on-Don, Gigant), dry steppe (Tsimlyansk), semi-desert (Remontnoe). Based on archival data, it has been established that there is a positive dynamics of changes in precipitation from 1966 to 2019 for the territory of the Rostov region. There is a dry period (2007) and a wet one (2004). The dynamics of precipitation over the year, the warm and cold period showed that a large amplitude of precipitation changes is characteristic of the summer period, while the winter period is more stable. Thus, for the territory of the Rostov region, precipitation changes are complex.

© Назаренко О.В., 2022

Keywords: *climate change, precipitation, steppe, humidification, arid conditions, Rostov region*

For citation Nazarenko O.V. Moisture Changes in the Rostov Region in 1966-2019. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(4-2):45-52. (In Russ.).

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

Изменение климата провоцирует трансформацию природной среды, оказывая значительное влияние на экономику региона. Соотношение тепла и влаги – ведущие факторы, определяющие развитие наземных экосистем [1–22]. Исследования, активно проводимые в настоящее время, показывают, что для температуры характерна стабильная тенденция к повышению, в то время как изменение осадков носит более сложный характер [1–6, 13–20]. Подробная характеристика основных климатообразующих факторов, климатических районов, а также оценка изменения климата на территории Ростовской области приводятся в [12, 21].

В настоящей работе рассматриваются особенности изменения увлажнения на территории Ростовской области в период с 1966 по 2019 г. Исходными данными для оценки количества осадков послужили временные ряды месячных изменений осадков на метеорологических станциях Гигант, Ремонтное, Ростов-на-Дону, Цимлянск, Чертково [23, 24].

Результаты и обсуждение

Атмосферные осадки – основной источник увлажнения почвы, определяющий характер природных ландшафтов территории. Для Ростовской области характерен континентальный тип годового хода осадков с максимумом летних осадков [21]. Минимальное их количество в северной части приходится на январь, в восточной – на февраль. Активизация холодных фронтов атлантических циклонов, их мощность и повторяемость являются основной причиной летнего максимума. Атмосферные осадки выпадают в твердом, жидком и смешанном виде. Преобладают осадки в жидком виде, которые составляют около 70 % [12, 21].

Опорные станции расположены в разных ландшафтных зонах: степь умеренно засушливая (Чертково), степь засушливая (Матвеев Курган, Таганрог, Ростов-на-Дону, Гигант), степь сухая (Цимлянск), полупустыня (Ремонтное). При исследовании динамики атмосферных осадков рассматривались их суммы за год, за теплый (IV–X) и холодный (XI–III) периоды.

В умеренно засушливой зоне расположена станция Чертково, которая находится на высоте 145 м над ур. м. Здесь в 1966–2019 гг. суммы осадков за год изменялись от 304,2 (1982 г.) до 822,2 мм (2001 г.) при среднем значении 538,4 мм (рис. 1). Следует отметить период с 2005 по 2016 г., который характеризуется значительным уменьшением количества осадков, в среднем около 460 мм. Осадки холодного периода практически оставались на одном уровне, изменяясь в пределах от 122 (1982 г.) до 344 мм (1981 г.) при среднем значении 221,7 мм. Период с 1973 по 1982 г. отличался наибольшей амплитудой колебаний от 170 до 340 мм. Теплый период характеризуется большей амплитудой значений – от 157,3 (1983 г.) до 526,1 (1977 г.) и 524,4 мм (2001 г.) при среднем значении 316,7 мм. Период с 2000 по 2006 г. отличался значениями выше средних.

В зоне засушливой степи расположены следующие станции: Матвеев Курган, Таганрог, Ростов-на-Дону, Гигант. Город Таганрог расположен на высоте 30 м над ур. м. Среднее количество осадков за период наблюдений с 1966 по 2019 г. составило 568,6 мм с колебаниями значений от 632 (1966 г.) до 506,5 мм (2019 г.). Самый низкий уровень осадков – 341,4 (1974 г.) и 382,5 мм (2007 г.). Самый высокий – 793,7 (1996 г.) и 796,5 мм (1997 г.). Наиболее высокий уровень наблюдался в 1991–2000 гг. и составил 633,6 мм (рис. 2). Для данной метеостанции характерны незначительное снижение осадков в теплый период и повышение их среднего количества – в холодный. Осадки теплого периода плавно увеличивались от 299,6 до 390,6 мм в 2000-х гг. при среднем значении 324,2 мм. С 2000 г. зафиксировано уменьшение количества осадков на 99,2 мм. Период с 2011 по 2019 г. отличался еще большей засушливостью, количество осадков уменьшилось еще на 15,2 мм. Холодный период отличался меньшей амплитудой их изменения, минимальный уровень – 92,4 (1972 г.) и 123,4 мм (2008 г.), а максимальный – 403,3 (2004 г.) и 439,5 мм (2009 г.).

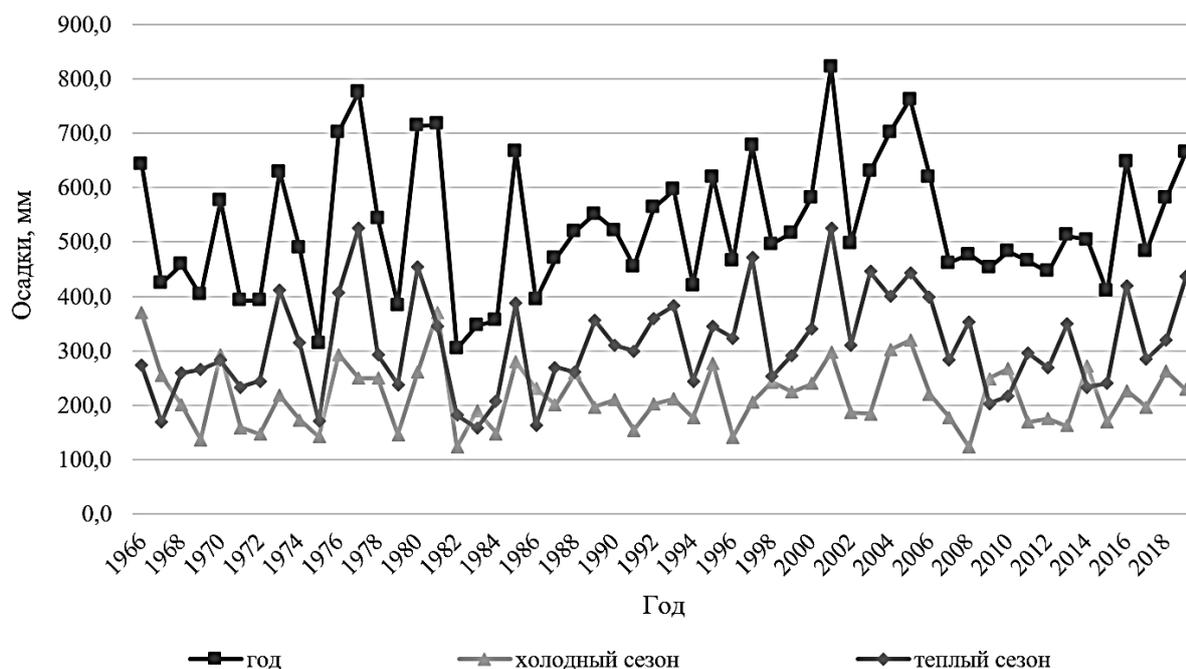


Рис. 1. Динамика сумм осадков за год, холодный (XI–III) и теплый (IV–X) периоды, Чертково / Fig. 1. Dynamics of average annual precipitation, cold (XI-III) and warm (IV-X) period, Chertkovo

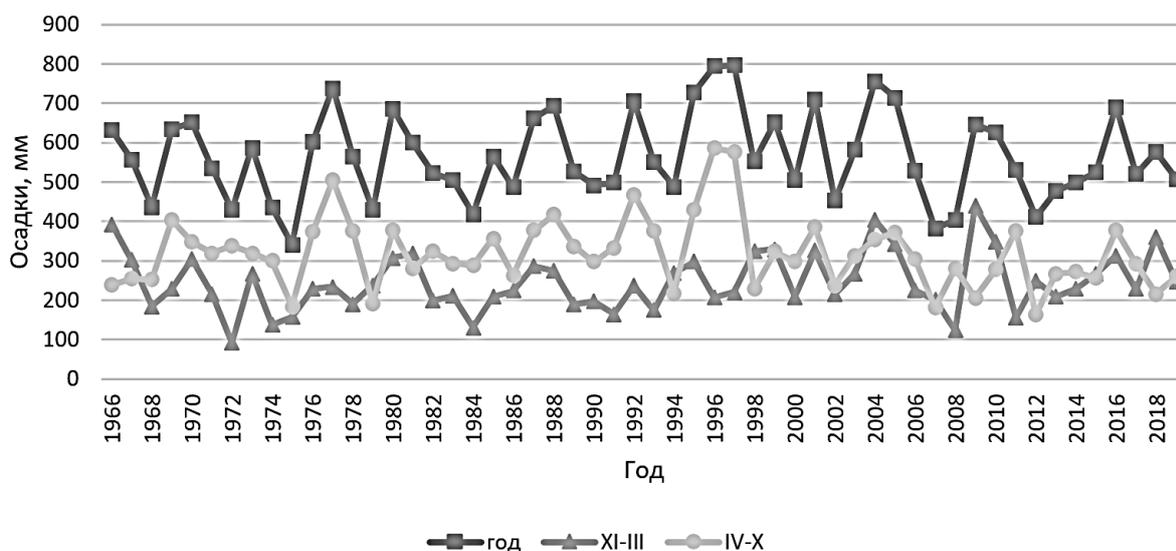


Рис. 2. Динамика сумм осадков за год, холодный (XI–III) и теплый (IV–X) периоды, Таганрог / Fig. 2. Dynamics of average annual precipitation, cold (XI-III) and warm (IV-X) period, Taganrog

Среднее количество осадков по станции Ростов-на-Дону, который расположен на высоте 81 м над ур. м., за период наблюдений с 1961 по 2019 г. составило 603,9 мм с колебаниями значений от 481 (1984 г.) до 931,6 мм (2006 г.). Наиболее высокий уровень наблюдался в 1991–2000 гг. и составил 631,3 мм (рис. 3). Для данного пункта характерны незначительные изменения в увлажнении, в среднем отмечались незначительная положительная тенденция в теплый период и отсутствие значимых изменений в холодный. С 2006 по 2009 г. наблюдается резкое уменьшение количества осадков с 931,6 до 366,3 мм. Осадки теплого периода планомерно увеличивались от 320 до 529 мм в 1979 г., после чего до 1990 г. стали преобладать тенденции к уменьшению при среднем значении 337,8 мм. Холодный период отличался меньшей амплитудой изменения количества осадков, минимальный уровень – 100,2 (2015 г.) и 104 мм (1974 г.), максимальный – 404 (1983 г.) и 488,1 мм (2020 г.).

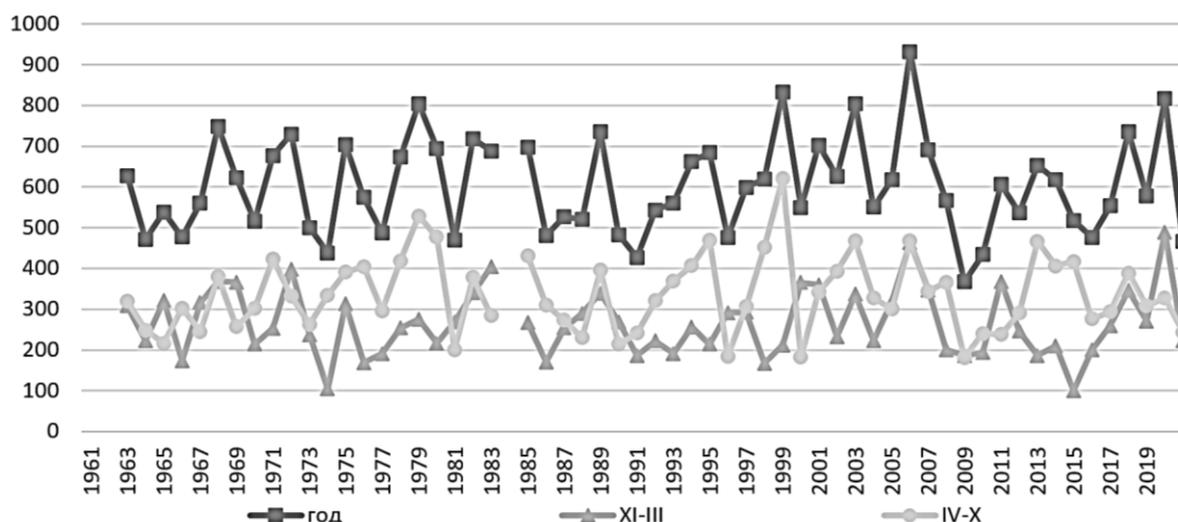


Рис. 3. Динамика сумм осадков за год, холодный (XI–III) и теплый (IV–X) периоды, Ростов-на-Дону / Fig. 3. Dynamics of average annual precipitation, cold (XI-III) and warm (IV-X) period, Rostov-on-Don

Среднее значение количества осадков в поселке Гиганте, который расположен на высоте 79 м над ур. м., составило 517,4 мм (рис. 4). Количество осадков холодного периода изменяется от 87,1 (1974 г.) до 317,4 (1967 г.) и 301,4 мм (1994 г.). Наиболее высокий уровень наблюдался в 2016 г. и составил 699,7 мм (рис. 4). Осадки теплого периода планомерно увеличиваются от 175,3 до 302,2 мм при среднем значении 322,6 мм.

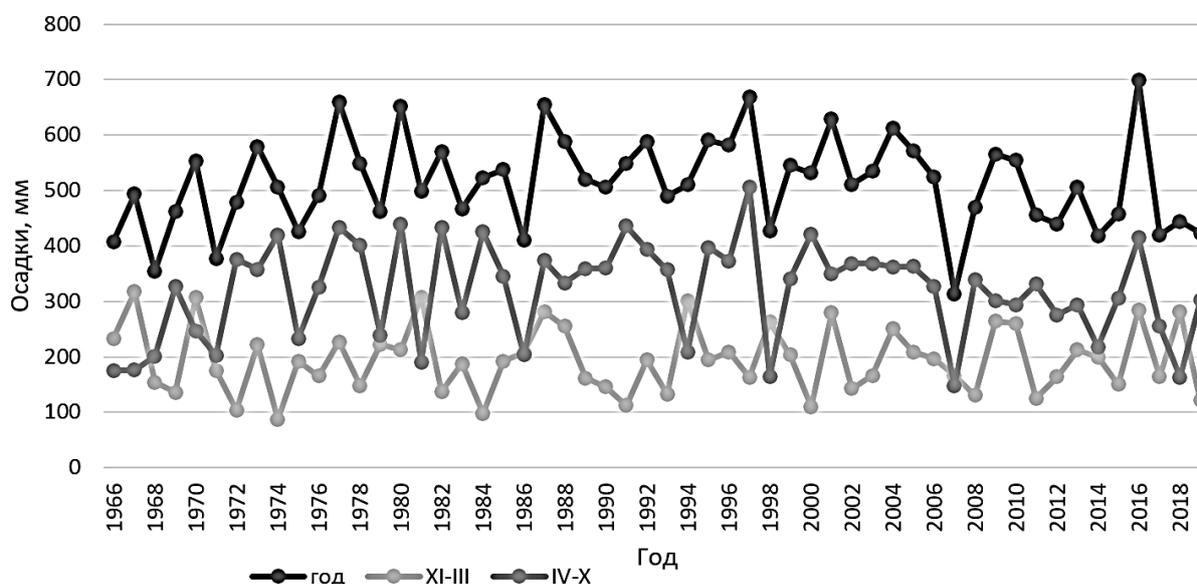


Рис. 4. Динамика сумм осадков за год, холодный (XI–III) и теплый (IV–X) периоды, Гигант / Fig. 4. Dynamics of average annual precipitation, cold (XI-III) and warm (IV-X) period, Gigant

Станция Цимлянск (Волгодонск) расположена в зоне сухой степи на высоте 64 м над ур. м. Среднее значение количества осадков в Цимлянске составило 459,7 мм. Среднегодовое количество осадков увеличилось с 412,0 до 496,7 мм (рис. 5). Большая амплитуда характерна для 1971–1980 гг., когда осадки изменялись от 446,2 до 519,1 мм, наблюдается тенденция к повышению. Отмечен один из самых сухих холодных периодов. Анализ данных изменения осадков в холодный период показал их колебание от 90,8–98 (1964, 1972, 1974, 1984 гг.) до 292,5 мм (1967 г.) и 317,7 мм (2004 г.). Динамика изменения осадков отличается большей амплитудой, минимальные значения составили 85,6 (1994 г.) и 121,6 мм (1986 г.), максимальные – 516,7 (1973 г.) и 516,8 мм (1977 г.).

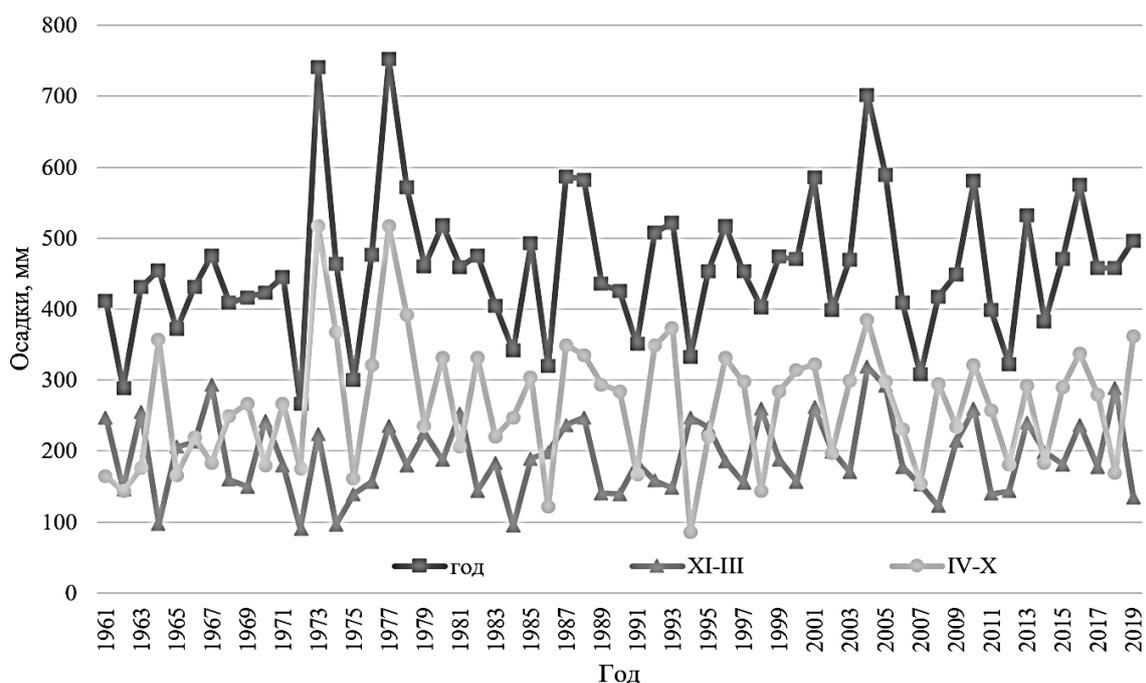


Рис. 5. Динамика сумм осадков за год, холодный (XI–III) и теплый (IV–X) периоды, Цимлянск / Fig. 5. Dynamics of average annual precipitation, cold (XI–III) and warm (IV–X) period, Tsimlyansk

Метеостанция Ремонтное расположена в полупустыне, на высоте 105 м над ур. м. Среднее количество осадков составило 412,6 мм. Наблюдается значительная тенденция к повышению количества осадков от 391,7 до 418,3 мм (рис. 6). Большая амплитуда характерна для 70-х гг., когда осадки изменялись от 261,4 до 632,4 мм, отмечались значительные перепады количества осадков в летний период от 172,2 до 460,9 мм. Зимний период характеризуется меньшей амплитудой.

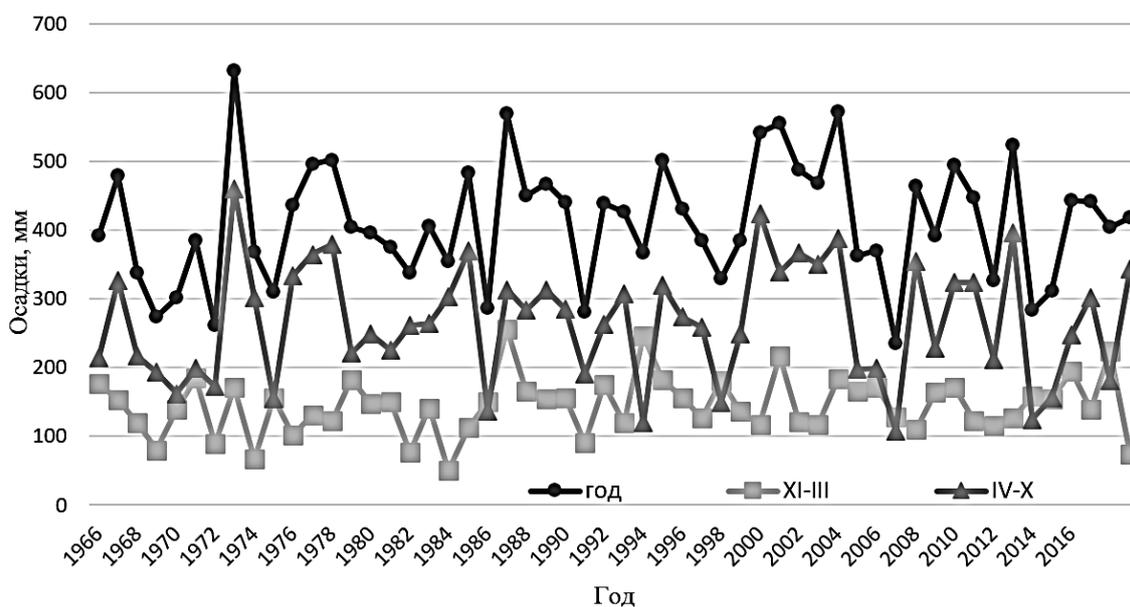


Рис. 6. Динамика сумм осадков за год, холодный (XI–III) и теплый (IV–X) периоды, Ремонтное / Fig. 6. Dynamics of average annual precipitation, cold (XI–III) and warm (IV–X) period, Remontnoe

Наиболее значительные изменения в количестве выпадающих осадков приходится на период с начала 2000-х гг. Сравнительный анализ многолетних данных и периода 2001–2019 гг. показал, что среднегодовое количество осадков увеличилось на 3–43 мм, за исключением пунктов в г. Таганроге и п. Гиганте, где произошло уменьшение количества осадков (таблица).

Изменение количества осадков на опорных станциях в 2001–2019 гг. и отклонение от многолетних величин / Precipitation at reference stations in 2001-2019 and deviations from long-term values

| Метеостанция | Осадки, мм | | | | | |
|--------------|------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| | Год | | IV–X | | XI–III | |
| | 2001–2019 | Отклонение | 2001–2019 | Отклонение | 2001–2019 | Отклонение |
| Чертково | 558,7 | 20,3 | 338,2 | 21,5 | 220,5 | –1,2 |
| Таганрог | 554,8 | –11,0 | 284,2 | –35,4 | 270,7 | 24,5 |
| Ростов | 609,3 | 3,0 | 334,4 | –8,5 | 271,9 | 5,5 |
| Гигант | 502,7 | –12,0 | 304,5 | –3,6 | 198,2 | 4,0 |
| Цимлянск | 473,7 | 7,7 | 267,8 | –5,9 | 205,9 | 13,6 |
| Ремонтное | 421,5 | 9,4 | 270,8 | 3,9 | 150,7 | 5,5 |

Холодный период (XI–III) отличается повышением количества осадков от 4 до 24,5 мм, за исключением Чертково, где уменьшение незначительное. Теплый период отличается уменьшением количества осадков от 3,6 до 35,4 мм, за исключением Чертково (21,5 мм) и Ремонтного (3,9 мм).

В результате проведенного исследования было установлено, что в целом для территории Ростовской области прослеживается положительная динамика изменения количества осадков с 1966 по 2019 г. Наблюдается общая тенденция, характерная для метеостанций: экстремально сухим периодом или одним из засушливых годов является 2007 г., а для Чертково характерен продолжительный сухой период с 2007 по 2016 г. По наибольшему количеству осадков наблюдается значительное разнообразие и единой тенденции нет. Для ряда метеостанций выделяется 2004 г. как один из самых влажных. Динамика осадков за год, теплый и холодный период показала, что большая амплитуда изменения осадков характерна для летнего периода, в то время как зимний отличается большей стабильностью. Таким образом, для территории Ростовской области не выявлено однозначной тенденции режима выпадения осадков.

Список источников

1. Бисчоков Р.М. Прогнозирование изменений режима атмосферных осадков на Северном Кавказе // Вестн. Курганской ГСХА. 2018. № 1. С. 14–17. EDN: OUEKHT.
2. Кузьмина Ж.В. Анализ многолетних метеорологических трендов на Юге России и Украины (от лесостепи до пустынь) // Аридные экосистемы. 2007. Т. 13, № 32. С. 47–60.
3. Лурье П.М. Региональные особенности изменения климата на Юге России и их последствия (на примере Ростовской области) // Географические исследования Краснодарского края. Краснодар, 2010. С. 83–92.
4. 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.
5. 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.
6. Назаренко О.В. Изменение некоторых метеорологических показателей в бассейне Азовского моря // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2020. № 1. С. 62–70. Doi: 10.18522/1026-2237-2020-1-62-70. EDN: SXLAPB.
7. Винников К.Я., Лемешко Н.А., Сперанская Н.А. Влагосодержание почвы и сток внетропической части Северного полушария при глобальном потеплении // Метеорология и гидрология. 1990. № 3. С. 5–10.
8. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М., 2008. Т. 2. 288 с. URL: <http://climate2008.igce.ru/v2008/htm/2.htm> (дата обращения: 15.03.2021).
9. 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.
10. Лурье П.М., Панов В.Д. Влияние изменений климата на гидрологический режим р. Дон в начале XXI столетия // Метеорология и гидрология. 1999. № 4. С. 90–97.
11. Обзор состояния и тенденций изменения климата России. М., 2008–2019. URL: <http://climatechange.igce.ru/> (дата обращения: 19.04.2022).
12. Панов В.Д., Лурье П.М., Ларионов Ю.А. Климат Ростовской области: вчера, сегодня, завтра. Ростов н/Д: Донской изд. дом, 2006. 487 с.
13. 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.

14. Черенкова Е.А. Анализ особенностей обширных атмосферных засух на юге Европейской России // Аридные экосистемы. 2012. Т. 18, № 4. С. 13–21.
15. Назаренко О.В. К вопросу о влиянии климатических факторов на грунтовые воды Доно-Донецкого бассейна во второй половине XX столетия // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 4. С. 504–510.
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. 549–556.
17. Назаренко О.В. Изменение некоторых метеорологических показателей в условиях засушливой степи // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2019. № 4. С. 84–90.
18. Назаренко О.В. Динамика изменения температуры воздуха и осадков в бассейне реки Средний Егорлык // Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы. Воронеж: Цифровая полиграфия, 2019. Т. 1. С. 235–239.
19. 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. P. 483–491. Doi: 10.5593/sgem2020/4.1/s19.060.
20. 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. С. 38–48.
21. Хрусталеv Ю.П., Василенко В.Н., Свисюк И.В., Панов В.Д., Ларионов Ю.А. Климат и агроклиматические ресурсы Ростовской области. Ростов н/Д.: Батайское книж. изд-во, 2002. 184 с.
22. Шумова Н.А. Анализ климатических условий в Республике Калмыкия за 1966–2017 гг. // Аридные экосистемы. 2020. Т. 26, № 3. С. 23–29.
23. 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: 17.05.2022).
24. 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: 17.05.2022).

References

1. Bischokov P.M. Forecasting of changes in the precipitation regime in the North Caucasus. *Vestn. Kurganskoi GSKhA = Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy*. 2018;(1):14-17. EDN: OUEKHT. (In Russ.).
2. Kuzmina Zh.V. Analysis of long-term meteorological trends in the South of Russia and Ukraine (from forest-steppe to deserts). *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2007;13(32):47-60. (In Russ.).
3. Lurie P. M. Regional features of climate change in the South of Russia and their consequences (on the example of the Rostov region). *Geographical research of the Krasnodar territory*. Krasnodar, 2010:83-92. (In Russ.).
4. 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.).
5. Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A. Dynamics aridity zones of subboreal landscapes of Russia in 20th-21st centuries. *Izv. RAS. Geografiya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geography*. 2011;(4):33-41. (In Russ.).
6. 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.).
7. Vinnikov K. Ya., Lemeshko N.A., Speranskaya N.A. Soil moisture content and runoff in the extratropical part of the Northern hemisphere under global warming. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 1990;(3):5-10. (In Russ.).
8. *Assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation*. Moscow, 2008;2. 288 p. Available from: <http://climate2008.igce.ru/v2008/htm/2.htm> [Accessed 15th March 2021]. (In Russ.).
9. Lurie 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 Territories*. 2016;8(2):150-160. (In Russ.).

10. Lurie P.M., Panov V.D. The influence of climate change on the hydrological regime of the Don river at the beginning of the 21st century. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 1999;(4):90-97. (In Russ.).

11. *Overview of the state and trends of climate change in Russia*. Moscow, 2008-2019. Available from: <http://climatechange.igce.ru/> [Accessed 19th April 2022]. (In Russ.).

12. Panov V.D., Lurie P.M., Larionov Yu.A. *Climate of the Rostov region: yesterday, today, tomorrow*. Rostov-on-Don: Don Publishing House; 2006. 487 p. (In Russ.).

13. 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.).

14. Cherenkova E.A. Analysis of the features of extensive atmospheric droughts in the South of European Russia. *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2012;18(4):13-21. (in Russ.).

15. Nazarenko O.V. On the influence of climatic factors on the groundwater of the Don-Donets basin in the second half of the 20th century. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2006;33(4):504-510. (in Russ.).

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):549-556. (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. Dynamics of changes in air temperature and precipitation in the Middle Egorlyk river basin. *Global climate changes: regional effects, models, forecasts*. Voronezh: Tsifrovaya poligrafia Publ.; 2019;1:235-239. (In Russ.).

19. 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*. 2020:483-491, doi: 10.5593/sgem2020/4.1/s19.060.

20. 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.).

21. Khrustalev Yu.P., Vasilenko V.N., Svisyuk I.V., Panov V.D., Larionov Yu.A. *Climate and agro-climatic resources of the Rostov region*. Rostov-on-Don: Bataysk Publishing House; 2002. 184 p. (In Russ.).

22. Shumova N.A. Analysis of climatic conditions in the Republic of Kalmykia for 1966-2017. *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2020;10(3):188-193, EDN: OSRYNR.

23. *Certificate of State Registration of the Database No. 2014621485. Description of an array of data on the average monthly air temperature at stations in Russia*. O.N. Bulygina, V.N. Razuvaev, L.T. Trofimenko, N.V. Shvets. Available from: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> [Accessed 17th May 2022]. (In Russ.).

24. *Certificate of State Registration of the Database No. 2015620394. Description of an array of data for monthly precipitation totals at stations in Russia*. O.N. Bulygina, V.N. Razuvaev, N.N. Korshunova, N.V. Shvets. Available from: <http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных> [Accessed 17th May 2022]. (In Russ.).

Информация об авторе

О.В. Назаренко – 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.

Статья поступила в редакцию 06.06.2022; одобрена после рецензирования 24.06.2022; принята к публикации 15.11.2022. The article was submitted 06.06.2022; approved after reviewing 24.06.2022; accepted for publication 15.11.2022.

Научная статья
УДК 551.510.5
doi: 10.18522/1026-2237-2022-4-2-53-59

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАВНОВЕСИЯ СТОЛБА СЖИМАЕМОЙ АТМОСФЕРЫ. ЧАСТЬ 2: СТАЦИОНАРНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ДАВЛЕНИЯ И ПЛОТНОСТИ

Анатолий Анатольевич Радионов

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

Аннотация. В рамках одномерной аэродинамической модели рассматривается решение задачи о равновесии неограниченного сверху столба сжимаемой атмосферы. Численные и аналитические решения уравнений модели записываются с учетом двух условий равновесия: гидростатики и условия равновесия при изменении во времени плотности атмосферы. Граничные условия: значения давления или плотности и соответствующего градиента вблизи поверхности. Решение для давления расширяет барометрическую формулу, кроме которой имеются и более сложные стационарные решения. Обсуждается физическая интерпретация решений с использованием экспериментальных данных в атмосфере. Результаты исследования улучшают понимание протекающих в атмосфере процессов и могут использоваться в научных и образовательных целях.

Ключевые слова: аналитическая модель, столб сжимаемой атмосферы, равновесие столба атмосферы, квазилинейные дифференциальные уравнения, климатическая модель

Для цитирования: Радионов А.А. Математическая модель равновесия столба сжимаемой атмосферы. Часть 2: Стационарные решения для давления и плотности // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 4-2. С. 53–59.

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

Original article

MATHEMATICAL STUDY OF EQUILIBRIUM OF THE COLUMN OF COMPRESSIBLE ATMOSPHERIC AIR. PART 2: STATIONARY SOLUTIONS FOR PRESSURE AND DENSITY

Anatoliy 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. With the one-dimensional aerodynamic model, the problem of equilibrium of a compressible atmosphere column unlimited from above is considered. Numerical and analytical solutions of the model equations are written taking into account two equilibrium conditions: the hydrostatic condition and the equilibrium condition when the density of the column changes with time. The boundary conditions for the solution are the value of pressure or density and the corresponding gradient near the surface. The solution for pressure extends the well-known hydrostatic formula, in addition to which there is a more complex solution. The physical interpretation of the solutions based on the data of experimental measurements in the Earth's atmosphere is discussed. The analytical solution can be used to describe adiabatic atmospheric column, which is important for some applications. The research results improve understanding of processes in atmosphere and can be used for scientific and educational purposes.

© Радионов А.А., 2022

Keywords: analytical model, column of compressible atmospheric air, equilibrium of the fluid column, non-linear equation, climatic model

For citation Radionoff A.A. Mathematical Study of Equilibrium of the Column of Compressible Atmospheric Air. Part 2: Stationary Solutions for Pressure and Density. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2022;(4-2):53-59. (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

Решение задачи о нахождении равновесного давления в неподвижном столбе атмосферы представлено практически во всех монографиях по физике атмосферы [1–7]. Математическое решение строится с упрощающим предположением о нулевых скоростях течения воздуха в столбе. Тогда уравнения движения упрощаются до гипсометрического уравнения $dp/dz = -\rho g$, которое интегрируется с граничным условием $p(z=0) = p_b$ и с учетом уравнения состояния. Получается барометрическая формула: $p = p_b \exp\left(-\frac{g}{R_a \theta_0} z\right) = p_b \exp\left(-\frac{z}{H}\right)$, где p – давление; ρ – плотность; z – вертикальная координата, отсчитываемая вверх от поверхности; $H = R_a \theta_0 / g \approx 8,4$ км – высота средней атмосферы; θ_0 – средняя по столбу абсолютная температура; R_a – универсальная газовая постоянная атмосферного воздуха; g – ускорение свободного падения, принимаемое константой. Эта формула удовлетворительно описывает измерения, а зависимость g и θ_0 от высоты несложно учесть.

Некоторые отличия измерений от барометрической формулы наблюдаются в атмосфере выше 8 км. При обсуждении причин этих отличий отмечается необходимость учета стратификации атмосферы на этих высотах [4, 5]. Обзор работ, посвященных анализу процессов выделения тепла на высотах стратосферы, можно найти в [3, 6, 7].

Классическое решение о равновесном давлении столба атмосферы не учитывает сжимаемости воздуха, т. е. принимается неизменность плотности во времени. Учет этого фактора позволяет уточнить барометрическую формулу.

Математическая модель

Для описания равновесия столба сжимаемой атмосферы в работе [8] использовано уравнение

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - \frac{2}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)^2 = \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + g \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \frac{\partial g}{\partial z} + (\mu_1 + \mu_2) \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t}\right), \quad (1)$$

где ось z направлена вертикально вверх, начало на поверхности; t – время; $\mu_1 + \mu_2$ – вязкость воздуха в приближении Экмана [9]. Там же обсуждаются критерий необходимости учета сжимаемости воздуха при описании столба атмосферы и использование упрощений. Уравнение (1) описывает процессы распространения возмущений плотности, протекающих со скоростью звука, что обосновывает использование уравнения состояния адиабатических процессов в атмосфере ($p = A \rho^\gamma$, где A – константа; $\gamma = 1,4$ – показатель адиабаты атмосферы).

Для адиабатических процессов уравнение (1) записывается для плотности

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - \frac{2}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right)^2 = c^2 \left(\frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} + \frac{\gamma-1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)^2\right) + g \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \frac{\partial g}{\partial z} \quad (2)$$

или для давления

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{\gamma+1}{\gamma} \frac{1}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)^2 = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + g \frac{\partial p}{\partial z} + \gamma p \frac{\partial g}{\partial z}, \quad (3)$$

где $c^2 = \gamma R_a \theta$ – квадрат скорости звука; θ – абсолютная температура.

Для уравнения (2) граничными условиями являются

$$\frac{\partial \rho}{\partial z}(z=0, t) = \rho_{zb}(t), \quad \rho(z=0, t) = \rho_b(t), \quad (4)$$

для (3) –

$$\frac{\partial p}{\partial z}(z=0, t) = p_{zb}(t), \quad p(z=0, t) = p_b(t). \quad (5)$$

В (4), (5) $p_{zb}(t), \rho_b(t)$ – известные функции времени.

В качестве начальных условий для решений уравнений (2), (3) примем некоторые профили $p_s(z)$, $\rho_s(z)$, известные из данных эксперимента в некоторый момент времени $t = 0$.

Эти уравнения выражают два условия равновесия столба сжимаемой атмосферы. Уравнение (3) включает в себя гипсометрическое уравнение и обобщает его на случай сжимаемого адиабатического столба атмосферы. Для сравнения с экспериментальными данными используются данные стандартной и справочных атмосфер [10].

Стационарные решения для давления

Для стационарного уравнения (3) примем упрощающие предположения: $g = \text{const}$, $\partial g / \partial z = g_z = \text{const}$, $c = c_0 = \text{const}$. Получим уравнение $c_0^2 \frac{d^2 p}{dz^2} + g \frac{dp}{dz} + \gamma p g_z = 0$, интегрирование которого дает

$$p(z) = C_1 \exp\left(\frac{z}{2c_0^2}(-g + \sqrt{g^2 - 4\gamma g_z c_0^2})\right) + C_2 \exp\left(-\frac{z}{2c_0^2}(g + \sqrt{g^2 - 4\gamma g_z c_0^2})\right), \quad (6)$$

где C_1, C_2 – постоянные интегрирования, которые определяются из (5).

Это решение легко интерпретировать, если пренебречь величиной $g_z \approx -3,086 \times 10^{-6} \text{ c}^{-2}$. Тогда при $C_1 = 0$ и $C_2 = p_b$ получается барометрическая формула, которая содержится в решении (6) в качестве частного случая. Отличие состоит в том, что в (6) величина средней высоты атмосферы $H = c_0^2 / g$, $c_0^2 = \gamma R_a \theta_b$, где θ_b – температура на поверхности, которая в γ раз больше, чем в барометрической формуле. Это отличие исчезает, если c_0 определить по средней для столба температуре θ_b / γ . Константа $C_1 \neq 0$ определяет минимальное значение давления, ниже которого давление не опускается ни на каких высотах.

На рис. 1 крупными точками представлено распределение давления по высоте для летней справочной атмосферы (широты $\varphi = 15^\circ$) [10]. Точечная линия представляет барометрическую формулу (6) при $C_1 = 0$ и $C_2 = p_b$.

Из рис. 1 видно, что формула воспроизводит данные измерений с удовлетворительной точностью. Выше 12 км измеренные значения давления несколько ниже и отличаются от экспоненциальной зависимости. Конечно, используя параметры решения и граничные условия, можно подобрать такую экспоненту, которая удовлетворительно описывает измерения. Точечная кривая на рис. 1 соответствует именно такой экспоненте: ниже 16 км она несколько занижает измерения, а выше – завышает, но до высот 100 км удовлетворительно описывает измерения.

Пунктирная кривая на рис. 1 вычислена по граничным условиям, которые получены в измерениях. Эта экспонента везде завышает измерения, за исключением нижних 10 км, где она довольно точно воспроизводит измерения.

Сплошная кривая на рис. 1 показывает численное решение стационарного уравнения (3), в котором скорость звука вычислялась как $c^2 = c_1^2 (p/p_b)^{(\gamma-1)/\gamma}$, где $c_1^2 = \gamma R_a \theta_{1b}$ – средняя по столбу скорость звука, $\theta_{1b} = 1,017 \cdot \theta_b$ подбиралась по измерениям. Численное решение вычислялось при граничных условиях p_b и p_{zb} , взятых из данных эксперимента, $g_z = -3,086 \times 10^{-6} \text{ c}^{-2}$.

Чтобы продемонстрировать точность этих кривых, на рис. 2 изображена точность предсказания

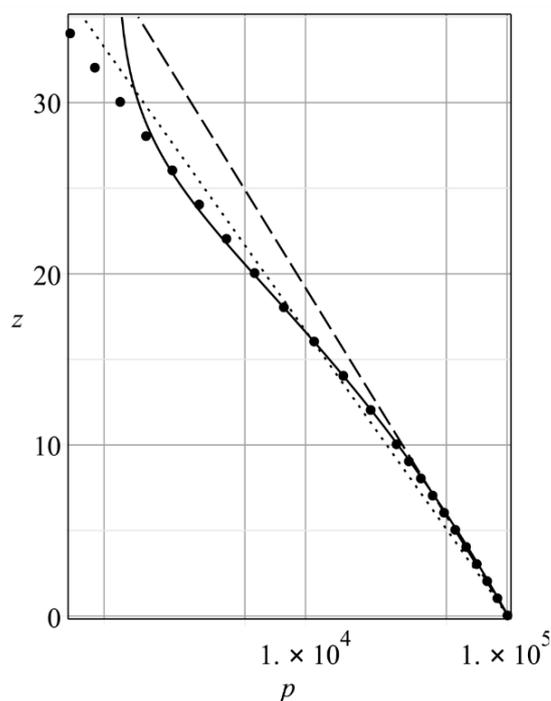


Рис. 1. Распределение давления по высоте для справочной атмосферы в июле. Использована логарифмическая шкала / Fig. 1. Pressure profile for the reference atmosphere in July. The logarithmic scale is used

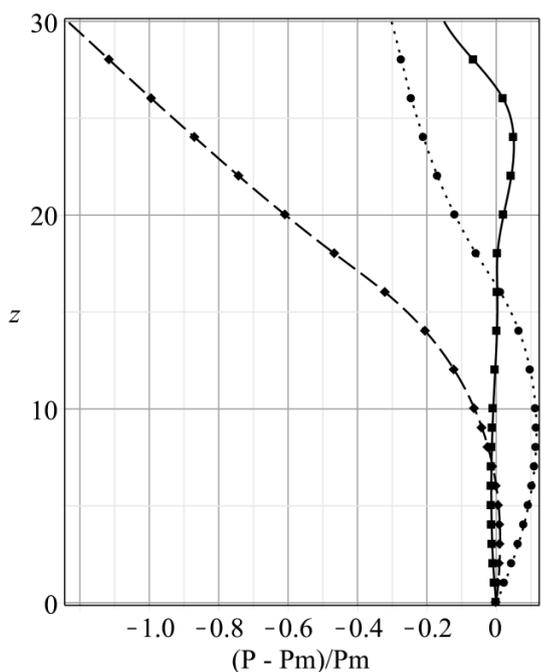


Рис. 2. Относительная разность между экспериментальными значениями давления и решениями уравнения (6) / Fig. 2. Relative difference between experimental pressure values and solutions of equation (6)

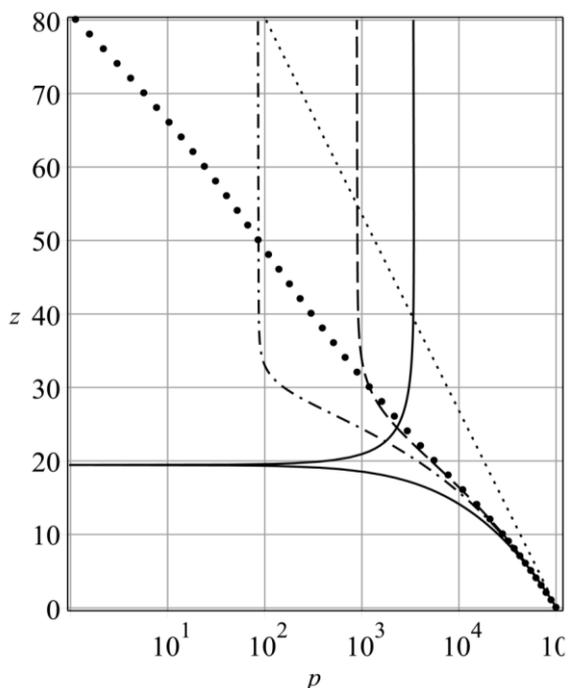


Рис. 3. Профили давления в численном решении уравнения (3) / Fig. 3. Pressure profiles in the numerical solution of equation (3)

давления в нижних 30 км атмосферы, вычисленная как $(p - p_m)/p_m$, где величина p – аналитическое или численное решение уравнения (3) для давления; p_m – экспериментальные значения давления.

Все решения (6) близки к экспериментальным данным. Удовлетворительная точность описания профиля давления аналитической формулой демонстрируется на рис. 2 при помощи точечной линии, соединяющей кружки. Ниже ≈ 16 км эта кривая завышает значения давления, выше ≈ 16 км показывает более низкие значения и на высотах ниже 80 км хорошо согласуется с измерениями.

Аналогичные вычисления, проведенные для решения (6), в котором скорость звука $c_0^2 = \gamma R_a \theta_b$, $\theta_b = 283,15$ К – температура поверхности, показаны на рис. 2 пунктирной кривой, соединяющей ромбики. Точность является приемлемой и в этом случае, но выше 10 км расхождения с измерениями возрастают с увеличением высоты.

Сплошная кривая на рис. 2 показывает численное решение стационарного уравнения (3) со скоростью звука $c^2 = c_1^2 (p/p_b)^{(\gamma-1)/\gamma}$; $c_1^2 = \gamma R_a \theta_{1b}$ – средняя по столбу скорость звука; $\theta_{1b} = 1,017 \cdot \theta_b$ подбиралась по измерениям, граничные условия p_b и p_{zb} принимались из данных эксперимента, $g_z = -3,086 \times 10^{-6} \text{ c}^{-2}$.

Ниже 30 км для численного решения совпадение с экспериментальными данными значительно лучше, чем у кривых, которые удается подобрать из барометрической формулы. Сплошная кривая до высоты 20 км хорошо воспроизводит измеренные значения давления, а выше 26 км начинают возрастать отклонения.

Ниже 30 км сплошная кривая дает хорошую точность, превышающую точность кривых, полученных на основе барометрической формулы. Выше 30 км численное решение стационарного уравнения (3) стремится к постоянному значению ≈ 1000 Па, что не соответствует измерениям. Возможность такого же поведения давления на больших высотах показывает и аналитическое решение (6). Для более точного предсказания давления ниже 30 км в численном решении стационарного уравнения (3) можно использовать измеренные значения скорости звука в столбе.

Отметим, что граничные условия из справочной атмосферы являются осредненными по множеству измерений, в то время как решение стационарного уравнения (3) зависит от мгновенных значений граничных условий (5). Профиль давления численного решения стационарного уравнения (3) зависит от граничных условий и параметра θ_{1b} , особенно эта

зависимость проявляется выше 30 км. Давление может быть как выше измерений, так и ниже, при этом не всегда стремится к постоянному значению на больших высотах, а может показывать экспоненциальную зависимость. Это демонстрируется на рис. 3, где приведено несколько численных решений стационарного уравнения (3) с одинаковыми значениями давления и градиента на границе, отличающихся параметром c_1 , который играет роль скорости звука.

На рис. 3 приведены крупными точками данные измерений; точечной кривой – барометрическая формула; пунктирной – решение стационарного уравнения (3) при $c_1^2 = 1,05c_0^2$; штрихпунктирной – $c_1^2 = 1,035c_0^2$; сплошной – $c_1^2 = 1,1c_0^2$. Сплошная кривая показывает, что при увеличении θ_{1b} численное решение для давления может содержать особую точку, которая в численном расчете обрабатывается описанным ранее алгоритмом [8].

Стационарные решения для плотности

Примем упрощающие предположения: $g = \text{const}$, $\partial g / \partial z = g_z = \text{const}$, $c = c_0 = \text{const}$. Тогда уравнение (2) будет иметь вид $c_0^2 \left(\frac{d^2 \rho}{dz^2} + \frac{\gamma-1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dz} \right)^2 \right) + g \frac{d\rho}{dz} + \rho g_z = 0$.

Его решение с граничными условиями (4)

$$\rho = \left(\frac{\gamma c_0^2}{\delta} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left[\left(C_{12} \exp \left(\frac{z\delta}{c_0^2} \right) - C_{13} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2\gamma}} \exp \left(-\frac{z(\gamma+\delta)}{2\gamma c_0^2} \right), \quad (7)$$

где $\delta^2 = g^2 - 4\gamma c_0^2 g_z$; $C_{12} = \rho_b^\gamma \left(\frac{\rho_{zb}}{\rho_b} + \frac{g+\delta}{2\gamma c_0^2} \right)$; $C_{13} = \rho_b^\gamma \left(\frac{\rho_{zb}}{\rho_b} + \frac{g-\delta}{2\gamma c_0^2} \right)$.

Решение (7) также может содержать острый минимум плотности, возникновение которого зависит от граничных условий и скорости звука. От этих же параметров зависит и высота, на которой появляется острый минимум, а также значение плотности, к которому стремится решение на больших высотах. Профили плотности здесь не приводятся, поскольку отсутствуют непосредственные её измерения.

Обсуждение результатов

В работе развивается математическая модель [8], описывающая равновесное состояние столба сжимаемой атмосферы с учетом двух необходимых условий равновесия. Первое условие равновесия, вытекающее из уравнения движения, требует отсутствия вертикального движения воздуха, как и в классическом случае барометрической формулы. Вторым является следующее из уравнения неразрывности условие отсутствия вертикального движения воздуха, возникающего при изменении во времени плотности. Совместный учет этих двух факторов приводит к уравнениям (2), (3) для давления и плотности соответственно.

При дополнительном упрощающем условии постоянства скорости звука записываются аналитические решения этих уравнений. Это дополнительное упрощающее предположение является физическим упрощением и частично отражает некоторые физические процессы, протекающие в столбе атмосферы. Более сложную зависимость скорости звука от вертикальной координаты можно учесть, используя численные методы.

Решения (6), (7) стационарных нелинейных уравнений (2), (3) положительны и непрерывны по высоте. Они могут содержать подвижную особую точку, возникающую на определенной высоте и зависящую от граничных условий. В такой особой точке не определена производная давления или плотности по высоте, а само решение содержит острый минимум, достигающий нулевого значения. Учет зависимости скорости звука от высоты изменяет свойства полученных решений, при этом сохраняется возможность возникновения особых точек решений, что демонстрируется при помощи численного решения стационарных уравнений (2), (3).

При сравнении полученных решений для давления с данными измерений видно, что аналитические решения удовлетворительно описывают эксперимент. Однако решение (6) и численное решение стационарного уравнения (3) зависят от мгновенных граничных условий (5), которые практически всегда не соответствуют своим многолетним средним, известным из экспериментальных данных. Изменения граничных условий (5) даже на небольшую величину распространяются вверх со скоростью звука. Это означает, что профиль решения уравнения (3) может быть подвержен быстрым и значительным изменениям при варьировании граничных условий и что

решение уравнения (3) не точно совпадает с осредненным профилем давления. При измерениях регистрируется один из профилей, соответствующий имевшимся в момент измерения граничным условиям и профилю скорости звука. Осредненный по множеству измерений профиль давления близок к экспоненциальному профилю и барометрическому решению, которое соответствует постоянной скорости звука.

Осреднение по множеству измерений можно рассматривать как некоторую предысторию, приводящую к экспоненциальному среднему профилю давления. Используемое при решении уравнений (2), (3) упрощение $c = c_0 = \text{const}$ по крайней мере частично учитывает эту предысторию и ее влияние на текущее распределение давления атмосферы по высоте.

При получении уравнений (2), (3) использовано адиабатическое приближение, которое применимо на относительно коротких временных промежутках [6]. Для атмосферы такой промежуток времени оценивается около трех суток. Поскольку уравнения (2), (3) описывают протекающие со скоростью звука процессы, для их получения адиабатическое приближение представляется приемлемым.

Профили давления, полученные из численного решения уравнения (2), хорошо воспроизводят измеренные давления для высот ниже 30 км. Выше 30 км поведение давления может оказаться сложным вследствие изменчивости граничных условий и сложной предыстории этих изменений. Кроме того, как в аналитическом (6), так и в численном решении стационарного уравнения (3) давление стремится на больших высотах к постоянному значению при выборе определенных граничных условий или констант интегрирования. Возможно, причина такой зависимости профиля давления от высоты – использованное при выводе (1) одномерное приближение над бесконечной плоской поверхностью. В более реалистичной постановке задачи для сферического слоя атмосферы такое поведение давления с высотой может измениться. На интервале высоты от 30 до 100 км оказывается более точной барометрическая формула.

Предположение о постоянстве скорости звука в столбе атмосферы удовлетворительно соответствует экспериментальным данным и как минимум частично отражает предысторию изменений состояния столба атмосферы.

Заключение

Учет сжимаемости столба атмосферы приводит к уравнению (1). При дополнительном предположении о постоянстве скорости звука записывается аналитическое решение уравнений (2), (3). Аналитическая модель столба сжимаемой атмосферы может являться полезным инструментом для оценки характеристик атмосферы и их поведения с высотой. Для высот ниже 30 км численное решение уравнения (2) показывает хорошее соответствие экспериментальным данным по справочным атмосферам. Математическое исследование уравнений аэродинамики позволяет улучшить понимание протекающих в атмосфере процессов, оценить параметры для использования более сложных численных климатических моделей. Полученные решения могут оказаться полезными для научных и образовательных целей.

Список источников

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI: Гидродинамика. М.: Наука; Гл. ред-ция физмат. лит-ры, 1988. 736 с.
2. Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды. М.: Мир, 1980. 551 с.
3. Моханкумар К. Взаимодействие стратосферы и тропосферы. М.: Физматлит, 2011. 452 с.
4. Эккарт К. Гидродинамика океана и атмосферы. М.; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2004. 238 с.
5. Гилл А. Динамика атмосферы и океана: в 2 т. М.: Мир, 1986. Т. 1. 396 с. Т. 2. 415 с.
6. Salby M.L. Fundamentals of Atmospheric Physics. San Diego, United States: Elsevier Science, Academic Press, 1996. 627 p.
7. Randall D.A., Wood R.A., Bony S., Colman R., Fife J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srinivasan J., Stouffer R.J., Sumi A., Taylor K.E. Climate Models and Their Evaluation // Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2007.
8. Радионов А.А. Математическая модель равновесия столба сжимаемой атмосферы. Часть 1: Стационарные решения для температуры // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2022. № 3. С. 79–90.

9. Ekman V. W. On the influence of the Earth's rotation on ocean currents // Arkiv. Matematik. Astron. Fysik. 1905. Vol. 2. P. 1–53.

10. ГОСТ Р 53460-2009. Глобальная справочная атмосфера для высот от 0 до 120 км для аэрокосмической практики. Параметры. М., 2009.

References

1. Landau L.D., Lifshits E.M. *Theoretical physics. Vol. VI: Hydrodynamics*. Moscow: Nauka Publ.; Main Edition of Physical and Mathematical Literature; 1988. 736 p. (In Russ.).

2. Skorer R. *Aerohydrodynamics of the environment*. Moscow: Mir Publ.; 1980. 551 p. (In Russ.).

3. Mohankumar K. *Interaction of the stratosphere and the troposphere*. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2011. 452 p. (In Russ.).

4. Eckart K. *Hydrodynamics of the ocean and atmosphere*. Moscow; Izhevsk: Reguljarnaya i khaoticheskaya dinamika Publ.; 2004. 238 p. (In Russ.).

5. Gill A. *Dynamics of the atmosphere and ocean*: in 2 vol. Moscow: Mir Publ.; 1986. Vol. 1. 396 p. Vol. 2. 415 p. (In Russ.).

6. Salby M. L. *Fundamentals of Atmospheric Physics*. San Diego: Elsevier Science, Academic Press; 1996. 627 p.

7. Randall D.A., Wood R.A., Bony S., Colman R., Fife J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srinivasan J., Stouffer R.J., Sumi A., Taylor K.E. Climate Models and Their Evaluation. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge; New York: Cambridge University Press; 2007.

8. Radionoff A.A. Analytical study of equilibrium of the compressible column of atmospheric air. Part 1 : Stationary solution for temperature. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2022;(3):79-90. (In Russ.).

9. Ekman V. W. On the influence of the Earth's rotation on ocean currents. *Arkiv. Matematik. Astron. Fysik*. 1905;2:1-53.

10. GOST R 53460-2009. *Global reference atmosphere for altitudes from 0 to 120 km for aerospace practice. Parameters*. Moscow, 2009. (In Russ.).

Информация об авторе

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

Information about the author

A.A. Radionoff - Candidate of Science (Technical Science), Researcher, Laboratory of the Mathematical Modeling.

Статья поступила в редакцию 28.07.2022; одобрена после рецензирования 09.08.2022; принята к публикации 15.11.2022.
The article was submitted 28.07.2022; approved after reviewing 09.08.2022; accepted for publication 15.11.2022.

Научная статья

УДК 553.3/4:553.2

doi: 10.18522/1026-2237-2022-4-2-60-76

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ЗОНАЛЬНОСТЬ ЗАЛЕЖИ ФИЛИЗЧАЙСКОГО КОЛЧЕДАННО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ СКЛОН БОЛЬШОГО КАВКАЗА)

Нигяр Айдын кызы Саттар-заде¹, Назим Аждадар оглы Имамвердиев²

^{1,2} Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан

¹nigar-23@mail.ru

²inazim17@yahoo.com✉

Аннотация. Рассматриваются геохимические особенности и зональность рудной залежи Филлизчайского месторождения южного склона Большого Кавказа. Изучены пространственное распределение ценных компонентов (Cu, Zn, Pb), их сумма, а также распределение Ag, имеющего высокое содержание для залежи Филлизчайского месторождения. На основе программы Leapfrog GEO построена модель месторождений. С целью количественного выражения зональности вычислен показатель геохимической зональности на основе соотношений концентраций элементов, накопленных в верхней (Zn, Pb, Ag) и нижней (Cu, Co, Mn) частях рудной залежи. Установлено, что в азербайджанской части южного склона Большого Кавказа по мере перехода с северо-запада на юго-восток отмечается региональная рудная зональность, выраженная в смене халькопирит-пирротиновых руд колчеданно-полиметаллическими, вследствие чего происходят уменьшение концентрации меди и увеличение количества цинка и в особенности свинца. По степени интенсивности проявления цинкового, свинцового и серебряного оруденения в залежи можно различить две части: западную, более богатую, где сосредоточены почти все максимумы, и восточную, более бедную, на которую приходится большинство минимумов. В восточной части рекомендуются дополнительные геолого-разведочные работы. Распределение элементов по отдельным скважинам устанавливает четкую зональность по мощности рудной залежи, которая проявляется в закономерной смене минерального и химического состава руд от лежащего к висячему боку. Это приводит к накоплению меди, кобальта, олова и марганца в лежащем и концентрации цинка, свинца, кадмия, таллия, ртути, сурьмы и др. в висячем боку рудной залежи.

Ключевые слова: геохимическая особенность, зональность рудной залежи, Филлизчайское колчеданно-полиметаллическое месторождение, южный склон Большого Кавказа, программа Leapfrog GEO, показатель геохимической зональности

Для цитирования: Саттар-заде Н.А., Имамвердиев Н.А. Геохимические особенности и зональность залежи Филлизчайского колчеданно-полиметаллического месторождения (южный склон Большого Кавказа) // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 4-2. С. 60–76.

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

Original article

GEOCHEMICAL FEATURES AND ZONING OF THE FILIZCHAY PYRITE-POLYMETALLIC DEPOSIT (SOUTHERN SLOPE OF THE GREATER CAUCASUS)

Nigyar A. Sattar-zadeh¹, Nazim A. Imamverdiyev²

^{1,2} Baku State University, Baku, Azerbaijan

¹nigar-23@mail.ru

²inazim17@yahoo.com✉

© Саттар-заде Н.А., Имамвердиев Н.А., 2022

Abstract. *The article discusses the geochemical features and zoning of the ore deposit of the Filizchay deposit on the southern slope of the Greater Caucasus. The spatial distribution of valuable (Cu, Zn, Pb) components, their sum, as well as the distribution of Ag, which have a high content for the Filizchay deposit, are considered. A field model was built on the basis of the Leapfrog GEO program. In order to quantify zoning, the index of geochemical zoning was calculated based on the ratios of the concentrations of elements accumulated in the upper part of the ore deposit (Zn, Pb, Ag) and elements accumulated in the lower part of the deposit (Cu, Co, Mn). It has been established that in the Azerbaijan part of the southern slope of the Greater Caucasus, as we move from the northwest to the southeast, there is a regional ore zonality, expressed in the change of chalcopyrite-pyrrhotite ores by sulfide-polymetallic ones, as a result of which there is a decrease in the concentration of copper and, accordingly, an increase in the amount of zinc and especially lead. According to the degree of intensity of manifestation of zinc, lead and silver mineralization in the deposit, two parts can be distinguished: the western one is richer, where almost all the maxima are concentrated, and the eastern one is poorer, which accounts for most of the minima. Additional exploration work is recommended in the eastern part. The distribution of elements in individual wells established a clear zoning in terms of the thickness of the ore deposit, manifested in a regular change in the mineral and chemical composition of ores from a lying to a hanging side. This leads to the accumulation of copper, cobalt, tin and manganese in the foot, and the concentration of zinc, lead, cadmium, thallium, mercury, antimony, etc. in the hanging side of the ore deposit.*

Keywords: *geochemical feature, zoning of the ore deposit, Filizchay pyrite-polymetallic deposit, southern slope of the Greater Caucasus, Leapfrog GEO program, index of geochemical zoning*

For citation Sattar-zadeh N.A., Imamverdiyev N.A. Geochemical Features and Zoning of the Filizchay Pyrite-Polymetallic Deposit (Southern Slope of the Greater Caucasus). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(4-2):60-76. (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

Южный склон Большого Кавказа является одним из богатейших на Южном Кавказе по содержанию полиметаллических месторождений цинка, свинца, а также других компонентов. С этой точки зрения большой интерес представляет Филизчайское колчеданно-полиметаллическое месторождение Большого Кавказа, являющееся ценным объектом для добычи цинка, свинца, серебра, а также попутных компонентов, таких как золото, кадмий, индий, медь, олово, висмут, сурьма, селен, теллур и др.

Несмотря на то что месторождение южного склона Большого Кавказа изучено достаточно, до сих пор не построена геохимическая 3D-модель для отдельных рудных элементов, которая наглядно отражала бы все основные особенности геологической структуры моделируемого участка месторождения. С ее помощью можно решить многие вопросы – дать более точный подсчет запасов руды и металлов, проектировать очередные разведочные и съемочные подземные горные выработки.

Таким образом, разработка и построение геолого-генетических 3D-моделей рудообразующих систем на основе геохимических данных буровых скважин являются новым этапом в изучении колчеданных месторождений.

Главная цель представленной статьи – на основе детального комплексного геолого-минералого-геохимического изучения рудных залежей и отдельных рудообразующих минералов построить 3D-модель для отдельных рудных элементов, выявить геохимические аномалии, геохимическую зональность на основе соотношений концентраций элементов. Чтобы ответить на эти вопросы, требуется изучить распределение редких и рассеянных элементов в рудах с целью выяснения геохимической зональности по восстанию рудной залежи, геохимических аномалий и с помощью программы Leapfrog GEO построить геохимическую 3D-модель для отдельных рудных элементов (Zn, Pb, Ag).

Методика проведенных исследований

В статье использованы более 2000 анализов из разведочных скважин. На основе программы Leapfrog GEO построены геохимические 3D-модели для отдельных элементов. Аналитические работы проводились рентгеновским флуоресцентным методом в лабораториях Геологической службы Министерства экологии и природных ресурсов Азербайджана.

Геологическая позиция Филизчайского рудного поля в мегантиклинории Большого Кавказа

Рудные месторождения южного склона Большого Кавказа, в частности Кацдаг-Филизчайский рудный узел, куда входит Филизчайское месторождение, изучались многими исследователями [1–16].

Геологическая позиция рудного узла определяется расположением его на западном фланге Балакян-Загатальского рудного района (рис. 1) [17], где он приурочен к области сочленения Туфанской и Мазым-Сарыбашской подзон вдоль Кехнамеданской глубинной зоны разломов. В пределах рудного узла Туфанской подзоне обнажаются терригенные отложения верхнего (филизчайская серия) и нижнего (муровдагская серия) плинсбахов и верхнего тоара (джихихская серия), которые образуют Кацдагскую линейную антиклиналь первого порядка, вмещающую одноименное месторождение. В Мазым-Сарыбашской подзоне выступают отложения нижнего (балакянская серия) и верхнего (филизчайская серия) плинсбахов и тоара (губахская серия), смятые в Карабчайскую коробчатую антиклиналь, которая вмещает рудную залежь Филизчайского месторождения (рис. 2, 3).

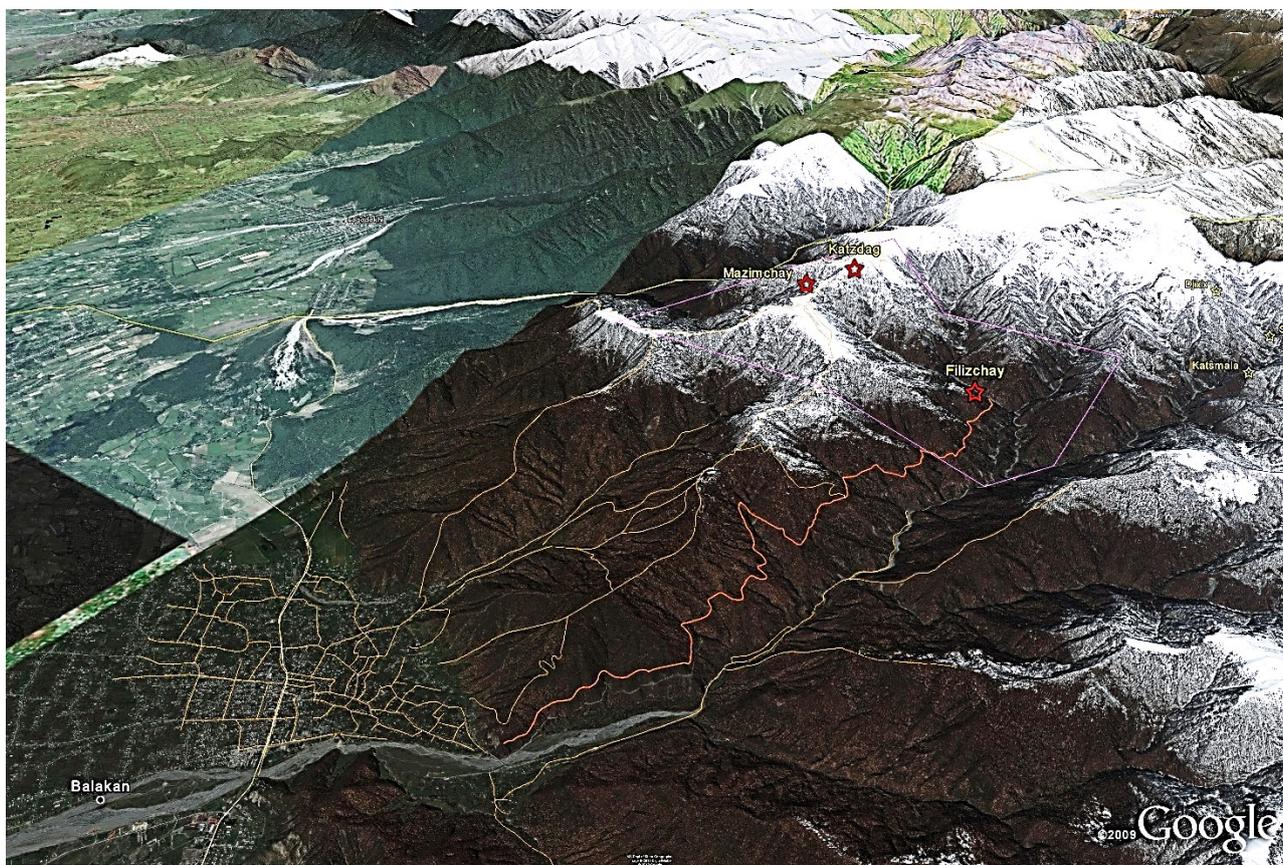


Рис. 1. Место расположения района Филизчайского месторождения [17]
/ Fig. 1. Location of the Filizchay deposit area [17]



Рис. 2. Стратиграфическая колонка рудовмещающих отложений
 Филизчайско-Аттагайской фациальной подзоны Сарыбашской структурно-формационной зоны
 (южная часть Кацдаг-Филизчайского рудного узла). Масштаб 1:10 000 (составила Н.А. Саттар-заде)
 / Fig. 2. Stratigraphic column of ore-bearing deposits of the Filizchai-Attagai facies subzone
 of the Sarybash structural-formational zone (southern part of the Katsdag-Filizchai ore cluster).
 Scale 1:10,000 (Compiled by N.A. Sattar-zadeh)

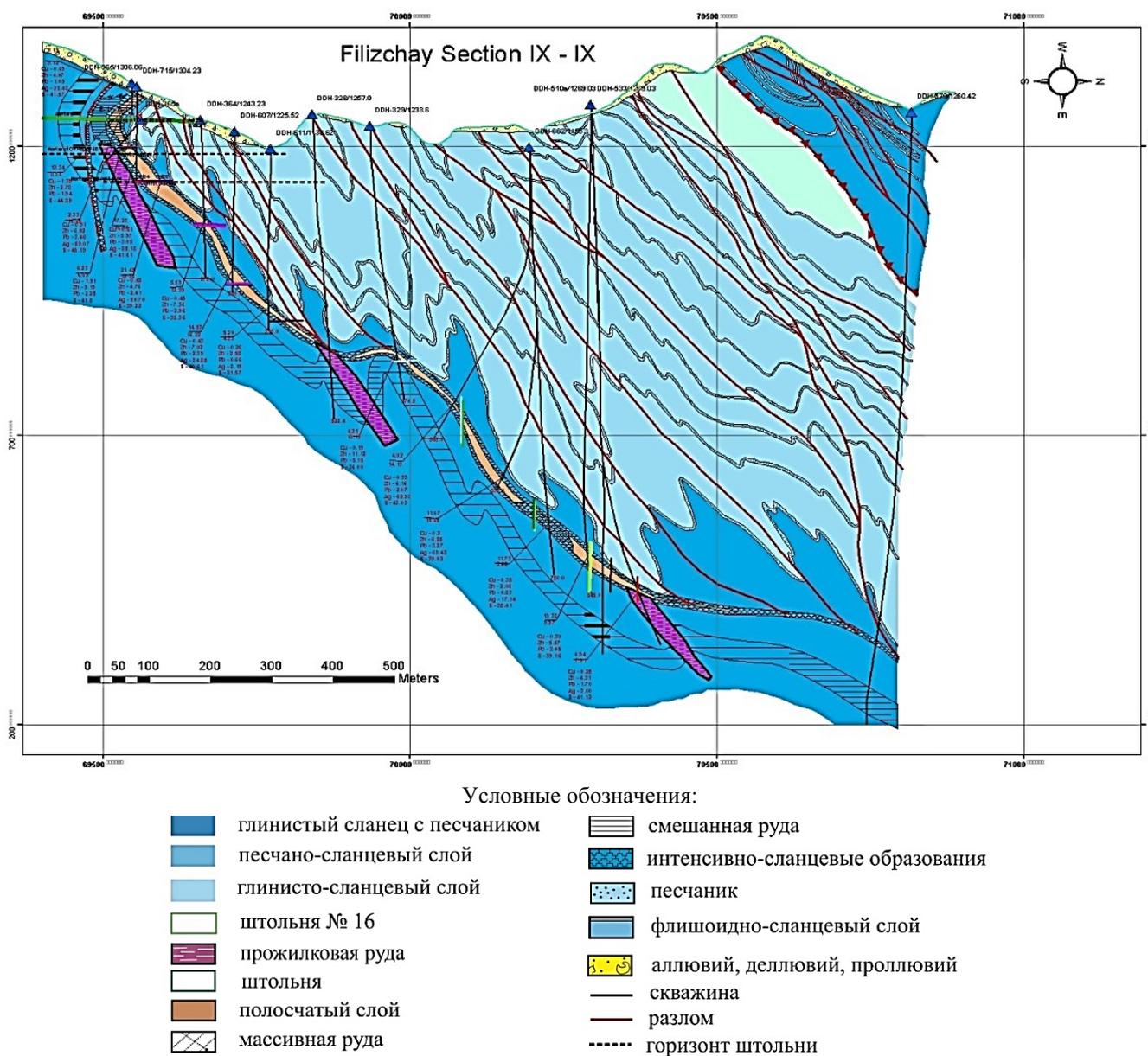


Рис. 3. Схематический геологический разрез Филизчайского месторождения / Fig. 3. Schematic geological section of the Filizchay deposit

Прежде чем перейти к литолого-стратиграфической характеристике разреза терригенных отложений нижней юры района месторождения, кратко остановимся на петрографических особенностях основных литологических разновидностей пород.

Глинистые сланцы, занимающие главный объем пород Филизчайского месторождения, характеризуются черным, серовато-бурым и реже зеленовато-бурым цветом. Типичными структурами являются пелитовая и алевро-пелитовая. В метаморфизованных, тонколистоватых разностях (до филлитов) структуры типично микролепидобластовые с тонкополосчатой и волокнисто-полосчатой текстурой за счет чередования субмиллиметровых полос слюд (чаще мусковит, серицит, реже хлорит) и темно-бурых анизотропных частиц. Встречаются также тонкослоистая и микрослоистая текстуры. В составе глинистых сланцев помимо пелитового вещества присутствуют также обломочная, аутигенная и органическая составные части.

Алевро-глинистые сланцы и алевролиты характеризуются алевроитовой и алевролитопелитовой структурами; текстура чаще микрополосчатая, слоистая, сланцеватая, микроплойчатая. В метаморфизованных разностях наблюдается бластоалевролитовая структура с микролепидобластовой структурой цемента.

Песчаники в основном относятся к мелко- и среднезернистым разностям (до 60 %) с размерами обломков от 0,1–0,25 до 0,5–1,5 мм. Характерная особенность – слабая окатанность обломочного материала и сортировка, форма зерен удлинённая, реже изометричная (до 30 % – обломки). Иногда наблюдается примесь обломков алевролитового материала (10–15 %), цемент, составляющий до 50 % породы. Неоднороден по составу и строению кварц: полевошпатовый, хлорит-серицит-кварцевый, слюдисто-глинистый, слюдисто-кремнисто-глинистый, глинисто-серицит-кремнистый.

Отложения филизчайской серии представлены толщей темно-серых, почти черных глинистых сланцев, чередующихся в виде пачек с пакетами песчаного флишоида (рис. 2). Эта толща вмещает одноименную залежь, выступая в ядре Карабчайской антиклинали в виде относительно узкой полосы. Подошва толщи на площади месторождения не подсечена и установлена лишь в пределах Кацдаг-Филизчайского рудного узла.

Отложения филизчайской серии вверх по разрезу сменяются отложениями губахской, которые расчленяются на две толщи: песчано-сланцевую и глинисто-сланцевую (рис. 2). Первая из них ($J_{1t_{1+2}}$) на месторождении играет роль надрудной и занимает около половины площади выходов отложений тоарского яруса. На всем субширотном простирании согласно перекрывает третью (верхнюю) рудовмещающую пачку глинистых сланцев, наиболее древнюю для месторождения филизчайской серии, слагая относительно пологое северное крыло Карабчайской антиклинали [2, 5, 9, 14].

Далее к северу со стороны всячего бока Кехнамеданской взбросо-надвиговой зоны обнажаются терригенные комплексы тоара Туфанской структурно-формационной подзоны, представленные двумя толщами: глинисто-сланцевой ($J_{1t_1^2}$) и песчано-сланцевой ($J_{1t_1^1}$) муровдагской серии [1–4].

Следует отметить, что ритмичность строения разрезов носит ярко выраженный флишоидный характер, наиболее полно представленный во флишоидных пакетах филизчайской серии верхнего плинсбаха и наименее ярко – в муровдагской серии нижнего тоара. Количество сульфидных вкраплений, конкреций и стяжений (преимущественно пиритовый состав) закономерно нарастает сверху вниз от тоара к плинсбаху, достигая максимума в третьей пачке глинистых сланцев плинсбаха (филизчайская серия), вмещающей стратиформную колчеданную залежь месторождения.

Основной особенностью морфологии колчеданно-полиметаллической залежи Филизчайского месторождения является то, что это – единое, компактное пластообразное тело, сложенное преимущественно (90–95 %) агрегатами сульфидных руд, основу которых составляют пирит и в значительно меньшей степени сфалерит, галенит, халькопирит и пирротин. Подчиненную роль в составе залежи играют карбонатные минералы, еще меньшую – кварц, серицит и хлорит.

Рудное тело залегаёт среди монотонных глинистых сланцев верхней, третьей пачки филизчайской серии. Здесь залежь приурочена к мощному рудоносному горизонту, граница которого по латерали определяется границами Балакенчайского поперечного поднятия, где рудоносные глинистые сланцы фациально замещаются песчаным флишоидом.

Структурная позиция пластообразной колчеданной залежи определяется ее приуроченностью к центральной части северного крыла Карабчайской антиклинали субширотного простирания. Залежь простирается с азимутом 80–85° и падает согласно с общим падением северного крыла на север-северо-запад 350–355° под средним углом 35–45°. Западным и восточным ограничениями залежи служат наиболее протяженные поперечные флексурные изгибы, осложняющие северное крыло антиклинали соответственно на западе и востоке.

Для колчеданно-полиметаллических руд месторождения характерны следующие основные минералого-текстурные разновидности (природные типы): слоисто-полосчатые колчеданно-полиметаллические, массивные серно-колчеданные, массивные колчеданно-полиметаллические, пятнисто-вкрапленные колчеданно-полиметаллические и прожилково-вкрапленные колчеданно-полиметаллические. Прожилково-вкрапленные руды прислоняются к залежи со стороны лежащего бока и рассматриваются как самостоятельные тела [2].

Геохимическая модель залежи Филизчайского месторождения

Главной стадией работ при создании 3D-модели является точная проверка введенных данных. При создании модели Филизчайского месторождения выяснилось, что минимальная ошибка дает большие аномалии. Время на поиск и исправление ошибок заняло более 2 месяцев. В конечном итоге все данные были исправлены и введены достаточно точно.

Исправленные данные показываются в трехмерном пространстве, и можно еще раз проверить расположение скважин и правильность отображения геологической обстановки.

После создания 3D из выбранных моделей элементов Филлизчайского месторождения строится геохимическая модель по отдельным элементам или же по совокупности определенных элементов (например, Cu+Zn+Pb). Эту блок-диаграмму можно вращать в разные стороны и рассматривать полную 3D-модель месторождения. Здесь имеются недостатки, которые не позволяют раздвинуть модель и посмотреть различные геологические слои. Но программа Leapfrog GEO эти недостатки устраняет. Модель четко отражает все основные особенности геологической структуры моделируемого участка месторождения.

На основе этой программы нами построена 3D-модель залежи Филлизчайского месторождения. Геологическую структуру месторождения представляют трехмерной моделью элементов полезных ископаемых (3D-модель) (рис. 4). С помощью 3D-модели и структур, воплощенных в интегрированный пакет программ Leapfrog GEO [18], создана минералого-геохимическая модель одной рудной залежи под разным азимутом. Эта модель может быть использована при подсчете запасов руды и её металлов. С ее помощью могут быть решены многие вопросы проектирования очередных разведочных и выемочных подземных горных выработок. Такая модель значительно нагляднее отражает все основные особенности геологической структуры моделируемого участка месторождения.

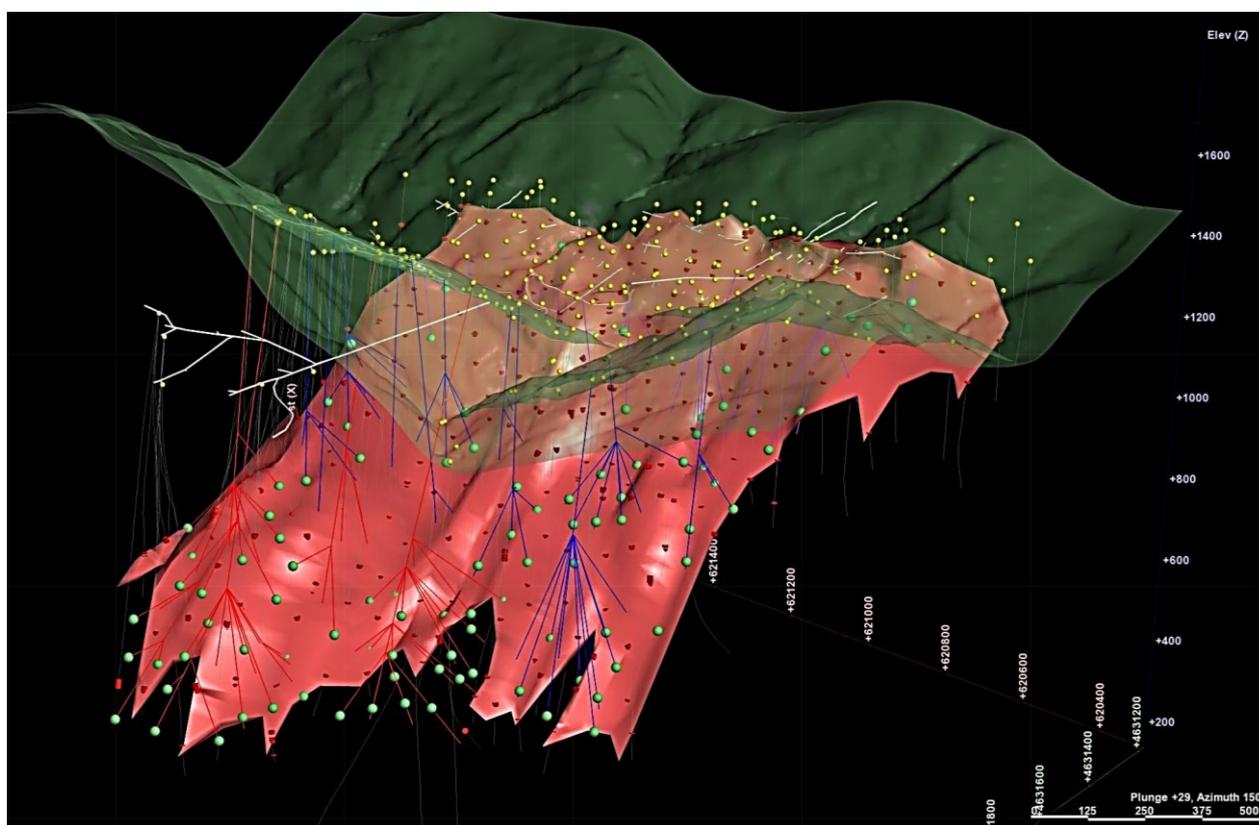


Рис. 4. 3D-модель Филлизчайского месторождения / Fig. 4. 3D model of the Filizchay deposit

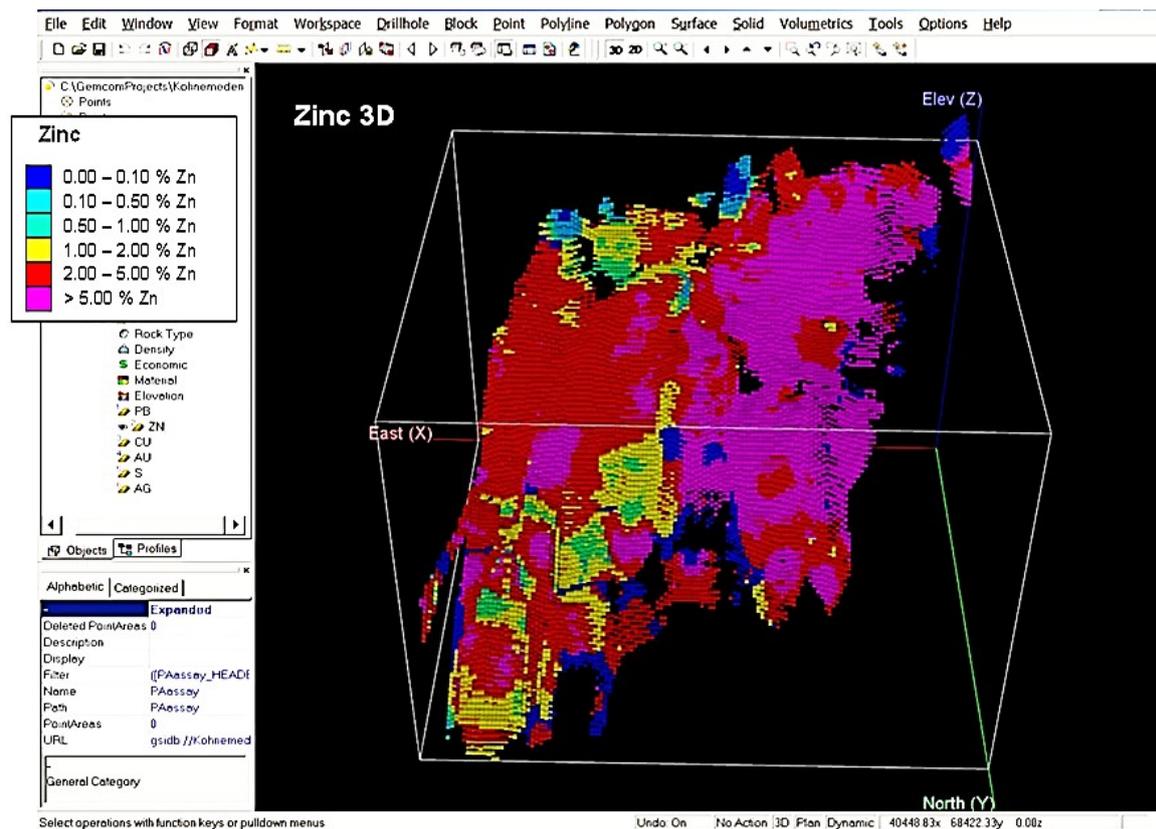
Ниже приводятся пространственные распределения ценных компонентов Cu, Zn, Pb (табл. 1, рис. 5–7), их сумма, а также распределения S и Ag, для залежи Филлизчайского месторождения, построенные на основе программы Leapfrog GEO.

В распределении рудосоставляющих компонентов и элементов-примесей в залежи отмечается определенная закономерность, связанная с общей схемой минералогической зональности. Вопросы зональности рудных залежей колчеданных и колчеданно-полиметаллических месторождений и закономерности распределения в них основных и примесных элементов освещены в многочисленных публикациях [4, 9, 19–22].

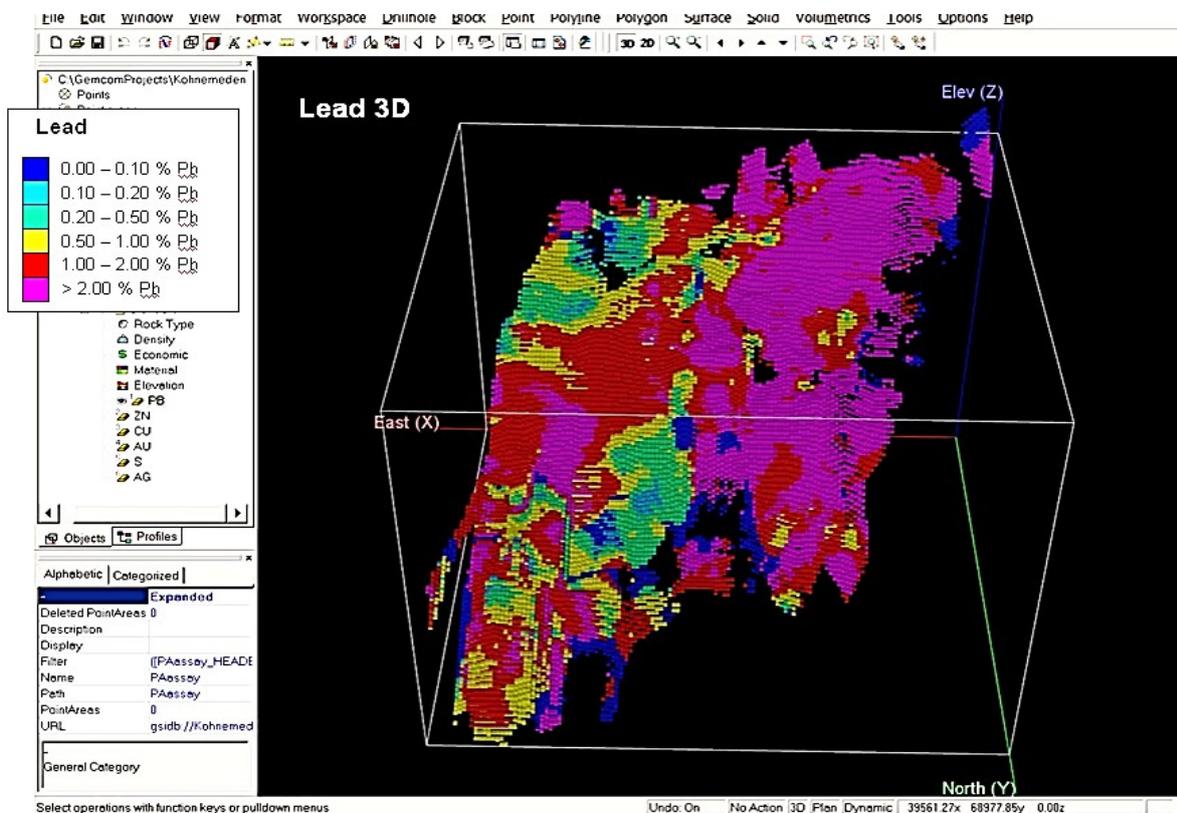
Таблица 1 / Table 1

**Анализ групповых проб для составления геохимической модели Филлизчайского месторождения
/ The analyz of group samples for compiling a geochemical model of the Filizchay deposit**

| № скв. | Размер, м | Cu, % | Zn, % | Pb, % | S, % | Ag, г/т |
|--------|-------------|-------|-------|-------|------|---------|
| 26 | 117,3–126 | 0,48 | 10,5 | 3,95 | 40 | 90 |
| 30 | 400,9–411,9 | 0,3 | 9,9 | 5,75 | 42,9 | 140 |
| 56 | 409–412 | 0,29 | 3,74 | 0,88 | 42,9 | 90 |
| 57 | 383–388,3 | 0,68 | 3,3 | 1,2 | 38,9 | 25,8 |
| 67 | 554,3–564 | 0,56 | 4 | 1,47 | 38,9 | 29 |
| 68 | 303–309,5 | 0,81 | 3,88 | 1,5 | 41,8 | 44 |
| 70 | 253,8–264,5 | 3,7 | 0,55 | 0,28 | 39,5 | 150 |
| 310 | 189,2–199,1 | 0,51 | 7,12 | 3,3 | 45,5 | 43,4 |
| 312 | 119,7–131 | 0,7 | 6,25 | 2,55 | 39,1 | 48 |
| 314 | 251–260,3 | 0,53 | 4,12 | 1,74 | 36,8 | 36,8 |
| 315 | 151,1–163 | 0,55 | 3,85 | 1,6 | 38,2 | 43,8 |
| 342 | 303,9–313,3 | 0,63 | 1,63 | 0,44 | 35,3 | 22,6 |
| 349 | 385,9–391,5 | 0,8 | 2,2 | 0,76 | 38,7 | 36 |
| 360 | 134,6–144,5 | 0,53 | 5 | 1,9 | 43 | 62 |
| 374 | 202–216,4 | 0,53 | 6,75 | 1,65 | 42,7 | 36 |
| 404 | 335–346,6 | 0,41 | 4,75 | 2,24 | 43,6 | 46 |
| 416 | 86,1–90,4 | 0,3 | 2,24 | 0,24 | 29,3 | 25,6 |
| 443 | 458,3–469,4 | 0,8 | 1,81 | 0,55 | 36,7 | 23,2 |
| 444 | 290,6–303,6 | 0,48 | 4,95 | 1,42 | 39,5 | 60,3 |
| 469 | 302,8–316,3 | 1,22 | 2,57 | 0,64 | 36,3 | 9,1 |
| 515 | 756,3–762 | 0,53 | 3,65 | 1,87 | 45,1 | 80 |
| 528 | 505,6–513 | 0,48 | 2,7 | 1,55 | 29,7 | 46,6 |
| 555 | 657–661,6 | 0,34 | 0,8 | 0,22 | 30,5 | 40 |
| 558 | 199–206 | 0,78 | 2,9 | 0,96 | 40 | 24,6 |
| 560 | 860,8–864,9 | 0,4 | 1,57 | 0,27 | 42 | 21 |
| 575 | 781–785 | 0,43 | 6,6 | 0,52 | 37,2 | 47,2 |
| 583 | 876,2–877,1 | 0,47 | 1,16 | 0,71 | 42,4 | 3,1 |
| 584 | 664–667,2 | 0,9 | 1,84 | 0,42 | 34,6 | 20 |
| 592 | 756–762,8 | 2,4 | 1,05 | 0,08 | 38,5 | 10,4 |
| 594 | 952–960 | 0,63 | 0,13 | 0,28 | 45,8 | 28,8 |
| 600 | 836,1–844 | 0,42 | 1,73 | 0,44 | 37,9 | 16 |
| 605 | 188,8–192,9 | 0,42 | 5,39 | 1,82 | 37,3 | 72 |
| 606 | 197,6–202,6 | 0,32 | 8,25 | 3,09 | 41,1 | 71,4 |
| 608 | 273–280,4 | 0,47 | 1,03 | 0,25 | 43,3 | 2 |
| 611 | 273,6–275,5 | 0,33 | 3,13 | 0,93 | 40,4 | 17,8 |
| 620 | 252,4–254 | 0,38 | 6,12 | 2,87 | 37 | 82 |
| 624 | 178–188 | 0,96 | 0,03 | 0,84 | 41,7 | 20,5 |
| 644 | 245,4–258 | 0,37 | 10,52 | 2,81 | 37,6 | 67,8 |
| 659 | 475,4–476,6 | 0,43 | 7,02 | 2,28 | 39,7 | 45 |
| 668 | 288,5–297 | 0,54 | 1,31 | 1,3 | 42 | 60 |
| 670 | 709,1–710,3 | 0,16 | 0,48 | 1 | 40,9 | 55 |
| 676 | 731,4–737 | 0,63 | 0,69 | 0,14 | 41,4 | 600 |
| 696 | 522,8–530 | 0,33 | 5,86 | 1,82 | 38 | 70 |
| 698 | 344–352,4 | 0,7 | 5,66 | 3,04 | 34,1 | 80 |
| 703 | 581–588,9 | 0,29 | 2,37 | 0,64 | 39 | 35,4 |



a/a



b/b

Рис. 5. Зональность металлов на месторождении Филизчай – обогащение вдоль западной части месторождения: а – цинком; б – свинцом (3D-модель) / Fig. 5. Metal zoning at the Filizchay deposit: a - Zn; b - Pb enrichment along the western part of the deposit (3D model)

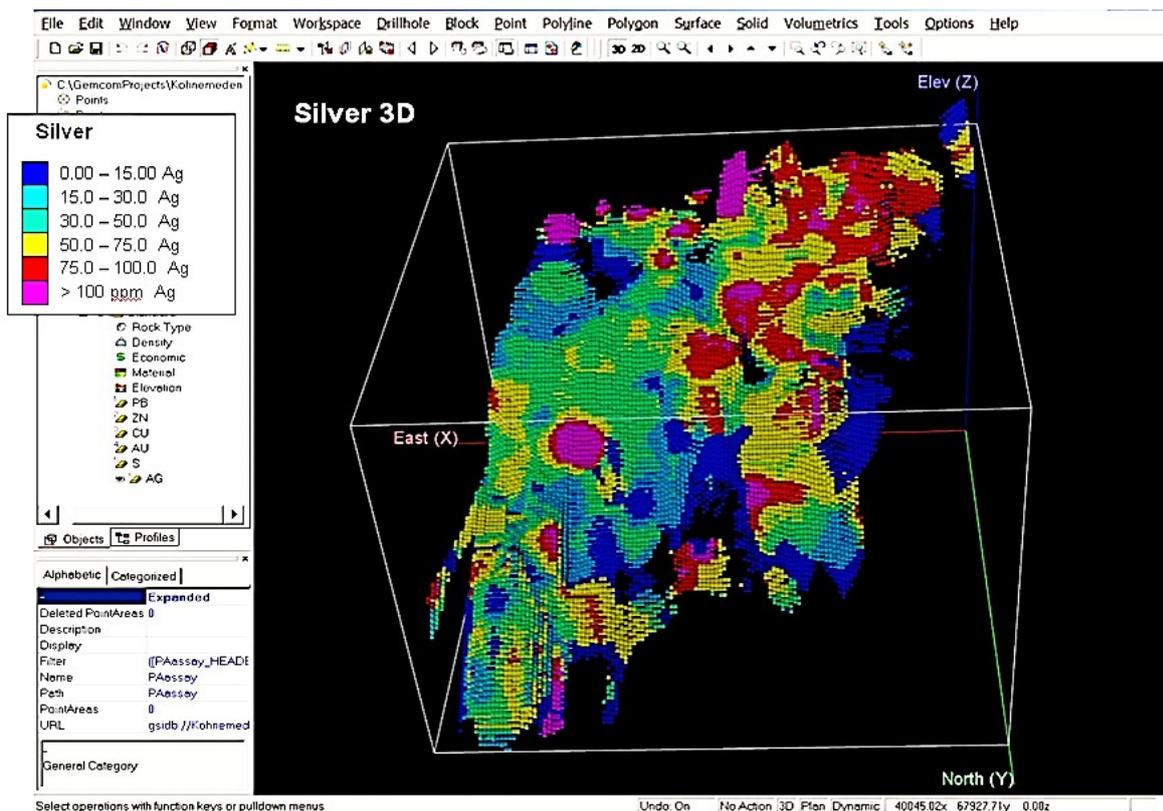


Рис. 6. Зональность металлов на месторождении Филizчай – обогащение серебром вдоль западной части месторождения (3D-модель) / Fig. 6. Metal zoning at the Filizchay deposit - Ag enrichment along the western part of the deposit (3D model)

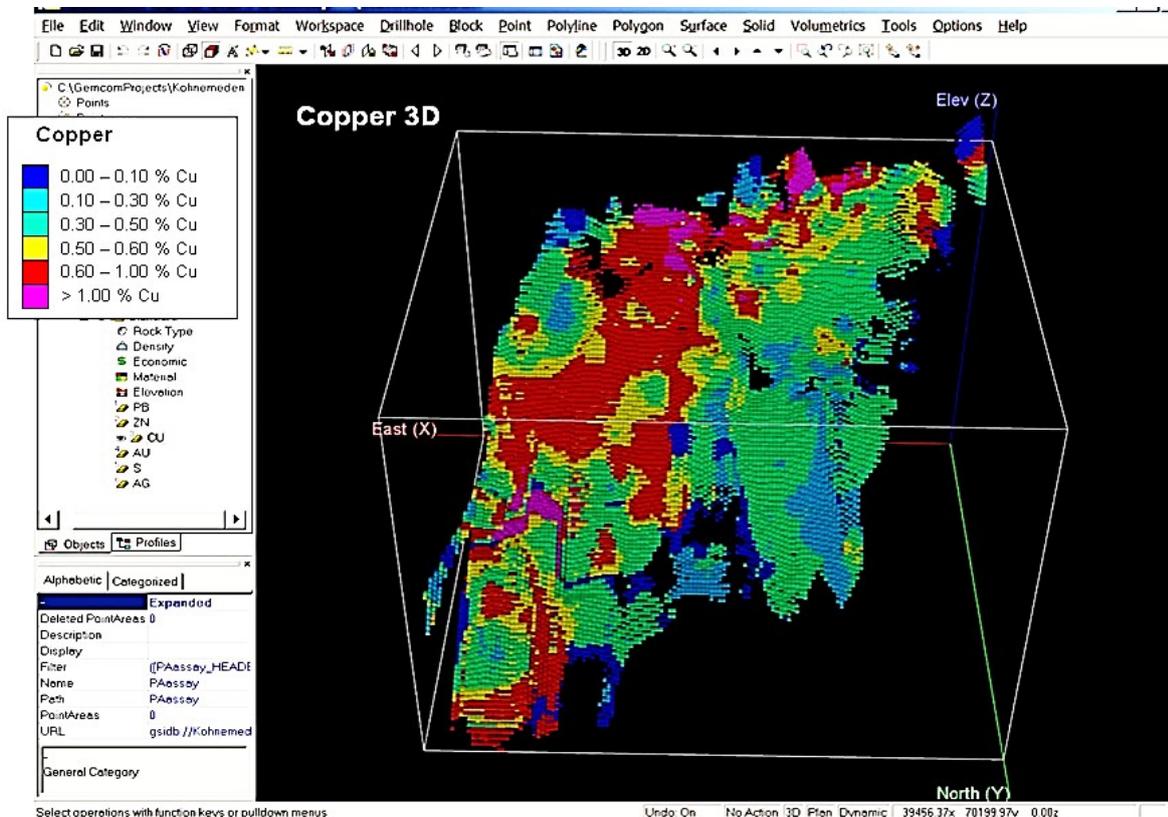


Рис. 7. Зональность металлов на месторождении Филizчай – обогащение медью вдоль восточной части месторождения (3D-модель) / Fig. 7. Metal zoning at the Filizchay deposit - copper enrichment along the eastern part of the deposit (3D model)

Установлено, что в азербайджанской части южного склона Большого Кавказа по мере перехода с северо-запада на юго-восток отмечается региональная рудная зональность, выраженная в смене халькопирит-пирротиновых руд колчеданно-полиметаллическими, вследствие чего происходит уменьшение концентрации меди и, соответственно, увеличение количества цинка и в особенности свинца [1, 5–8, 11, 12]. Изменение минерального состава руд отражается и в особенностях распределения элементов-примесей, а также в величинах индикаторных отношений компонентов.

В составе единой пластообразной залежи Филизчайского колчеданно-полиметаллического месторождения некоторые геохимические особенности распределения рудосоставляющих и благородных металлов отражены в работах [7, 8]. Установлено, что максимумы концентраций цинка и свинца занимают почти всю западную часть залежи, а меди – локальные участки на восточном фланге и в центральной части. Характер распределения серебра весьма близок со свинцом, а золота – с медной минерализацией. В целом с западного фланга рудной залежи на восточный наблюдается увеличение содержания меди и уменьшение концентраций цинка и свинца (рис. 5–7).

Оценочные запасы Филизчайского месторождения составляют 94,2 млн т, среднее содержание металлов следующее: Zn – 3,61 %, Pb – 1,48 %, Cu – 0,58 %, Ag – 44,7 г/т, Au – 0,6 г/т. Благодаря компьютерному 3D-моделированию внутри рудного тела четко видна металлическая зональность (рис. 5–7), что дает дополнительные возможности для будущего планирования добычи и оценки процесса.

Как видно из 3D-моделей, в среднем содержание меди составляет 0,6 % в верхнем горизонте (в смешанных рудах), а также на восточном фланге наблюдается обогащение этим элементом.

Цинк тоже не соответствует мощности руды и в среднем составляет 4–6 %. В центральной части рудной залежи с поверхности горизонта 1120 м до горизонта 500 м встречаются рудные скопления с содержанием цинка до 6–8 %. Ширина таких скоплений составляет 10–30 м. Они простираются на восток под углом 70–80°. В этих рудных скоплениях наблюдается ураганное содержание цинка – цинковые «линзы». В сторону западного фланга процентное содержание цинка увеличивается.

Самая обогащенная цинком часть наблюдается в центре ближе к поверхности в виде маленьких скоплений. На восточном фланге месторождения содержание свинца составляет 2–4 %.

По падению и простиранию стратиформной рудной залежи Филизчайского колчеданно-полиметаллического месторождения установлена четкая минералого-геохимическая зональность, обусловленная в основном последовательностью рудоотложения. Она выражается закономерным изменением минерального и связанного с ним химического состава текстурно-минералогических типов руд. Полиметаллический состав колчеданно-полиметаллических руд с относительно повышенной концентрацией примесных компонентов указывает на сложный многокомпонентный состав рудообразующих растворов. Состав элементов-примесей в минералах является типоморфной особенностью, отражающей состав минералообразующих растворов и физико-химические условия рудообразования. Закономерности размещения текстурно-минералогических типов руд на Филизчайском месторождении являются отражением первичной зональности распределения как рудосоставляющих элементов, так и примесных компонентов. Распространение редких и рассеянных элементов определяется пространственным размещением различных минеральных ассоциаций, распределенных закономерно в рудной залежи. В результате возникает минералого-геохимическая зональность. Как было отмечено выше, на Филизчайском месторождении отмечается зональность в распределении текстурно-минералогических типов руд и рудосоставляющих компонентов в рудной залежи.

Для выявления закономерностей распределения химических элементов были обработаны результаты многочисленных аналитических данных. Установлено, что в главной залежи исследуемого месторождения с западного фланга на восточный наблюдаются уменьшение содержания цинка (рис. 8а), свинца, кадмия, индия, таллия, серебра, золота, висмута, ртути, сурьмы, мышьяка и увеличение концентраций меди (рис. 8б), кобальта, никеля и селена. По падению рудной залежи геохимическая зональность выражается уменьшением концентраций цинка, свинца, кадмия, индия, висмута, сурьмы, мышьяка и увеличением содержания меди, кобальта, никеля и марганца. Составленные на основе буровых скважин модели показывают, что медью и серебром обогащены верхние (200 м) части и восточный фланг месторождения.

Распределением элементов по отдельным скважинам установлена четкая зональность по мощности рудной залежи, проявленная в закономерной смене минерального и химического состава руд от лежащего к висячему боку. Это приводит к накоплению меди, кобальта, олова и марганца в лежащем и концентрации цинка, свинца, кадмия, таллия, ртути, сурьмы и др. в висячем боку рудной залежи.

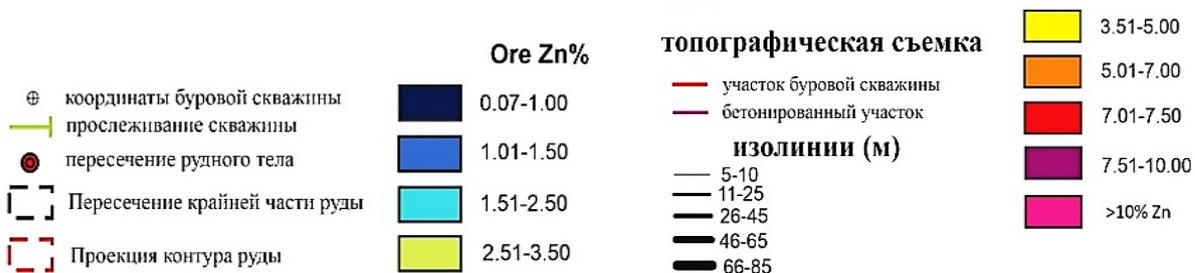
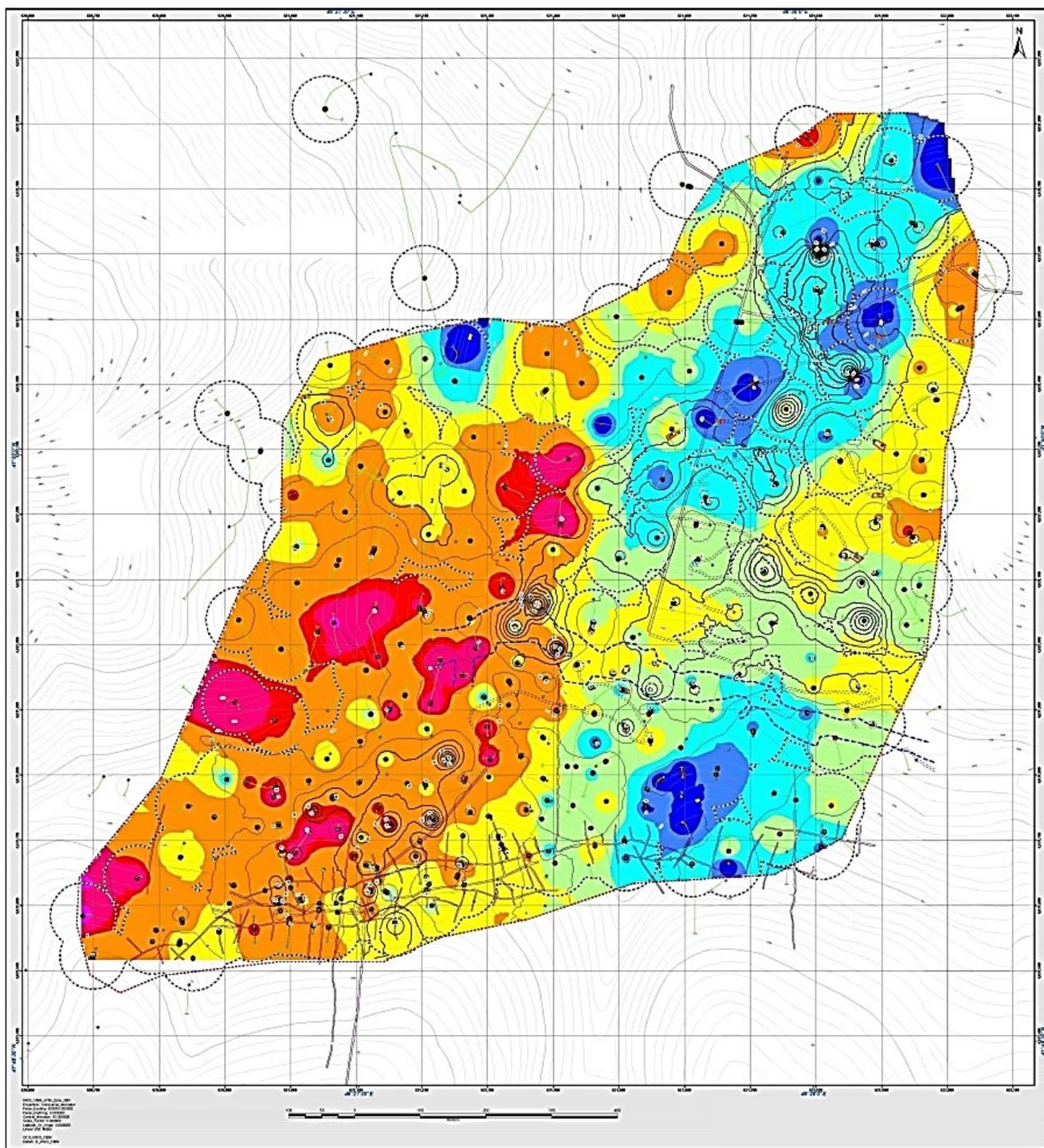
На Филізчайском месторождении геохимическая зональность, связанная с закономерным изменением концентраций отдельных элементов в пространстве, количественно отчетливо выражается с помощью величин индикаторных отношений (Zn·Pb)/(Cu·Co), Zn/Cd, Ag/Au, Co/Ni и др. (табл. 2). В горизонтах глубинности (верхние, средние и глубокие горизонты), выделенных в [12, 23], также отмечается закономерное изменение величины индикаторных отношений элементов.

Таблица 2 / Table 2

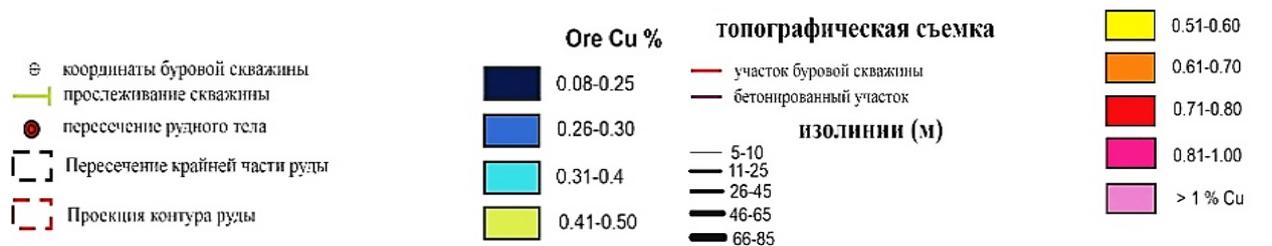
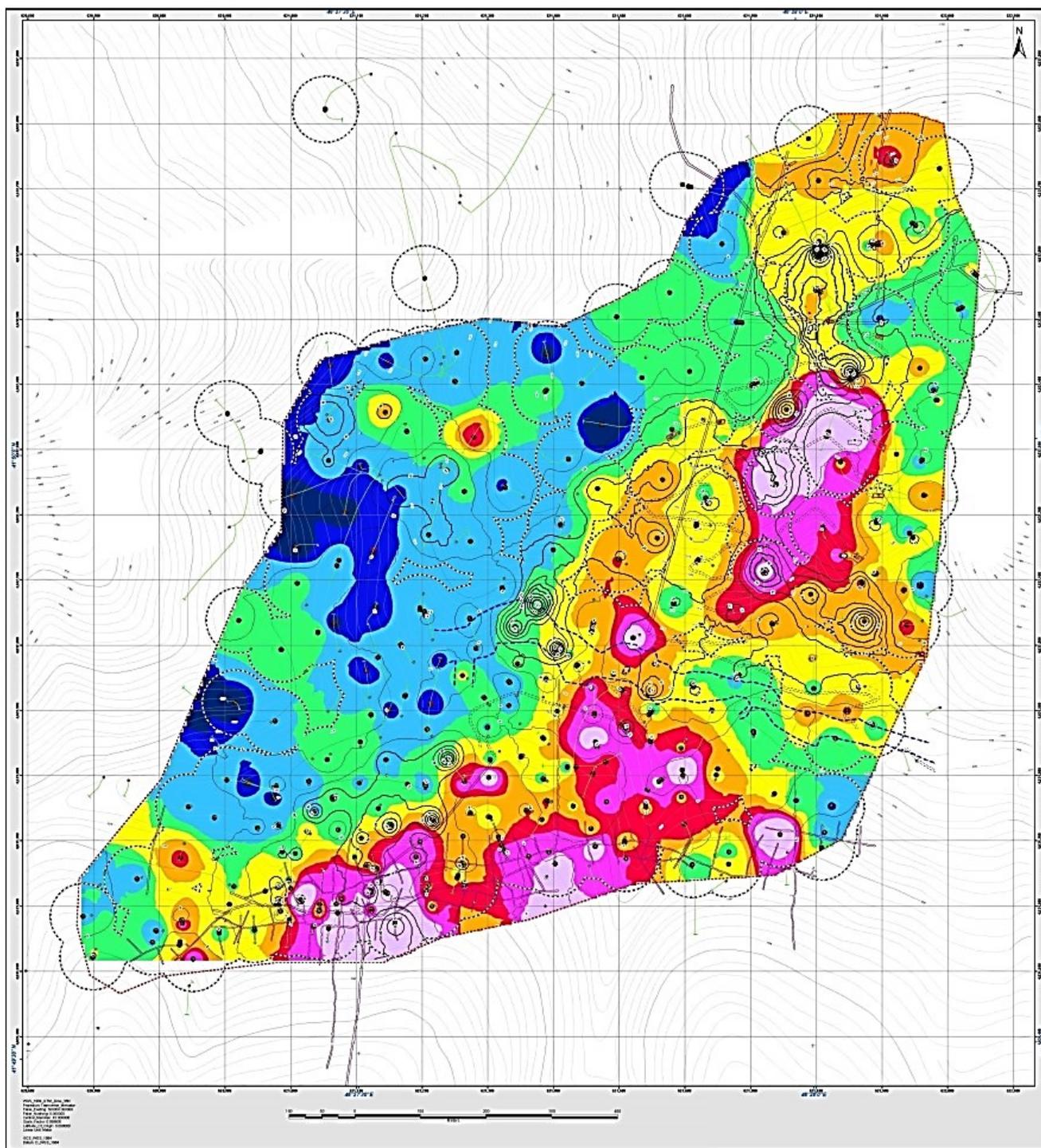
Среднее содержание рудосоставляющих и примесных компонентов, величины индикаторных отношений показателя зональности в колчеданно-полиметаллических рудах Филізчайского месторождения / The average content of ore constituents and impurity components, the values of indicator ratios of the zoning index in pyrite-polymetallic ores of the Filizchay deposit

| Элемент | Западный фланг (проф. IV–XI) | Центральная часть (проф. XII–XIX) | Восточный фланг (проф. XX–XXVI) |
|---|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Cu | 0,57 (150) | 0,58 (185) | 0,61 (114) |
| Zn | 5,59 (150) | 4,84 (185) | 3,50 (114) |
| Pb | 2,52 (150) | 1,93 (185) | 1,31 (114) |
| S | 40,25 (150) | 39,71 (183) | 38,82 (114) |
| Au | 0,9 (140) | 0,8 (173) | 0,7 (103) |
| Ag | 75,6 (97) | 55,2 (118) | 43,3 (92) |
| Bi | 102,4 (93) | 83,7 (130) | 70,8 (82) |
| Co | 181 (151) | 247 (186) | 252 (116) |
| Ni | 76 (88) | 114,5 (141) | 145 (143) |
| Cd | 78 (114) | 73,5 (113) | 53 (79) |
| Se | 5,5 (113) | 7,0 (135) | 6,3 (85) |
| Te | 2,0 (130) | 1,4 (156) | 1,7 (110) |
| Sb | 0,031 (132) | 0,023 (165) | 0,022 (108) |
| As | 0,25 (137) | 0,20 (171) | 0,15 (111) |
| Mn | 0,32 (137) | 0,27 (152) | 0,24 (113) |
| Zn: Cd | 717 | 658,5 | 660 |
| $\frac{Zn \cdot Pb}{Cu \cdot Co}$ | 1365 | 652 | 298 |
| Ag: Au | 84 | 69 | 62 |
| S: Se | $73,2 \cdot 10^3$ | $56,7 \cdot 10^3$ | $61,6 \cdot 10^3$ |
| Se: Te | 2,75 | 5 | 3,7 |
| Co: Ni | 2,4 | 2,2 | 1,7 |
| $\frac{Ag \cdot Pb \cdot Zn}{Cu \cdot Co \cdot Mn}$ | 32,26 | 13,33 | 5,38 |
| $\frac{Ag \cdot Pb \cdot Zn}{Cu^3}$ | 0,58 | 0,26 | 0,09 |
| $\frac{Ag \cdot Pb \cdot Zn}{Co^3}$ | $1,8 \cdot 10^4$ | $3,4 \cdot 10^3$ | $1,2 \cdot 10^3$ |

Для количественного выражения зональности вычислен показатель геохимической зональности на основе соотношений концентраций элементов, накопленных в верхней части (Zn, Pb, Ag) и нижней части залежи (Cu, Co, Mn). Принимая минимальное значение этого показателя за единицу, мы получили следующие величины коэффициента зональности для главной рудной залежи в отдельных гипсометрических уровнях от верхнего горизонта (абсолютные отметки 1300–1200 м) до глубокого (500–400 м) по 100-метровым горизонтам глубинности: 15; 12,8; 10,5; 5,9; 4,8; 1,8; 1; 1,8; 7,2. Закономерное изменение концентраций элементов по падению рудной залежи Филізчая наиболее отчетливо наблюдается при сравнении показателя зональности, возрастающего от центральной части залежи в направлении к верхним и глубоким горизонтам.



a/a



б/ б

Рис. 8. Геохимическая аномалия на Филізчайском месторождении (2D): а – цинка; б – меди.
 Масштаб 1:2000 / Fig. 8. Geochemical anomaly at the Filizchay deposit (2D): a - Zn; b - Cu. Scale 1:2000

Отмечена также геохимическая зональность по восстанию рудной залежи. Для количественной характеристики зональности вычислены средние содержания по скважинам, подсекающим рудную залежь на различных уровнях. По этим данным построены графики изменения геохимических показателей. Наиболее рациональными являются следующие геохимические показатели: $V_1 = \frac{Zn \cdot Pb \cdot Ag}{Cu \cdot Co \cdot Mn}$, $V_2 = \frac{Zn \cdot Pb \cdot Ag}{Cu^3}$, $V_3 = \frac{Zn \cdot Pb \cdot Ag}{Co^3}$. Они монотонно возрастают по восстанию рудной залежи в десятки и сотни раз (рис. 9). В целом в рудной залежи Филизчайского колчеданно-полиметаллического месторождения устанавливаются горизонтальная и вертикальная геохимическая зональности.

Таким образом, на месторождении установлена зональность в размещении текстурно-минералогических типов руд и отчетливая геохимическая зональность в распределении основных рудообразующих компонентов и элементов примесей по мощности, восстанию и простиранию в рудной залежи. Последняя выражается в величинах показателей зональности, индикаторных отношениях элементов, а также в изменении уровней концентраций элементов-примесей в сульфидах.

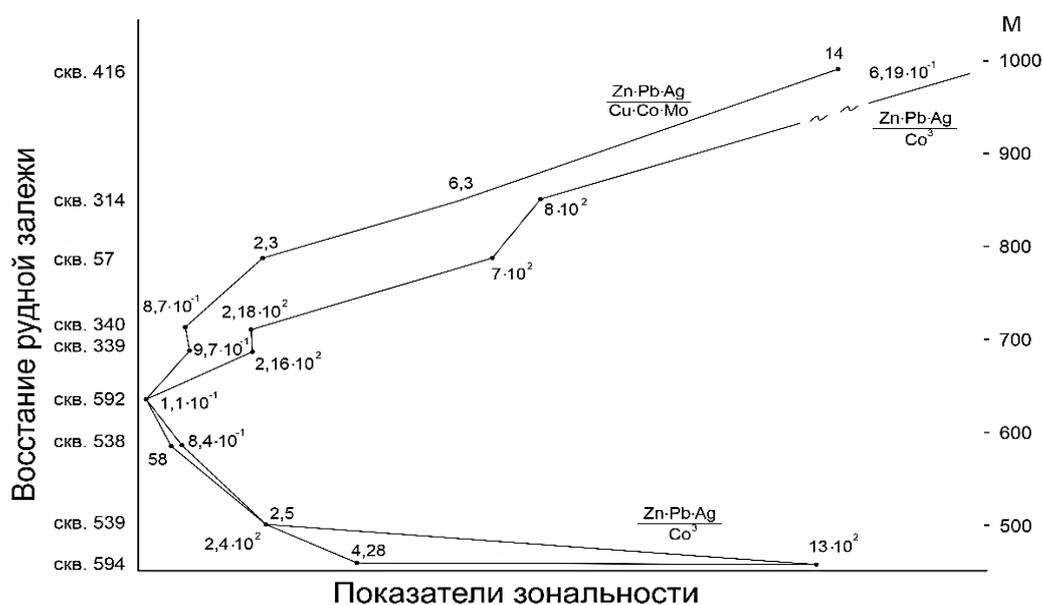


Рис. 9. График изменения показателей зональности по восстанию рудной залежи / Fig. 9. Graph of changes in zoning indicators for the uprising of the ore deposit

Заключение

Согласно анализу фактического материала, наиболее контрастной является изменчивость распределения мощностей и содержания меди, для которых очень отчетливо проявляется склонение залежи в северо-восточном направлении при ее падении на север. Это склонение выражено максимумами и полосами повышенных значений названных показателей в виде отдельных полос или цепочки, проходящих в плоскости тела от юго-западного до северо-восточных его флангов. По характеру размещения мощностей и содержанию меди залежь четко разделяется по диагонали на две части – юго-восточную, более мощную и богатую, и северо-западную, относительно меньшей мощности и с содержаниями ниже среднего по месторождению. По степени интенсивности проявления цинкового, свинцового и серебряного оруденения в залежи можно различить две части: западную – более богатую, где сосредоточены почти все максимумы, и восточную – более бедную, на которую приходится большинство минимумов. Граница между ними проходит примерно в средней части тела от верхних до нижних горизонтов; примерно совпадает с направлением его падения и отличается сложными очертаниями. Наиболее сложным оказывается распределение золота. В средней части месторождения, начиная примерно с уровня смены угла падения и ниже до гипсометрической отметки около 500 м, выделяется обширная область пониженных и минимальных концентраций металла. Эта область обрамляется (за исключением северо-западного и юго-восточного углов) широким ореолом повышенных содержаний, который занимает всю остальную площадь залежи и в пределах которого рассредоточено множество небольших по размерам максимумов. Распределение основных рудообразующих компонентов

(цинк, свинец и медь) в горизонтальном сечении иллюстрируется на планах трех горизонтов, представляющих верхнюю, среднюю и глубокую части месторождения.

Таким образом, Филлизчайское месторождение развивалось длительно, начиная с периода осадконакопления и вплоть до становления руд медно-пирротинового этапа. Нижний возрастной предел оруденения определяется наличием гидротермально-осадочных руд верхнего плинсбаха. Верхний возрастной предел устанавливается благодаря наличию галек гидротермально измененных пород и их сульфидных руд в конгломератах, подстилающих отложения низов верхней юры.

По степени интенсивности проявления цинкового, свинцового и серебряного оруденения в залежи можно различить две части: западную – более богатую, где сосредоточены почти все максимумы, и восточную – более бедную, на которую приходится большинство минимумов. В восточной части рекомендуются дополнительные геолого-разведочные работы.

Список источников

1. Агаев С.А., Велизаде С.Ф., Новрузов Н.А. Свинцово-цинковые месторождения южного склона Большого Кавказа // Геология Азербайджана. Т. 6: Полезные ископаемые. Баку: Nafta-Press, 2005. С. 159–201.
2. Баба-заде В.М., Агаев С.А. Особенности структурных условий локализации и морфологии рудной залежи Филлизчайского месторождения // Вестн. Бакинского ун-та. Серия естественных наук. 1999. № 1. С. 91–108.
3. Геология Азербайджана. Т. 5: Полезные ископаемые / под ред. А.А. Ализаде. Баку: Nafta-Press, 2005. 574 с.
4. Колчеданные месторождения Большого Кавказа. М.: Недра, 1973. 256 с.
5. Курбанов Н.К. Условия формирования и закономерности размещения стратиформных колчеданно-полиметаллических месторождений терригенных эвгеосинклиналей (на примере альпийской провинции Большого Кавказа) : автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М., 1986. 49 с.
6. Курбанов Н.К., Зайцева Л.В., Гаджиев Т.Г. Свинец и цинк // Геология СССР, Азербайджанская ССР. Ч. II: Полезные ископаемые. М.: Недра, 1976. Т. I LVII. С. 249–283.
7. Новрузов Н.А., Агаев С.А. Золотоносность и сереброносность колчеданных месторождений южного склона Большого Кавказа // Разведка и охрана недр. 2009. № 12. С. 18–24.
8. Новрузов Н.А. Геохимия стратиформных колчеданных месторождений восточного сегмента Большого Кавказа : автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Баку, 2011. 54 с.
9. Новрузов Н.А., Агаев С.А. Минералого-геохимическая зональность колчеданных залежей Восточного Кавказа на примере Филлизчайского месторождения // Изв. НАНА. Науки о Земле. 2012. № 1. С. 13–20.
10. Новрузов Н.А. Геохимия стратиформных колчеданных месторождений восточного сегмента Большого Кавказа. Баку: Nafta-Press, 2016. 300 с.
11. Новрузов Н.А., Самтар-Заде Н.А. Основные черты минералого-геохимических особенностей руд месторождения Филлизчай (Азербайджан) // Отечественная геология. 2019. № 2. С. 50–54.
12. Новрузов Н.А., Самтар-заде Н.А. Особенности химизма колчеданных руд Филлизчайского месторождения // Вестн. Бакинского ун-та. Серия естественных наук. 2015. № 1. С. 121–127.
13. Баба-заде В.М., Агаев С.А., Челаби Г.А. [и др.]. Свинец и цинк. Металлогеническая провинция Большого Кавказа // Минерально-сырьевые ресурсы Азербайджана. Баку: Озан, 2005. С. 294–340.
14. Твалчрелидзе А.Г. Геолого-геохимические условия образования колчеданных месторождений : автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М., 1983. 45 с.
15. Твалчрелидзе Г.А., Исмаилова Н.А. Минералогия руд Филлизчайского месторождения // Докл. АН СССР. 1964. Т. 154, № 4. С. 848–850.
16. Холодов В.Н., Кикнадзе З.Р. Колчеданные месторождения Большого Кавказа // Тр. ГИН. 1989. Вып. 149. 189 с.
17. URL: www.googleearth.com (дата обращения: 10.04.2022).
18. URL: www.leapfrog3d.com (дата обращения: 10.04.2022).
19. Еремин Н.И., Дергачев А.Л., Сергеева Н.Е. [и др.]. Типы колчеданных месторождений вулканической ассоциации // Геология рудных месторождений. 2000. Т. 42, № 2. С. 177–190.
20. Лапухов А.С. Зональность колчеданно-полиметаллических месторождений. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1975. 264 с.
21. Логинов В.П. Эндогенная зональность колчеданных месторождений. Зональность гидротермальных рудных месторождений. М.: Наука, 1974. Т. 2. С. 7–85.
22. Овчинников Л.Н., Лутков Р.И. Геохимические типы и зональность колчеданного оруденения Урала. М.: Наука, 1983. 183 с.
23. Самтар-заде Н.А. Особенности минералого-геохимической зональности рудной залежи Филлизчайского месторождения // Материалы республиканской конф. Баку, 2022. С. 66–69.

References

1. Agaev S.A., Velizade S.F., Novruzov N.A. Lead-zinc deposits of the southern slope of the Greater Caucasus. *Geology of Azerbaijan. Vol. 6: Minerals*. Baku: Nafta-Press; 2005:159-201. (In Russ.).
2. Baba-zade V.M., Agaev S.A. Features of the structural conditions of localization and morphology of the ore deposit of the Filizchay deposit. *Vestn. Bakinskogo un-ta. Seriya estestvennykh nauk = News of Baku University. Natural Sciences Series*. 1999;(1):91-108. (In Russ.).
3. Alizade A.A., ed. *Geology of Azerbaijan. Vol. 5: Minerals*. Baku: Nafta-Press; 2005. 574 p. (In Russ.).
4. *Pyrite deposits of the Greater Caucasus*. Moscow: Nedra Publ.; 1973. 256 p. (In Russ.).
5. Kurbanov N.K. *Conditions for the formation and patterns of placement of stratiform pyrite-polymetallic deposits of terrigenous eugeosynclines (on the example of the Alpine province of the Greater Caucasus)*. Dissertation Thesis. Moscow, 1986. 49 p. (In Russ.).
6. Kurbanov N.K., Zaitseva L.V., Gadzhiev T.G. Lead and zinc. *Geology of the USSR, Azerbaijan SSR. Part II: Minerals*. Moscow: Nedra Publ.; 1976;ILVII:249-283. (In Russ.).
7. Novruzov N.A., Agaev S.A. Gold and silver content of pyrite deposits of the southern slope of the Greater Caucasus. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2009;(12):18-24. (In Russ.).
8. Novruzov N.A. *Geochemistry of stratiform massive sulfide deposits in the Eastern segment of the Greater Caucasus*. Dissertation Thesis. Baku, 2011. 54 p. (In Russ.).
9. Novruzov N.A., Agaev S.A. Mineralogical and geochemical zoning of pyrite deposits of the Eastern Caucasus on the example of the Filizchay deposit. *Izv. NANA. Nauki o Zemle = Proceedings of NAS RA. Earth Science*. 2012;(1):13-20. (In Russ.).
10. Novruzov N.A. *Geochemistry of stratiform sulfide deposits in the Eastern segment of the Greater Caucasus*. Baku: Nafta-Press; 2016. 300 p. (In Russ.).
11. Novruzov N.A., Sattar-zadeh N.A. The main features of the mineralogical and geochemical features of the ores of the Filizchay deposit (Azerbaijan). *Otechestvennaya geologiya = Domestic Geology*. 2019;(2):50-54. (In Russ.).
12. Novruzov N.A., Sattar-zadeh N.A. Peculiarities of chemistry of sulfide ores of the Filizchay deposit. *Vestn. Bakinskogo un-ta. Seriya estestvennykh nauk = News of Baku University. Natural Sciences Series*. 2015;(1):121-127. (In Russ.).
13. Baba-zade V.M., Agaev S.A., Chelabi G.A. [et al.]. Lead and zinc. Metallogenic province of the Greater Caucasus. *Mineral resources of Azerbaijan*. Baku: Ozan Publ.; 2005:294-340. (In Russ.).
14. Tvalchrelidze A.G. *Geological and geochemical conditions for the formation of pyrite deposits*. Dissertation Thesis. Moscow, 1983. 45 p. (In Russ.).
15. Tvalchrelidze G.A., Ismailova N.A. Mineralogy of ores of the Filizchay deposit. *Dokl. AN SSSR*. 1964;154(4):848-850. (In Russ.).
16. Kholodov V.N., Kiknadze Z.R. Pyrite deposits of the Greater Caucasus. *Tr. GIN = Proceedings of the Geological Institute of the USSR Academy of Sciences*. 1989;(149). 189 p. (In Russ.).
17. Available from: www.googleearth.com [Accessed 10th April 2022]. (In Russ.).
18. Available from: www.leapfrog3d.com [Accessed 10th April 2022]. (In Russ.).
19. Eremin N.I., Dergachev A.L., Sergeeva N.E. [et al.]. Types of pyrite deposits of the volcanic association. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii = Geology of Ore Deposits*. 2000;42(2):177-190. (In Russ.).
20. Lapukhov A.S. *Zoning of pyrite-polymetallic deposits*. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch; 1975. 264 p. (In Russ.).
21. Loginov V.P. *Endogenous zoning of pyrite deposits. Zoning of hydrothermal ore deposits*. Moscow: Nauka Publ.; 1974;2:7-85. (In Russ.).
22. Ovchinnikov L.N., Lutkov R.I. *Geochemical types and zoning of pyrite mineralization in the Urals*. Moscow: Nauka Publ.; 1983. 183 p. (In Russ.).
23. Sattar-zade N.A. Peculiarities of mineralogical and geochemical zonality of the ore deposit of the Filizchay deposit. *Proceedings of the Republican Conference*. Baku, 2022:66-69. (In Russ.).

Информация об авторах

Н.А. Саттар-заде – докторант, кафедра полезных ископаемых, геологический факультет.

Н.А. Имамвердиев – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой общей и исторической геологии, геологический факультет.

Information about the authors

N.A. Sattar-zadeh - Doctoral Student, Department of Minerals, Geological Faculty.

N.A. Imamverdiyev - Doctor of Science (Geology and Mineralogy), Professor, Head of Department of General and Historical Geology, Geological Faculty.

Статья поступила в редакцию 11.07.2022; одобрена после рецензирования 01.09.2022; принята к публикации 15.11.2022. The article was submitted 11.07.2022; approved after reviewing 01.09.2022; accepted for publication 15.11.2022.

Научная статья

УДК 556.5, 546.74

doi: 10.18522/1026-2237-2022-4-2-77-89

ПОВЕДЕНИЕ МИГРАЦИОННЫХ ФОРМ НИКЕЛЯ В ВОДЕ ПО КОНТИНУУМУ «ЭСТУАРИЙ РЕКИ МИУС – ТАГАНРОГСКИЙ ЗАЛИВ АЗОВСКОГО МОРЯ»

Юрий Александрович Федоров¹, Дарья Федоровна Костенко^{2✉}, Ирина Владимировна Доценко³

^{1,2,3}Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹fedorov@sfedu.ru

²solodko@sfedu.ru✉

³dotsenko@sfedu.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования по изучению миграционных форм никеля (Ni) в воде по континууму «эстуарий реки Миус – Таганрогский залив Азовского моря». Применены стандартные методики, специализированное оборудование и математико-статистический анализ. Выявлено, что экспериментальные данные по содержанию растворенной формы никеля не превышают глобальных фоновых концентраций. По континууму наблюдалось превалирование взвешенной формы миграции никеля с доминирующими значениями в зоне р. Миус (54–71 % от валового содержания). Установлено симбатное поведение для всех миграционных форм Ni с общим снижением концентраций по профилю «р. Миус→Таганрогский залив». Проведен корреляционный анализ между содержаниями $Ni_{вал.}$, $Ni_{раств.}$, $Ni_{взв.}$, $Ni_{взв.}$ в % от $Ni_{вал.}$ и физико-химическими параметрами, а также различными формами железа. Уровень значимости $p \geq 0,05$ отмечен в паре S (%) и $Ni_{вал.}$, $Ni_{раств.}$, $Ni_{взв.}$, а умеренные прямые связи характерны для пар $Ni_{взв.}$ в % от $Ni_{вал.}$ – $Fe_{вал.}$, $Ni_{вал.}$ – $Fe_{взв.}$ в % от $Fe_{вал.}$ и $Ni_{взв.}$ в % от $Ni_{вал.}$ – $Fe_{взв.}$ в % от $Fe_{вал.}$. При субпараллельном снижении данных показателей зафиксирован вывод как никеля, так и железа в донные отложения.

Ключевые слова: река Миус, Таганрогский залив, Азовское море, тяжелые металлы, формы миграции никеля, эстуарий

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке программы стратегического академического лидерства ЮФУ «Приоритет-2030», проект № СП-12-22-5 (обобщение и анализ результатов), а также проекта РФФИ № 19-05-50097 (анализ роли ветровой активности).

Для цитирования: Федоров Ю.А., Костенко Д.Ф., Доценко И.В. Поведение миграционных форм никеля в воде по континууму «эстуарий реки Миус – Таганрогский залив Азовского моря» // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 4-2. С. 77–89.

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

Original article

BEHAVIOR OF NICKEL'S MIGRATION FORMS IN WATER ALONG THE CONTINUUM “THE MIUS RIVER'S ESTUARY - THE TAGANROG BAY OF THE AZOV SEA”

Yury A. Fedorov¹, Darya F. Kostenko^{2✉}, Irina V. Dotsenko³

^{1,2,3}Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹fedorov@sfedu.ru

²solodko@sfedu.ru✉

³dotsenko@sfedu.ru

© Федоров Ю.А., Костенко Д.Ф., Доценко И.В., 2022

Abstract. The study's results of nickel (Ni) migration forms in water along the continuum "the Mius River estuary - the Taganrog Bay of the Azov Sea" are presented. Standard methods, specialized equipment and mathematical and statistical analysis were applied. It is revealed that experimental data on the content of the nickel dissolved form do not exceed global background concentrations. The nickel suspended migration form with dominant values in the Mius River zone (54-71 % of the gross content) prevailed along the continuum. A symbiotic behavior was established for all Ni migration forms with a general decrease in concentrations along the profile of "the Mius River→the Taganrog Bay". A correlation analysis was carried out between the contents of $Ni_{gr.}$, $Ni_{dis.}$, $Ni_{susp.}$, $Ni_{susp.}$ in % of the total and physical and chemical parameters, as well as various forms of iron. The significance level of $p \geq 0.05$ was noted in the pair S (%) and $Ni_{gr.}$, $Ni_{dis.}$, $Ni_{susp.}$, and moderate direct connections are characteristic of the pairs $Ni_{susp.}$ in % of the total – $Fe_{gr.}$, $Ni_{gr.}$ – $Fe_{susp.}$ in % of $Fe_{gr.}$ and $Ni_{susp.}$ in % of the total – $Fe_{susp.}$ in % of $Fe_{gr.}$. With a sub-parallel decrease in these indicators, the withdrawal of both nickel and iron into the bottom sediments was recorded.

Keywords: the Mius River, the Taganrog Bay, the Azov Sea, heavy metals, nickel migration forms, estuary

Acknowledgments: this work was supported financially by the SFedU Strategic Academic Leadership Program "Priority-2030", project No. SP-12-22-5 (generalization and analysis of the results), and RFBR project No. 19-05-50097 (analysis of the role of wind activity).

For citation: Fedorov Yu.A., Kostenko D.F., Dotsenko I.V. Behavior of Nickel's Migration Forms in Water Along the Continuum "the Mius River's Estuary - the Taganrog Bay of the Azov Sea". *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(4-2):77-89. (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

Никель – элемент побочной подгруппы восьмой группы четвертого периода периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева с атомным номером 28. Обозначается символом Ni (лат. Niccolum). Элемент химически малоактивен, проявляет сидерофильные и халькофильные свойства. Факторы, определяющие временные и пространственные закономерности распределения Ni, подразделяются на химические, биологические, гидрологические, а также состав природных вод, почв и донных отложений. Миграционная способность Ni в воде сильно зависит от органических веществ, особенно гуминовых и фульвокислот, подконтрольных значениям pH. При отношении содержания фульвокислоты к содержанию этого металла < 2 и $pH = 8-9$ образуются нерастворимые соединения [1]. Сведения о содержании никеля в атмосферных осадках, подземных и поверхностных водах различных районов земного шара, а также в донных отложениях и почвах представлены в научных работах [1–6]. Анализ этих работ показывает, что особенности распределения никеля в различных средах и его состояние в природных водах изучены недостаточно полно, а проблема загрязнения им окружающей среды актуальна и имеет как глобальное, так и региональное значение. Динамика производства никеля в мире и Российской Федерации за последние годы представлена по данным [7–15] на рис. 1. Начиная с 1997 г. намечается общий мировой тренд увеличения производства никеля в мире, за исключением периода 2015–2017 гг. В России производство данного элемента имело стабильный положительный тренд.

В работе [4] приводится глобальное содержание никеля в атмосферных осадках – 0,1 мкг/дм³, а исследователи [1] пишут, что в отдаленных районах земного шара содержание никеля в гидрометеорах изменялось в диапазоне 0,02–5,0 мкг/дм³. В атмосферных осадках городов, в зависимости от их промышленной спецификации, содержание никеля достигает 3,0–100 мкг/дм³. По данным наших экспедиционных работ [16], содержание растворенного никеля в атмосферных осадках над устьевой областью реки Дон (в районе г. Ростова-на-Дону) изменялось в диапазоне 0,01–1,0 мкг/дм³ (в среднем – 0,25). Содержание никеля в пылевых выпадениях из атмосферы Ростовской области, принятое за природный региональный фон, изменялось в диапазоне 20,0–54,0 мкг/г с.м. (в среднем – 37,0). Он был несколько превышен в пыли г. Ростова-на-Дону и составлял в зимнее время 37,0–60,0 мкг/г с.м. (в среднем – 47,0) [17].

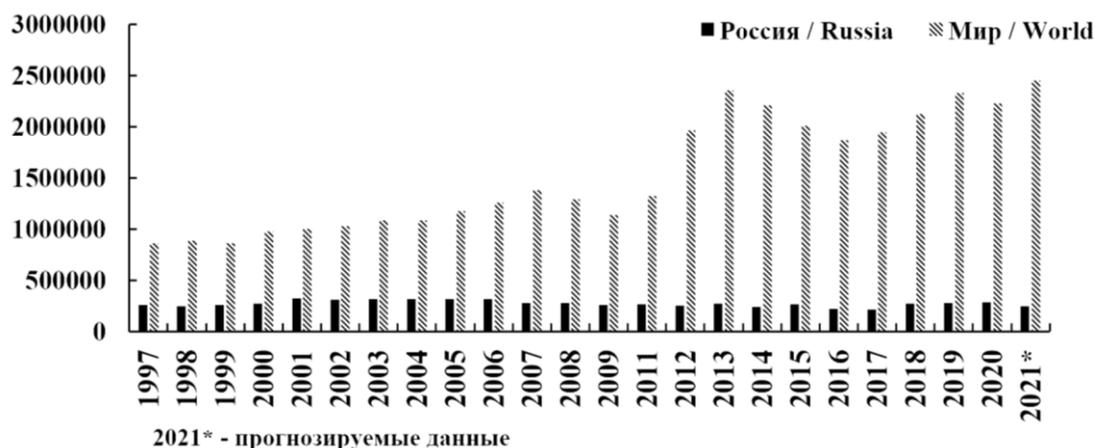


Рис. 1. Производство никеля в 1997–2021 гг., т (построено авторами по данным [7–15])
 / Fig. 1. Nickel production in 1997-2021, t (constructed by the authors according to the data [7-15])

Содержание никеля в донных отложениях Австралии, не затронутых промышленным загрязнением, варьировало в диапазоне 9,0–14,0 мг/г с.в. (в среднем – 8,0), по обобщенным глобальным оценкам – от 30,0 до 70,0 мг/г с.в., в глинах и сланцах – 47,0 мг/г с.в. [18] и в почвах – 50,0 мг/г с.в. [19]. По сведениям авторов [20–23], содержание никеля в древнеэвксинских и караганских отложениях, подстилающих современные осадки Азовского моря, изменялось в диапазоне 3,0–20,0 мг/г с.в. (в среднем – 13,0). В современных донных осадках Азовского моря и его частях валовое содержание никеля варьируется в широком диапазоне. Так, по результатам определений 2015 г. в Таганрогском заливе содержание никеля изменяется от 11,0 до 36,0 мг/г с.в. (в среднем – 26,4) [24]. По ежегодным средним данным 2000–2006 гг. содержание никеля в донных отложениях Азовского моря изменялось от 54,0 до 58,0 (в среднем – 55,0), а в Таганрогском заливе – от 52,0 до 57,0 мг/г с.в. (в среднем – 54,0) [20]. А.В. Михайленко и др. [22] сообщают о вариациях валового никеля в пробах донных отложений, отобранных в 2006 г., в диапазоне 10,0–85,0 мг/г с.в. (в среднем – 46,0). Е.Ф. Шнюков и др. [23] также отмечали, что содержание никеля в новоазовских осадках варьировало в широких пределах 6,0–50,0 мг/г с.в. (в среднем – 30,0). Таким образом, содержание элемента в современных новоазовских осадках оказалось выше, чем в коренных породах ложа. Оно также оказалось выше природных глобальных концентраций и значений низкого диапазона воздействия в донных осадках (21,0 мг/г с.в.) [25]. Не исключено, что причиной является пыль, поступающая в каскадную систему из урбанизированных и промышленных районов Ростовской области (РФ) и Украины.

В настоящее время в научных кругах и СМИ идет дискуссия относительно целесообразности эксплуатации Еланского и Ёлкинского медно-никелевых месторождений в Новохопёрском районе Воронежской области. Поскольку, как считает К.Е. Питьева [26], грунтовые и поверхностные воды Новохопёрского района принимают участие в формировании стока среднего течения р. Дон и, следовательно, могут оказать влияние на уровень содержания никеля в главной артерии бассейна Азовского моря. По результатам исследования 2007 г. ФГБУ «Воронежский областной центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» не было обнаружено данных об уровнях содержания никеля в водах рек Дон, Хопёр, Чёрная Калитва, Тихая Сосна, Битюг. В то же время было установлено превышение содержания ПДК растворенной формы миграции никеля в воде Воронежского водохранилища в 3–4 раза (т.е. содержание элемента составляло ориентировочно 30,0–40,0 мг/дм³).

Отметим, что в настоящей статье не планируется рассмотрение социально-экологического вопроса. Сообщение будет посвящено только изучению гидрохимии никеля в морских и речных объектах бассейна по континууму «эстуарий р. Миус – Таганрогский залив Азовского моря».

Объекты, материалы и методы исследования

Водная система «река Миус – Миусский лиман – Таганрогский залив» расположена в пределах правобережной части Причерноморской низменности, выделяемой в качестве самостоятельного геоморфологического района – Приазовской равнины [27]. Река Миус – это трансграничный водоток, протекающий по территории Украины (верхняя часть среднего течения) и России. Русло р. Миус представляет собой каскадную систему с небольшими водохранилищами и искусственными рыбопродуктивными прудами. Река в пределах РФ неглубоко врезана в берега с луговой растительностью и кустарником. Русло реки извилистое, шириной 15–25 м (в низовье – до 45 м). Глубина русла на плёсах – до 6 м, на перекатах – до 0,5 м. Уклон реки 1,1 м/км, обуславливающий ее медленное течение. Воды реки Миус поступают в Миусский лиман, где происходит трансформация речных вод с последующим смешением с водами Таганрогского залива. Миусский лиман в настоящее время зарегулирован, и в связи с этим его можно отнести к искусственному водоему. Во время отбора проб наблюдалась ветровая активность. Дул умеренный ветер, сила по шкале Бофорта составила 4 балла (5,5–7,9 м/с) [28, 29]. В период наблюдений в августе 2020 г. отбор проб воды производился на 9 станциях в трехкратной повторности в реке Миус, Миусском лимане и Таганрогском заливе (табл. 1, рис. 2) с целью определения концентраций никеля в нефильтрованных (валовое содержание) и фильтрованных (растворенная форма миграции) пробах. Кроме этого, были отобраны питающие Миусский лиман грунтовые воды (глубина от поверхности земли до уровня воды – 11 м). В пробах воды, наряду с содержанием никеля, определены температура, значения pH и минерализация.



Рис. 2. Карта-схема района исследования реки Миус, Миусского лимана (Миусское водохранилище) и Таганрогского залива [29] / Fig. 2. Schematic map of the Mius River, the Miussky Liman (the Mius Reservoir) and the Taganrog Bay [29]

Таблица 1 / Table 1

Содержание различных форм Ni в воде по континuumу «река Миус – Миусский лиман – Таганрогский залив» / The content of various forms of Ni in the water of the mixing zone «Mius river – Mius estuary – Taganrog Bay»

| Водный объект | Местоположение станций отбора проб | Координаты, с.ш./в.д. | T, °C / pH | Минерализация, г/дм ³ / солёность, ‰ | Ni _{вал.} , мкг/дм ³ | Ni _{раств.} , мкг/дм ³ | Ni _{взв.} , мкг/дм ³ | Ni _{взв.} в % от Ni _{вал.} | Расчетное удельное содержание Ni взв., мкг/г сух. массы |
|--|--|--|---------------------|---|--|--|--|--|---|
| Река Миус, ширина русла 25–30 м | Станция 1, село Покровское, в 30 м от моста, левый берег, в 3,5 м от берега, глубина – 0,5 м | <u>47°24.921'</u> <u>38°53.385'</u> | <u>18</u> 8,16 | 2,364 | <u>3,4/4,0/5,0</u> 4,1 (3) | <u>1,4/1,7/2,0</u> 1,7(3) | <u>2,0/2,3/3,0</u> 2,4 (3) | <u>58/57/60</u> 58 | 46,4 |
| | Станция 2, село Николаевка, левый берег, в 2,5 м от берега, глубина 0,6 м | <u>38°51.178'</u> <u>38°51.178'</u> | <u>22</u> 8,26 | 2,200 | <u>4,4/4,6/4,7</u> 4,6 (3) | <u>1,2/1,1/1,5</u> 1,3 (3) | <u>3,2/3,5/3,2</u> 3,3(3) | <u>72/76/68</u> 71 | 63,8 |
| Миусский лиман, верхний бьеф Миусского водохранилища, выше плотины | Станция 3, село Золотарево, в 20 м от берега, глубина 0,6 м | <u>47°16.359'</u> <u>38°47.423'</u> | <u>22</u> 8,56 | 3,43 | <u>3,0/3,2/3,6</u> 3,3 (3) | <u>1,0/0,9/1,3</u> 1,1 (3) | <u>2,0/2,3/2,3</u> 2,2 (3) | <u>66/71/63</u> 66 | 42,6 |
| | Станция 4, хутор Калинин, спуск по ул. Набережная, в 20 м от берега, глубина 0,6 м | <u>47°15.627'</u> <u>38°39.002'</u> | <u>25</u> 8,57 | 3,65 | <u>2,8/3,0/3,5</u> 3,1(3) | <u>1,4/1,2/1,4</u> 1,3(3) | <u>1,4/1,8/2,1</u> 2,2 (3) | <u>50/60/60</u> 70 | 42,6 |
| | Станция 5, хутор Ломакин, в 15 м от берега, глубина 0,6 м | <u>47°11.924'</u> <u>38°30.985'</u> | <u>23</u> 8,67 | 4,23 | <u>1,6/1,4/1,9</u> 1,6 (3) | <u>0,7/0,9/1,2</u> 0,9 (3) | <u>0,5/0,7/0,9</u> 0,7 (3) | <u>31/50/47</u> 43 | 13,5 |
| Миусский лиман, нижний бьеф Миусского водохранилища, ниже плотины | Станция 6, село Натальевка, в 25 м от берега, глубина 0,6 м | <u>47°09.555'</u> <u>38°27.929'</u> | <u>22,5</u> 8,33 | 9,48 | <u>1,2/1,3/1,5</u> 1,3 (3) | <u>0,6/0,8/0,9</u> 0,8 (3) | <u>0,6/0,5/0,6</u> 0,5 (3) | <u>50/38/40</u> 38 | 9,7 |
| Таганрогский залив | Станция 7, база отдыха «Рожок», в 20 м от берега, глубина 0,6 м | <u>47°08.770'</u> <u>38°25.549'</u> | <u>22</u> 8,43 | 8,66 | <u>2,2/2,6/2,3</u> 2,4 (3) | <u>1,0/1,2/1,1</u> 1,1 (3) | <u>1,2/1,4/1,2</u> 1,3 (3) | <u>54/53/52</u> 54 | 25,1 |
| | Станция 8, в 100 м от станции 7, в 25 м от берега, глубина 0,6 м | <u>47°08.701'</u> <u>38°25.456'</u> | <u>22</u> 8,40 | 8,66 | <u>1,9/2,3/2,0</u> 2,1 (3) | <u>0,7/0,8/1,0</u> 0,8 (3) | <u>1,1/1,3/1,3</u> 1,2 (3) | <u>57/56/65</u> 57 | 23,2 |
| Грунтовые воды (техническая вода, солоноватая) | Станция 9, общественный колодец, пос. Грузиновка, ул. Набережная, глубина до поверхности воды 11 м | <u>47°16.171'</u> <u>38°42.756'</u> | <u>8</u> 7,68 | 2,690 | <u>1,7/1,5/1,8</u> 1,7 (3) | <u>1,4/1,1/1,6</u> 1,4 (3) | <u>0,3/0,4/0,2</u> 0,3 (3) | <u>17/26/11</u> 17 | 5,8 |

Отбор, транспортировка, хранение проб и последующее определение в них перечисленных показателей проведены по общепринятым в системе Росгидромета стандартным методикам [30–32]. Значения pH и температуры измерены портативным иономером «Экотест-2000» сразу после отбора проб. Фильтрация проб воды через предварительно очищенные и взвешенные мембранные фильтры «Владипор» типа МФАС-ВА с размером пор 0,45 мкм (450 нм) проведено с помощью портативной фильтровальной установки также сразу же после отбора проб. После чего фильтрат, а также нефильтрованные пробы подкисляли концентрированной азотной кислотой до $\text{pH} < 2$. Количественное определение в пробах валовой (в нефильтованной пробе) и растворенной формы никеля (в фильтрованной пробе) выполнено в Гидрохимическом институте Росгидромета методом атомно-абсорбционного анализа с прямой электротермической атомизацией проб по методике [30]. Погрешность определения никеля в пробах воды не превышала 10–15 %. По разности содержаний валовой и растворенной формы никеля рассчитано содержание элемента во взвеси (объемная концентрация). Под растворенной формой миграции понимается сумма истинно растворенного никеля и находящегося в воде в коллоидном состоянии. Под взвешенной формой миграции никеля подразумевается её содержание во взвешенных органических и минеральных частицах размером более 0,45 мкм. Взвешенная форма миграции никеля может быть выражена в мкг/дм^3 или мкг/г с.м. (удельная концентрация). Методика расчета приведена в работе [22]. Это необходимо для сравнения содержания никеля во взвеси с его валовым содержанием в почвах и породах ложа.

При помощи программы Microsoft Excel были произведены математико-статистические расчеты данных, а именно коэффициента корреляции Пирсона с последующим построением корреляционной матрицы между физико-химическими параметрами и содержанием различных форм рассматриваемых элементов.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим распределение и поведение содержания форм миграции никеля по профилю «эстуарий р. Миус – Таганрогский залив» (рис. 3).

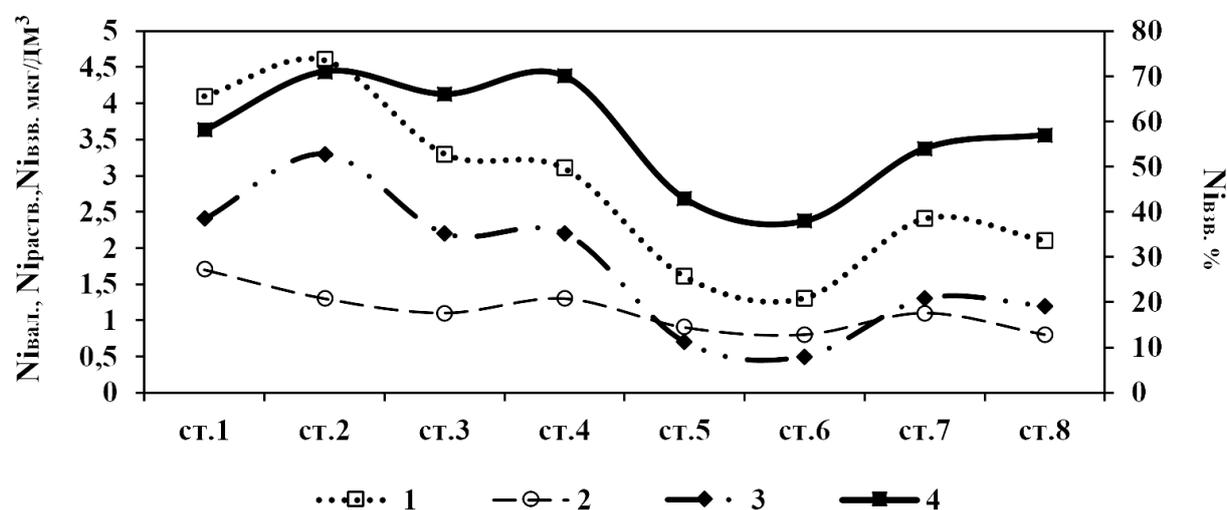


Рис. 3. Распределение средних концентраций миграционных форм никеля и процентного содержания его взвешенной формы в воде системы «река Миус – Миусский лиман – Таганрогский залив»: 1 – валовая концентрация никеля; 2 – концентрация растворенной формы никеля; 3 – концентрация взвешенной формы никеля; 4 – доля взвешенной формы никеля, % от его валового содержания / Fig. 3. Distribution of average concentrations of nickel migration forms and the suspended form percentage in the river system's water "the Mius River - the Miussky Liman - the Taganrog Bay": 1 - the gross nickel concentration; 2 - the nickel dissolved form concentration; 3 - the nickel suspended form concentration; 4 - the proportion of the nickel suspended form, % of its gross content

На станции 1 концентрации валового никеля ($Ni_{вал.}$) и растворенной формы никеля ($Ni_{раств.}$) изменялись в диапазоне от 3,4 до 5,0 (в среднем – 4,1 мкг/дм³) и от 1,4 до 2,0 мкг/дм³ (в среднем – 1,7 мкг/дм³). На станции 2 средние концентрации $Ni_{вал.}$ увеличились на 0,5 мкг/дм³ (4,6 мкг/дм³), и диапазон варьировался от 4,4 до 4,7 мкг/дм³, а средние значения $Ni_{раств.}$ уменьшились на 0,4 мкг/дм³ (концентрации изменялись от 1,2 до 1,5 мкг/дм³). Продвигаясь далее по континууму, в верхнем бьефе Миусского лимана (от ст. 3 до ст. 5) концентрации $Ni_{вал.}$ и $Ni_{раств.}$ в целом уменьшались и варьировались в пределах от 1,6 до 3,6 (в среднем – 2,6 мкг/дм³) и от 0,7 до 1,4 мкг/дм³ (в среднем – 1,1 мкг/дм³). В нижнем бьефе Миусского лимана наблюдается также уменьшение концентраций: $Ni_{вал.}$ изменяется в диапазоне от 1,2 до 1,5 мкг/дм³ (в среднем – 1,3 мкг/дм³), а $Ni_{раств.}$ – от 0,6 до 0,9 мкг/дм³ (в среднем – 0,8 мкг/дм³). В водах Таганрогского залива концентрации $Ni_{вал.}$ изменялись от 1,9 до 2,3 мкг/дм³ (в среднем – 2,25 мкг/дм³), а $Ni_{раств.}$ – от 0,7 до 1,1 мкг/дм³ (в среднем – 0,95 мкг/дм³). Полученные экспериментальные данные продемонстрировали, что по сравнению с работами [1, 2, 4] содержание растворенной формы никеля не превышает диапазон глобальных концентраций. Содержание растворенного Ni (Ni^{2+} , $NiSO_4$) в морских водах составляет 2,0 мкг/дм³, по данным [2]. В незагрязненных водах суши и морских водах [1] содержание растворенного никеля было в диапазоне 1,0–3,0 и 1,8 мкг/дм³. По [4] диапазон глобальных концентраций никеля в растворенной форме изменялся от 2,0 до 3,0 мкг/дм³.

В реке Миус количество $Ni_{взв.}$ изменялось от 2,0 до 3,2 мкг/дм³ (в среднем – 2,85 мкг/дм³), в Миусском лимане – от 0,5 до 2,3 (в среднем – 1,4 мкг/дм³) и в Таганрогском заливе – от 1,1 до 1,3 мкг/дм³ (в среднем – 1,25 мкг/дм³). Процентное содержание взвешенной формы никеля от валового содержания в реке Миус изменялось от 57 до 72 % (в среднем – 64,5 %), в Миусском лимане – от 31 до 71 % (в среднем – 54,3 %) и в Таганрогском заливе – от 52 до 57 % (в среднем – 55,5 %). В мировом речном стоке доля взвешенных форм никеля составляет 40–95 % [33], по данным [1], со взвешенными речными частицами может переноситься от 5–30 до 97–98 % Ni от валового содержания. Объемное содержание взвешенного никеля в водах озера Онтарио варьировалось в диапазоне 0,034–0,18 мкг/дм³, составляя до 40 % его валового содержания в воде водоема [34]. В эстуарии р. Миссисипи с твердыми частицами было связано до 95 % Ni. При этом оно снижалось при разбавлении прибрежных вод морскими по мере роста глубины [35].

Отмечено, что основная масса никеля мигрирует в грунтовых водах в растворенной форме, а концентрации всех форм Ni не превышают значений, зафиксированных в поверхностных водах эстуария реки Миус и Таганрогского залива.

Экспериментальные данные свидетельствуют о преимущественной миграции никеля в воде каскадной системы «эстуарий р. Миус – Таганрогский залив» во взвешенной форме с её доминированием в водах собственно р. Миус. Обращает внимание симбатное поведение всех форм миграции никеля, а также его валового содержания и процентного содержания $Ni_{взв.}$ от $Ni_{вал.}$ по исследуемому профилю (рис. 2), которое проявляется в их снижении в направлении р. Миус → Таганрогский залив. Это явление подтверждается высокой или заметной прямой тесной корреляцией для различных пар $Ni_{вал.}$ – $Ni_{раств.}$, $Ni_{вал.}$ – $Ni_{взв.}$, $Ni_{раств.}$ – $Ni_{взв.}$ в % от $Ni_{вал.}$ (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Матрица парного корреляционного анализа между физико-химическими показателями и содержанием различных форм миграции никеля / Matrix of paired correlation analysis between physical and chemical indicators and the various nickel migration forms content

| Параметр | S, % | pH | T, °C | $Ni_{вал.}$, мкг/дм ³ | $Ni_{раств.}$, мкг/дм ³ | $Ni_{взв.}$, мкг/дм ³ | $Ni_{взв.}$ в % от $Ni_{вал.}$ |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| S, % | 1,0 | 0,19 | 0,18 | –0,78 | –0,72 | –0,77 | –0,62 |
| pH | 0,19 | 1,0 | 0,7 | –0,47 | –0,48 | –0,37 | –0,08 |
| T, °C | 0,18 | 0,7 | 1,0 | –0,39 | –0,52 | –0,22 | 0,07 |
| $Ni_{вал.}$, мкг/дм ³ | –0,78 | –0,47 | –0,39 | 1,0 | 0,8 | 0,9 | 0,8 |
| $Ni_{раств.}$, мкг/дм ³ | –0,72 | –0,48 | –0,52 | 0,8 | 1,0 | 0,7 | 0,6 |
| $Ni_{взв.}$, мкг/дм ³ | –0,77 | –0,37 | –0,22 | 0,9 | 0,7 | 1,0 | 0,9 |
| $Ni_{взв.}$ в % от $Ni_{вал.}$ | –0,62 | –0,08 | 0,07 | 0,8 | 0,6 | 0,9 | 1,0 |

На примере данных [36] показано, что в эстуарных водах можно ожидать потери $Ni_{\text{раств.}}$ при переходе от речных вод к морским до 30–40 %. В.В. Гордеев [37] на основании анализа данных по потерям $Ni_{\text{раств.}}$ продемонстрировал на примере нескольких эстуариев, что в редких случаях его потери достигают 12–15 %. По нашим расчетам, по континууму «река Миус – Таганрогский залив» происходит потеря до 56 % $Ni_{\text{взв.}}$ и 29,6 % $Ni_{\text{раств.}}$

Рассмотрим результаты регрессионного анализа зависимостей между содержанием $Ni_{\text{вал.}}$, $Ni_{\text{раств.}}$, $Ni_{\text{взв.}}$, $Ni_{\text{взв.}}$ в % от $Ni_{\text{вал.}}$ и физико-химическими параметрами воды. Высокие обратные связи характерны для солёности S , ‰, с $Ni_{\text{вал.}}$, $Ni_{\text{раств.}}$ и $Ni_{\text{взв.}}$ ($p \geq 0,05$), умеренные и слабые обратные связи для pH и T , °C ($r = -0,47$; $-0,48$ и $-0,37$ и $r = -0,39$; $-0,52$ и $-0,22$ при этом $p < 0,05$). Обратный характер регрессионной модели имеет место для пар $Ni_{\text{взв.}}$ в % от $Ni_{\text{вал.}}$ – S и с pH (слабая связь, $r = -0,08$, $p < 0,05$), слабая прямая положительная связь характерна для T , °C ($r = 0,07$, $p < 0,05$).

Авторами [36] было высказано мнение, что ассоциация никеля с оксидами железа и марганца играет важную роль в его переносе в водных экосистемах. С целью проверки данной гипотезы нами предпринята попытка изучить в природных условиях тесноту связи содержания различных форм железа с содержанием никеля (табл. 3). Для чего из работы [28] были взяты данные по концентрациям $Fe_{\text{вал.}}$, $Fe_{\text{общ.раств.}}$ и $Fe_{\text{взв.}}$ и $Fe_{\text{взв.}}$ в % от $Fe_{\text{вал.}}$ в водах каскадной системы. Были рассчитаны регрессионные зависимости между ними и соответствующими миграционными формами никеля и его валового содержания. В целом по профилю для этих пар выявлена слабая обратная корреляционная связь ($r < 0,1$, $p < 0,05$). Умеренная прямая положительная связь характерна для пар $Ni_{\text{взв.}}$ в % от $Ni_{\text{вал.}}$ – $Fe_{\text{вал.}}$, $Ni_{\text{вал.}}$ – $Fe_{\text{взв.}}$ в % от $Fe_{\text{вал.}}$ и $Ni_{\text{взв.}}$ в % от $Ni_{\text{вал.}}$ – $Fe_{\text{взв.}}$ в % от $Fe_{\text{вал.}}$ (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

Матрица парного корреляционного анализа между содержанием различных форм железа и никеля
/ **Matrix of paired correlation analysis between the content of various iron and nickel forms**

| Параметр | $Fe_{\text{вал.}}$, мкг/дм ³ | $Ni_{\text{вал.}}$, мкг/дм ³ | $Fe_{\text{общ.раств.}}$, мкг/дм ³ | $Ni_{\text{раств.}}$, мкг/дм ³ | $Fe_{\text{взв.}}$, мкг/дм ³ | $Ni_{\text{взв.}}$, мкг/дм ³ | $Fe_{\text{взв.}}$, % от $Fe_{\text{вал.}}$ | $Ni_{\text{взв.}}$, % от $Ni_{\text{вал.}}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Fe_{\text{вал.}}$, мкг/дм ³ | 1,0 | -0,1 | – | -0,04 | – | -0,01 | – | 0,3 |
| $Ni_{\text{вал.}}$, мкг/дм ³ | -0,1 | 1,0 | -0,3 | – | -0,08 | – | 0,5 | – |
| $Fe_{\text{общ.раств.}}$, мкг/дм ³ | – | -0,3 | 1,0 | -0,1 | – | -0,2 | – | 0,02 |
| $Ni_{\text{раств.}}$, мкг/дм ³ | -0,04 | – | -0,1 | 1,0 | -0,02 | – | 0,5 | – |
| $Fe_{\text{взв.}}$, мкг/дм ³ | – | -0,08 | – | -0,02 | 1,0 | 0,02 | – | 0,3 |
| $Ni_{\text{взв.}}$, мкг/дм ³ | -0,01 | – | -0,2 | – | 0,02 | 1,0 | 0,5 | – |
| $Fe_{\text{взв.}}$, % от $Fe_{\text{вал.}}$ | – | 0,5 | – | 0,5 | – | 0,5 | 1,0 | 0,4 |
| $Ni_{\text{взв.}}$, % от $Ni_{\text{вал.}}$ | 0,3 | – | 0,02 | – | 0,3 | – | 0,4 | 1,0 |

По формуле из работ [22, 38] было рассчитано содержание взвеси для Миусского лимана и произведен перерасчет на удельную концентрацию с учетом ветровой активности, которая была во время проведения экспедиции. Установлено, что содержание никеля во взвеси изменяется от 9,7 до 63,8 мкг/г с.м. (в среднем – 30 мкг/г с.м.). Полученные расчетные данные оказались сопоставимыми со средними содержаниями никеля в земной коре – 58 мг/кг [39].

Несмотря на более высокое содержание никеля в современных донных осадках Азовского моря по отношению к древнеэвксинским и караганским отложениям, содержание никеля в растворенной форме миграции в поверхностных водах региона не превышает ПДК_{р.х.}. В атмосфер-

ных осадках региона содержание растворенного никеля также ниже его природных глобальных распределений [16]. Не исключено, что этот феномен обусловлен, как показано в [37, 40] и представлено в нашей работе, относительно слабой десорбцией никеля при смешении речной и морской воды. Нужно также иметь в виду, что содержание никеля в растворенной форме складывается из суммы коллоидной и истинно растворенной формы миграции этого элемента. Если принять размер коллоидных частиц как высокодисперсной (ультрадисперсной) системы равный 1–100 нм, или по другим представлениям – 1–500 нм [41], то мы вправе называть прошедшие через фильтр «Владипор» наночастицами. Обладая большей сорбционной поверхностью, нежели задерживаемые фильтром взвешенные макрочастицы, они могут оказывать большое влияние на вариации содержания элемента в растворенной форме миграции. Привнос в экосистему миусского эстуария эолового материала и взмучивание донных отложений во время ветровой активности будут способствовать, как описано на примере Азовского моря в работах [21, 42], повышению содержания никеля и других ТМ в растворенной форме. По сведениям [42], в Таганрогском заливе и открытой части Азовского моря в поверхностном и придонном горизонтах его содержание возросло в среднем на 0,15 мкг/дм³, что составило, по нашим расчетам, в среднем 12 %. Авторы этих работ считали, что подобное явление связано преимущественно с десорбцией металла из поступившего в акваторию эолового материала [42] и ресуспендированного *in situ* из донных отложений [21]. Нет сомнений, что подобный процесс имеет место быть. Однако мы впервые отмечаем, что возрастание содержания никеля и других ТМ в растворенной форме может произойти вследствие увеличения в ней количества наночастиц (коллоидов) за счет более интенсивного истирания грубообломочных частиц во время повышенной ветровой активности. В свою очередь, это наряду с десорбцией ТМ из взвесей должно приводить к росту содержания ТМ в растворенной форме миграции.

Другой причиной может быть то, что содержание растворенного в воде никеля контролируется в основном содержанием железа и марганца, с которыми он имеет склонность к активному осаждению со взвешенными веществами и накоплением в донных отложениях. Как показано выше, это не подтверждается наличием какой-либо значимой корреляции в дугах содержаний железа и никеля. В то же время обращает на себя внимание существование умеренных прямых связей для пар $Ni_{взв.} \text{ в \% от } Ni_{вал.} - Fe_{вал.}$, $Ni_{вал.} - Fe_{взв.} \text{ в \% от } Fe_{вал.}$ и $Ni_{взв.} \text{ в \% от } Ni_{вал.} - Fe_{взв.} \text{ в \% от } Fe_{вал.}$. То есть наблюдается субпараллельное снижение процентного содержания взвешенной формы как никеля, так и железа от их валового содержания в направлении «река Миус – Таганрогский залив Азовского моря». Таким образом, вследствие процесса биогеохимической трансформации и механической седиментации взвешенных веществ в лимане как комплексном барьере наблюдается вывод в донные отложения как железа, так и никеля. Картина тесной связи этих элементов может затушевываться ветровой активностью, приводящей к ресуспендированию взвешенных частиц из донных отложений при их взмучивании.

Заключение

Изучение графика по производству никеля демонстрирует, что с 1997 г. намечается общий мировой тренд по увеличению производства данного элемента, за исключением периода 2015–2017 гг., для Российской Федерации характерен стабильный положительный тренд.

Установлено распределение валовой, растворенной и взвешенной форм никеля по континууму «река Миус – Миусский лиман – Таганрогский залив». Процентное содержание $Ni_{взв.}$ от валового содержания в воде носило переменный характер с увеличением в зоне смешения «река Миус – Миусский лиман» и в Таганрогском заливе.

Взвешенная форма миграции никеля преобладает над растворенной формой по всему профилю (от 54 до 71 % от валового содержания), тогда как на станциях 5 и 6 – ситуация обратная (38 и 43 % от валового содержания). Содержание растворенной формы никеля не превышает диапазон глобальных концентраций.

Для исследуемых объектов характерна высокая и умеренная обратная корреляция между содержаниями $Ni_{вал.}$, $Ni_{раств.}$, $Ni_{взв.}$ и показателями рН, солености и температуры. Были рассчитаны регрессионные зависимости между миграционными формами железа и никеля. В целом по профилю для этих пар выявлена слабая обратная корреляционная связь ($p < 0,05$). Умеренная прямая

положительная связь характерна для пар $Ni_{взв.} / Fe_{вал.}$, $Ni_{вал.} / Fe_{взв.}$, $Ni_{взв.} / Ni_{вал.}$, $Fe_{вал.} / Fe_{взв.}$, $Fe_{взв.} / Fe_{вал.}$.

В грунтовых водах отмечается превалирование растворенной формы миграции никеля над взвешенной, тогда как концентрации всех форм Ni не превышают значений, зафиксированных в поверхностных водах эстуария реки Миус и Таганрогского залива.

Список источников

1. Мур Дж., Раммурти С. Тяжелые металлы в природных водах. М.: Мир, 1987. 286 с.
2. Goldberg E.D. Minor Elements in Sea water // Chemical Oceanography / eds. J.P. Riley, G. Skirrow. London: Academic Press, 1965. Ch. 5. P. 163–196.
3. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 268 с.
4. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999. 762 с.
5. Роева Н.Н., Ровинский Ф.Я., Кононов Э.Я. Специфические особенности поведения тяжелых металлов в различных природных средах // Журн. аналит. химии. 1996. Т. 51, № 4. С. 384–397.
6. Страхов Н.М. Проблемы геохимии современного океанского литогенеза. М.: Наука, 1976. 299 с.
7. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. U.S. Geological Survey. 1998. 198 p.
8. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. U.S. Geological Survey. 2000. 198 p.
9. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. U.S. Geological Survey. 2002. 197 p.
10. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. U.S. Geological Survey. 2007. 195 p.
11. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. U.S. Geological Survey. 2014. 196 p.
12. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. U.S. Geological Survey. 2017. 202 p.
13. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. U.S. Geological Survey. 2019. 200 p.
14. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. U.S. Geological Survey. 2021. 200 p.
15. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. U.S. Geological Survey. 2022. 202 p.
16. Fedorov Y.A., Solodko D.F., Chepurnaya V.I., Dotsenko I.V., Talpa B.V., Levchenko S.V., Popov Y.V., Dmitrik L.Y. Physical and chemical properties, elemental and material snow composition in Rostov-on-Don // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 265. P. 02003.
17. Приваленко В.В., Безуглова О.С. Экологические проблемы антропогенных ландшафтов Ростовской области // Экология города Ростова-на-Дону. Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2003. Т. 1. 290 с.
18. Григорьев Н.А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия. 2004. № 7. С. 785–792.
19. Bowen H.J. M. Environmental Chemistry of the Elements. London; New York: Academic Press, 1979. 333 p.
20. Кленкин А.А., Корпакова И.Г., Павленко Л.Ф., Тимердашев З.А. Экосистема Азовского моря: антропогенное загрязнение. Краснодар: АзНИИРХ, 2007. 324 с.
21. Федоров Ю.А., Доценко И.В., Михайленко А.В. Поведение тяжелых металлов в воде Азовского моря во время ветровой активности // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2015. № 3. С. 108–112.
22. Михайленко А.В., Федоров Ю.А., Доценко И.В. Тяжелые металлы в компонентах ландшафтов Азовского моря. Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2018. 214 с.
23. Шнюков Е.Ф., Белодед Р.М., Цемко В.П. Полезные ископаемые Мирового океана. Киев: Наукова думка, 1974. 207 с.
24. Хорошевская В.О. Распределение ванадия, никеля и молибдена в донных отложениях Таганрогского залива // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2015. № 3. С. 113–118.
25. Long E.R., Macdonald D.D., Smith S.L., Calder F.D. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments // Environ. Manage. 1995. Vol. 19 (1). P. 81–97.
26. Питьева К.Е. Гидрогеология района: ожидаемые последствия планируемых разработок Еланского и Елkinsкого медно-никелевых месторождений в Воронежской области // Комплексная экспертная оценка целесообразности и возможных последствий планируемых разработок медно-никелевых месторождений в Воронежской области. М.: Обществ. палата РФ, 2012. С. 52–71.
27. Безуглова О.С., Приваленко В.В., Остробородько Н.П. Биогеохимическая характеристика почв побережья Таганрогского залива // Экосистемные исследования Азовского моря и побережья. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. Т. IV. С. 12–28.
28. Фёдоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Дмитрик Л.Ю., Доценко И.В., Чепурная В.И., Трубник Р.Г. Геохимия железа в системе река Миус – Миусский лиман – Таганрогский залив Азовского моря // Астрахан. вестн. экол. образования. 2020. № 5 (59). С. 172–181.
29. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Чепурная В.И., Доценко И.В., Костенко Д.Ф. Кадмий в воде по континууму «эстуарий р. Миус – Таганрогский залив Азовского моря» // Географ. вестн. 2021. № 3(58). С. 115–129.

30. РД 52.24.377-2008. Массовая концентрация алюминия, бериллия, ванадия, железа, кадмия, кобальта, марганца, меди, молибдена, никеля, свинца, серебра, хрома и цинка в водах. Методика выполнения измерений методом атомной абсорбции с прямой электротермической атомизацией проб. Ростов н/Д.: Гидрохим. ин-т, 2008. 34 с.

31. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Ростов н/Д.: Гидрохим. ин-т, 2009. 21 с.

32. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : приложение к приказу Минсельхоза России от 13.12.2016 г. № 552 (с изменениями на 10.03.2020 г.).

33. Гаранжа А.П., Коновалов Г.С. Коллоидная форма миграции микроэлементов в речных водах // Гидрохим. материалы. 1979. Т. 75. С. 22–26.

34. Leland H.V. Distribution of solute and particulate trace elements in southern Lake Michigan // Proceedings of 1st Int. Conf. on Heavy Metals in the Environment. Toronto, Canada: Toronto Institute for Environmental Studies, 1975. Vol. II. P. 709–730.

35. Nriagu J.O., Wong H.K.T., Coker R.D. Particulate and dissolved trace metals in Lake Ontario // Water Research. 1981. Vol. 15. P. 91–96.

36. Sholkovitz E.R., Copland D. The chemistry of suspended matter in Esthwaite Water, a biologically productive lake with seasonally anoxic hypolimnion // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1982. Vol. 46 (3). P. 393–409.

37. Гордеев В.В. Геохимия системы река – море. М.: Матушкина И.И., 2012. 452 с.

38. Федоров Ю.А., Костенко Д.Ф., Доценко И.В., Чепурная В.И. Особенности распределения содержания миграционных форм меди в воде по разрезу «эстуарий реки Миус – Таганрогский залив Азовского моря» // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Серия: География. Геоэкология. 2022. № 1. С. 36–49.

39. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. Вып. 7. С. 555–571.

40. Turner J. C., Meyer D. K., Cox K. E., Logan C., DiCintio M., Thomas C. Creating contexts for involvement in mathematics // J. of Educational Psychology. 1998. Vol. 90. P. 730–745.

41. Зимон А.Д. Коллоидная химия (в том числе и наночастиц). М.: Агар, 2007. 344 с.

42. Хрусталева Ю.П. Основные проблемы геохимии седиментогенеза в Азовском море. Апатиты: КНЦ РАН, 1999. 247 с.

References

1. Moore J., Ramamurti S. *Heavy metals in natural waters*. Moscow: Mir Publ.; 1987. 286 p. (In Russ.).
2. Goldberg E.D. Minor Elements in Sea water. *Chemical Oceanography*. J.P. Riley, G. Skirrow, eds. London: Academic Press; 1965;5:163-196.
3. Linnik P. N., Nabivanets B. I. *Migration forms of metals in fresh surface waters*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1986. 268 p. (In Russ.).
4. Perelman A.I., Kasimov N.S. *Geochemistry of landscape*. Moscow: Astreya-2000 Publ.; 1999. 762 p. (In Russ.).
5. Roeva N.N., Rovinsky F.Ya., Kononov E.Ya. Specific features of the behavior of heavy metals in various natural environments. *Zhurn. analit. khimii = Journal of Analytical Chemistry*. 1996;51(4):384-397. (In Russ.).
6. Strakhov N.M. *Problems of geochemistry of modern ocean lithogenesis*. Moscow: Nauka Publ.; 1976. 299 p. (In Russ.).
7. *U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries: U.S. Geological Survey*. 1998. 198 p.
8. *U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries: U.S. Geological Survey*. 2000. 198 p.
9. *U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries: U.S. Geological Survey*. 2002. 197 p.
10. *U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries: U.S. Geological Survey*. 2007. 195 p.
11. *U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries: U.S. Geological Survey*. 2014. 196 p.
12. *U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries: U.S. Geological Survey*. 2017. 202 p.
13. *U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries: U.S. Geological Survey*. 2019. 200 p.
14. *U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries: U.S. Geological Survey*. 2021. 200 p.
15. *U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries: U.S. Geological Survey*. 2022. 202 p.
16. Fedorov Y.A., Solodko D.F., Chepurnaya V.I., Dotsenko I.V., Talpa B.V., Levchenko S.V., Popov Y.V., Dmitrik L.Y. Physical and chemical properties, elemental and material snow composition in Rostov-on-Don. *E3S Web of Conferences*. 2021;265:02003.
17. Privalenko V.V., Bezuglova O.S. Ecological problems of anthropogenic landscapes of the Rostov region. *Ecology of the city of Rostov-on-Don*. Rostov-on-Don: North Caucasus Higher School Research Center Press; 2003;1. 290 p. (In Russ.).

18. Grigoriev N.A. Average content of chemical elements in rocks composing the upper part of the continental crust. *Geokhimiya = Geochemistry*. 2004;(7):785-792. (In Russ.).
19. Bowen H. J. M. *Environmental Chemistry of the Elements*. London; New York: Academic Press; 1979. 333 p.
20. Klenkin A.A., Korpakova I.G., Pavlenko L.F., Temerdashev Z.A. *Ecosystem of the Azov Sea: anthropogenic pollution*. Krasnodar: Azov Scientific Research Institute of Fisheries Press; 2007. 324 p. (In Russ.).
21. Fedorov Yu.A., Dotsenko I.V., Mikhailenko A.V. Heavy metals's behavior in the water of the Azov Sea during wind activity. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2015;(3):108-112. (In Russ.).
22. Mikhailenko A.V., Fedorov Yu.A., Dotsenko I.V. *Heavy metals in the components of the landscapes of the Azov Sea*. Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press; 2018. 214 p. (In Russ.).
23. Shnyukov E. V., Beloded R. M., Tsemko V. P. *Minerals of the World Ocean*. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1974. 207 p. (In Russ.).
24. Khoroshevskaya V.O. Distribution of vanadium, nickel and molybdenum in bottom sediments of the Taganrog Bay. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2015;(3):113-118. (In Russ.).
25. Long E.R., McDonald D.D., Smith S.L., Calder F.D. Frequency of adverse biological effects within the ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*. 1995;19(1):81-97.
26. Pitieva K.E. Hydrogeology of the area: expected consequences of the planned development of the Elansky and Elkinsky copper-nickel deposits in the Voronezh region. *Comprehensive expert assessment of the feasibility and possible consequences of the planned development of copper-nickel deposits in the Voronezh region*. Moscow: Public Chamber of the Russian Federation Press; 2012:52-71. (In Russ.).
27. Bezuglova O.S., Privalenko V.V., Ostroborodko N.P. Biogeochemical characteristics of soils on the coast of the Taganrog Bay. *Ecosystem studies of the Azov Sea and the coast*. Apatity: Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences Press; 2002;IV:12-28. (In Russ.).
28. Fedorov Yu.A., Garkusha D.N., Dmitrik L.Yu., Dotsenko I.V., Chepurnaya V.I., Trubnik R.G. Geochemistry of iron in the system of the Mius River – the Mius estuary – the Taganrog Bay of the Azov Sea. *Astrakhan. vestn. ekol. obrazovaniya = Astrakhan Bulletin of Ecological Education*. 2020;(5):172-181. (In Russ.).
29. Fedorov Yu.A., Garkusha D.N., Chepurnaya V.I., Dotsenko I.V., Kostenko D.F. Cadmium in water along the continuum “the Mius River estuary – the Taganrog Bay of the Azov Sea”. *Geograf. vestn. = Geographical Bulletin*. 2021;(3):115-129. (In Russ.).
30. RD 52.24.377-2008. *The mass concentration of aluminum, beryllium, vanadium, iron, cadmium, cobalt, manganese, copper, molybdenum, nickel, lead, silver, chromium and zinc in the waters. The method of performing measurements by atomic absorption with direct electrothermal atomization of samples*. Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute Press; 2008. 34 p. (In Russ.).
31. *Manual on chemical analysis of surface waters of the land*. Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute Press; 2009. 21 p. (In Russ.).
32. *Water quality's standards of water bodies of fishery significance, including standards of maximum permissible concentrations of harmful substances in the water bodies of fishery significance*. Appendix to the Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated 13.12.2016 No. 552 (as amended on 10.03.2020). (In Russ.).
33. Garanzha A.P., Kononov G.S. Colloidal form of migration of trace elements in the river waters. *Gidrokhim. materialy = Hydrochem. Materials*. 1979;75:22-26. (In Russ.).
34. Leland H.V. Distribution of dissolved and suspended trace elements in the southern part of Lake Michigan. *Proceedings of the 1st International Conference on Heavy Metals in the Environment*. Toronto, Canada: Toronto Institute for Environmental Studies Press; 1975;II:709-730.
35. Nriagu J. O., Wong H.K.T., Coker R.D. Solid particles and dissolved trace elements in Lake Ontario. *Water Research*. 1981;15:91-96.
36. Sholkovits E.R., Copland D. The chemical composition of suspended solids in the water of Esthwaite, a biologically productive lake with seasonally oxygen-free hypolimnion. *Law on Geochemistry and Cosmochemistry*. 1982;46(3):393-409.
37. Gordeev V. V. *Geochemistry of the river-sea system*. Moscow: Matushkina I. I. Publ.; 2012. 452 p. (In Russ.).
38. Fedorov Yu. A., Kostenko D. F., Dotsenko I. V., Chepurnaya V. I. Features of the content's distribution of copper migratory forms in the water in the section “the Mius River estuary – the Taganrog Bay of the Azov Sea”. *Vestn. Voronezhskogo gos. un-ta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya = Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geography. Geocology*. 2022;(1):36-49. (In Russ.).
39. Vinogradov A. P. Average contents of chemical elements in the main types of igneous rocks of the Earth's crust. *Geokhimiya = Geochemistry*. 1962;(7):555-571. (In Russ.).

40. Turner J.K., Meyer D. K., Cox K. E., Logan K., DiCintio M., Thomas S. Creating contexts for involvement in mathematics. *Journal of Pedagogical Psychology*. 1998;90:730-745.

41. Zimon A.D. *Colloidal chemistry (including nanoparticles)*. Moscow: Agar Publ.; 2007. 344 p. (In Russ.).

42. Khrustalev Yu. P. *The geochemistry's main problems of sedimentogenesis in the Azov Sea*. Apatity: Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences Press; 1999. 247 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Ю.А. Федоров – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Д.Ф. Костенко – стажер-исследователь, кафедра физической географии, экологии и охраны, Институт наук о Земле.

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

Information about the authors

Yu.A. Fedorov – Doctor of Science (Geography), Professor, Head of the Department of Physical Geography, Ecology and Nature Protection, Institute of Earth Sciences.

D.F. Kostenko – Trainee-Researcher, Department of Physical Geography, Ecology and Nature Protection, Institute of Earth Sciences.

I.V. Dotsenko - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Physical of Geography, Ecology and Nature Protection, Institute of Earth Sciences.

Статья поступила в редакцию 31.08.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022; принята к публикации 15.11.2022. The article was submitted 31.08.2022; approved after reviewing 07.09.2022; accepted for publication 15.11.2022.

Научная статья

УДК 911.6

doi: 10.18522/1026-2237-2022-4-2-90-98

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗВИТИЯ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Александр Дмитриевич Хаванский^{1✉}, *Владимир Владимирович Латун*²,
*Илья Валерьевич Бессмертный*³

^{1, 2, 3}Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹had@sfedu.ru✉

²vvlatur@sfedu.ru

³bessmertnyy@sfedu.ru

Аннотация. В настоящее время такая научная категория, как пространственное развитие территорий, все ещё остаётся недостаточно изученной и нуждается в дальнейшей концептуализации. И хотя в научном дискурсе и государственных документах представлены основные направления пространственного развития страны и региона, для реализации этих направлений в регионе требуется их конкретизация с учетом региональных природно-ресурсных условий, особенностей социально-экономического и экологического развития территориальных образований. В настоящем исследовании предпринята попытка заполнить этот пробел. В качестве исследуемого объекта выбрана Ростовская область, на примере которой и раскрывается сущность разработанной методики. Она включает пространственную дифференциацию территории, установление территориальной структуры региона, определение уровня социально-экономического и экологического развития территориальных образований, оценку их сбалансированности, выявление проблем и перспектив пространственного развития. В работе выделены основные факторы пространственного развития региона (экономический, демографический, природно-ресурсный потенциал, состояние окружающей среды, уровень и качество жизни населения). На основе рассчитанных и подробно представленных интегральных показателей по каждому муниципальному образованию Ростовской области установлены территориальные особенности социально-экономического и экологического развития и основные проблемы пространственного развития Ростовской области, определены территории, отличающиеся максимальным дисбалансом.

Ключевые слова: пространственное развитие, Ростовская область, социально-экономическое развитие, экологическая ситуация в Ростовской области, методика оценки пространственного развития, сбалансированность развития, развитие муниципальных образований, пространственная дифференциация, районирование территорий

Для цитирования: Хаванский А.Д., Латун В.В., Бессмертный И.В. Комплексная оценка пространственного развития Ростовской области // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 4-2. С. 90–98.

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

Original article

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE SPATIAL DEVELOPMENT OF THE ROSTOV REGION

Alexander D. Khavansky^{1✉}, *Vladimir V. Latun*², *Ilya V. Bessmertny*³

^{1,2,3}Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹had@sfedu.ru✉

²vvlatur@sfedu.ru

³bessmertnyy@sfedu.ru

© Хаванский А.Д., Латун В.В., Бессмертный И.В., 2022

Abstract. *At present, such a scientific category as the spatial development of territories is still insufficiently studied and in need of further conceptualization. And although the main directions of the country's and region's spatial development are presented in scientific discourse and government documents, their implementation in the region requires their specification, taking into account regional natural resource conditions, the characteristics of the socio-economic and environmental development of territorial entities. The present study attempts to fill this gap. It is devoted to presenting the results of the development of an original methodology for assessing the level of spatial development at the regional level. The Rostov region was chosen as the object under study, on the example of which the essence of the developed methodology is revealed. The presented methodology includes spatial differentiation of the territory, establishing the territorial structure of the region, determining the level of socio-economic and environmental development of territorial entities, assessing their balance, identifying problems and prospects for spatial development. In addition, this paper highlights the main factors of the spatial development of the region, which include economic, demographic, natural resource potentials, the state of the environment, the level and quality of life of the population. In the work, on the basis of calculated and detailed integral indicators for each municipality of the Rostov region, the territorial features of socio-economic and environmental development and the main problems of the spatial development of the Rostov region are established, the territories that are characterized by the maximum imbalance of development are identified.*

Keywords: *spatial development, Rostov region, socio-economic development, environmental situation in the Rostov region, methodology for assessing spatial development, development balance, development of municipalities, spatial differentiation, zoning of territories*

For citation: *Khavansky A.D., Latun V.V., Bessmertny I.V. Comprehensive Assessment of the Spatial Development of the Rostov Region. Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science. 2022;(4-2):90-98. (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

Вопросы пространственного развития территорий рассматриваются в работах многих исследователей. Однако в последнее время в связи с существенными изменениями в демографии, экономике, неравномерным развитием регионов, высоким уровнем социально-экономического неравенства внутри региона проблемы пространственного развития значительно обострились.

Для обеспечения пространственного развития Российской Федерации в 2019 г. была разработана и принята Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года. В Ростовской области в Стратегии социально-экономического развития, принятой в 2018 г., отдельным разделом выделена политика пространственного развития региона.

В указанных стратегических документах представлены основные направления пространственного развития страны и региона. Для реализации этих направлений требуется их конкретизация с учетом региональных природно-ресурсных условий, особенностей социально-экономического и экологического развития территориальных образований.

Для разработки конкретных планов пространственного развития необходима комплексная оценка современного состояния региона, которая включала бы установление территориальной структуры региона, определение уровня социально-экономического и экологического развития территориальных образований, оценку их сбалансированности, выявление проблем и перспектив пространственного развития.

Однако следует отметить, что теоретические и методологические подходы к изучению пространственного развития для территорий разного уровня разработаны недостаточно. В связи с этим весьма актуальны разработка методик и комплексная оценка пространственного развития Ростовской области.

Материалы и методы исследования

В основу работы положены данные государственной статистической отчетности и докладов о состоянии окружающей среды, материалы министерств и ведомств правительства Ростовской области, обработанные в соответствии с принятой методикой.

Проблемы пространственного развития страны и регионов рассматриваются в работах [1–4] и др. Существующие методы изучения развития пространственных природно-антропогенных си-

стем описаны в работах [2, 5–7]. Однако единая система показателей и методика оценки пространственного развития еще не выработаны.

На основе указанных выше исследований была разработана методика комплексной оценки пространственного развития региона, которая включает следующие разделы:

1. Пространственная дифференциация и территориальная структура региона.
2. Установление и анализ основных факторов пространственного развития региона, оценка природно-ресурсного, экономического, демографического потенциалов, уровня и качества жизни населения, состояния окружающей среды.
3. Оценка социально-экономического и экологического развития территориальных образований региона.
4. Оценка сбалансированности пространственного развития территориальных образований и региона.
5. Оценка и анализ пространственного развития региона, выявление проблем и перспектив пространственного развития.

Пространственная дифференциация региона

В данной работе территориальными единицами комплексной оценки пространственного развития региона являются административные районы, городские округа, территориальные природно-антропогенные комплексы (ТПАК). Выделение административных районов и городских округов производится по административному делению территорий. ТПАК устанавливаются по результатам природно-ресурсного зонирования территории [8] и типам природопользования [9]. Определенные сочетания ТПАК, типов природопользования и административно-территориальных единиц образуют территориальную структуру региона (рис. 1).



Рис. 1. Территориальная структура Ростовской области / Fig. 1. Territorial structure of the Rostov region

Основные факторы и показатели развития территориальных образований представлены в табл. 1. Количественные значения определяются на основании данных государственной статистики и другой имеющейся информации. Для того чтобы сопоставить между собой разнородные показатели, применялась пятибалльная система, в которой они ранжировались с помощью подобранных критериев (табл. 1). Интегральный показатель фактора развития определялся как сумма баллов.

Таблица 1 / Table 1

Основные факторы и показатели развития территориальных образований и их градация для балльной оценки / The main factors and indicators of the development of territorial entities and their gradation for scoring

| Фактор развития | Показатель оценки | Градация оценки показателей, баллы | | | | |
|------------------------------------|--|--|----------|---------|----------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Демографический потенциал | Численность населения, тыс. чел. | <20 | 20–50 | 50–250 | 250–1000 | >1000 |
| | Естественное движение населения, ‰ | <–10 | –10 ÷ –5 | –5 ÷ 0 | 0 ÷ +10 | >+10 |
| | Механическое движение населения, ‰ | <–10 | –10 ÷ –5 | –5 ÷ 0 | 0 ÷ +10 | >+10 |
| | Демографическая нагрузка на 1000 тыс. чел. | >900 | 801–900 | 701–800 | 601–700 | <700 |
| | Численность работающих, тыс. чел. | <5 | 5–10 | 10–50 | 50–100 | >100 |
| Экономический потенциал, млрд руб. | Объем промышленной продукции | <10 | 10–50 | 50–100 | 100–500 | >500 |
| | Объем сельскохозяйственной продукции | | | | | |
| | Оборот розничной торговли | | | | | |
| | Объем реализации платных услуг населению | | | | | |
| | Объем строительных работ | | | | | |
| | Инвестиции в основной капитал | | | | | |
| Уровень и качество жизни населения | Денежные доходы населения, тыс. руб. | <21 | 21–24 | 24–27 | 27–30 | >30 |
| | Площадь жилых помещений на одного жителя, м ² | <20 | 20–23 | 23–26 | 26–30 | >30 |
| | Доля безработных, % | >8 | 6–8 | 4–6 | 2–4 | <2 |
| | Обеспеченность населения врачами на 10 000 чел. | 10–15 | 15–20 | 20–25 | 25–30 | >30 |
| | Детская смертность, ‰ | >20 | 15–20 | 10–15 | 5–10 | <5 |
| Экологическая ситуация | Антропогенная нагрузка | Балльная оценка экологической ситуации | | | | |
| | Уровень загрязнения атмосферы, водных объектов, почв | | | | | |
| Природно-ресурсный потенциал | Климатический потенциал | Балльная оценка природно-ресурсного потенциала | | | | |
| | Ресурсный потенциал | | | | | |
| | Экологический потенциал | | | | | |

Результаты и обсуждение

Оценка социально-экономического и экологического развития территориальных образований производилась на основе результатов анализа основных факторов развития территорий как по ТПАК, так и по отдельным муниципальным образованиям региона. Интегральным показателем уровня социально-экономического и экологического развития территории является суммарный индекс, определяемый как сумма балльных оценок основных факторов развития (табл. 2). Пространственная оценка социально-экономического и экологического развития Ростовской области представлена на рис. 2.

Таблица 2 / Table 2

Комплексная оценка социально-экономического и экологического развития территориальных образований Ростовской области / Comprehensive assessment of the socio-economic and environmental development of the territorial entities of the Rostov region

| Территориальное образование | Природно-ресурсный потенциал | Экономический потенциал | Демографический потенциал | Уровень и качество жизни | Экологическая ситуация | Средний балл |
|------------------------------|------------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|--------------|
| Юго-Западный ТПАК | 4,3 | 2,7 | 3 | 4,0 | 2,1 | 3,2 |
| г. Ростов-на-Дону | 4 | 5 | 4,2 | 4,8 | 2 | 4,0 |
| г. Азов | 4 | 3 | 2,6 | 4,0 | 3 | 3,3 |
| г. Батайск | 4 | 2 | 3,8 | 4,2 | 2,1 | 3,2 |
| г. Новочеркасск | 4 | 4 | 3,2 | 4,2 | 1,2 | 3,3 |
| г. Таганрог | 4 | 4 | 3,4 | 4,6 | 1,3 | 3,5 |
| Азовский район | 5 | 2 | 3,0 | 3,0 | 2,3 | 3,1 |
| Аксайский район | 5 | 4 | 3,6 | 4,0 | 2,2 | 3,8 |
| Куйбышевский район | 4 | 1 | 1,8 | 3,0 | 2,9 | 2,5 |
| Матвеево-Курганский район | 4 | 2 | 2,0 | 2,6 | 2,8 | 2,7 |
| Мясниковский район | 5 | 2 | 3,4 | 3,0 | 2,2 | 3,1 |
| Неклиновский район | 5 | 2 | 2,6 | 2,6 | 2,4 | 2,9 |
| Родионово-Несветайский район | 4 | 1 | 2,0 | 3,0 | 2,7 | 2,5 |
| Донецкий ТПАК | 3,3 | 2 | 2,4 | 3,2 | 2,3 | 2,6 |
| г. Шахты | 3 | 3 | 2,8 | 3,6 | 1,6 | 2,8 |
| г. Новошахтинск | 3 | 2 | 2,8 | 2,6 | 1,7 | 2,4 |
| г. Каменск-Шахтинский | 3 | 2 | 2,4 | 4,0 | 2,3 | 2,7 |
| г. Гуково | 3 | 2 | 1,8 | 2,8 | 1,9 | 2,3 |
| г. Донецк | 3 | 1 | 2,0 | 2,6 | 2,7 | 2,3 |
| г. Зверево | 3 | 1 | 1,8 | 4,2 | 2,4 | 2,5 |
| Белокалитвинский район | 4 | 2 | 2,2 | 3,2 | 2,2 | 2,7 |
| Каменский район | 3 | 2 | 2,0 | 3,0 | 2,5 | 2,5 |
| Красносулинский район | 4 | 4 | 2,8 | 3,2 | 2,1 | 3,2 |
| Октябрьский район | 4 | 2 | 3,2 | 3,0 | 2,4 | 2,9 |
| Тацинский район | 3 | 2 | 2,2 | 2,6 | 2,4 | 2,4 |
| Усть-Донецкий район | 4 | 1 | 2,4 | 2,2 | 2,9 | 2,5 |
| Центральный ТПАК | 3,9 | 1,9 | 2,3 | 3,0 | 2,7 | 2,8 |
| г. Волгодонск | 4 | 4 | 3,4 | 4,6 | 2,3 | 3,7 |
| Багаевский район | 4 | 1 | 1,8 | 2,4 | 2,9 | 2,4 |
| Веселовский район | 4 | 1 | 2,4 | 2,0 | 2,9 | 2,5 |
| Волгодонской район | 4 | 2 | 2,0 | 2,4 | 4,0 | 2,9 |
| Константиновский район | 3 | 2 | 2,0 | 3,0 | 2,9 | 2,6 |
| Мартыновский район | 4 | 1 | 2,0 | 1,8 | 2,9 | 2,3 |
| Пролетарский район | 4 | 2 | 2,2 | 2,4 | 2,9 | 2,7 |
| Семикаракорский район | 4 | 2 | 2,2 | 2,4 | 2,5 | 2,6 |
| Северо-Западный ТПАК | 2,8 | 1,9 | 2 | 2,8 | 2,8 | 2,5 |
| Боковский район | 2 | 1 | 1,6 | 3,0 | 3,1 | 2,1 |
| Верхнедонской район | 3 | 1 | 1,4 | 2,6 | 3,2 | 2,2 |
| Кашарский район | 3 | 1 | 1,8 | 2,6 | 2,9 | 2,3 |
| Миллеровский район | 3 | 3 | 2,6 | 3,4 | 2,1 | 2,8 |
| Тарасовский район | 3 | 2 | 2,2 | 3,4 | 2,7 | 2,7 |
| Чертковский район | 3 | 2 | 2,2 | 2,2 | 2,8 | 2,4 |
| Шолоховский район | 3 | 2 | 2,0 | 3,2 | 2,9 | 2,6 |
| Северо-Восточный ТПАК | 2 | 1,4 | 1,9 | 3,2 | 3,2 | 2,3 |
| Милютинский район | 2 | 1 | 1,4 | 3,2 | 3,2 | 2,2 |
| Морозовский район | 2 | 2 | 2,2 | 3,4 | 2,6 | 2,4 |
| Обливский район | 2 | 1 | 1,6 | 2,8 | 3,5 | 2,2 |
| Советский район | 2 | 1 | 2,0 | 2,0 | 3,1 | 2,0 |
| Цимлянский район | 2 | 2 | 2,2 | 3,0 | 3,4 | 2,5 |

Окончание табл. 2

| Территориальное образование | Природно-ресурсный потенциал | Экономический потенциал | Демографический потенциал | Уровень и качество жизни | Экологическая ситуация | Средний балл |
|-----------------------------|------------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|--------------|
| Южный ТПАК | 4 | 2 | 2,2 | 3,2 | 2,5 | 2,8 |
| Егорлыкский район | 4 | 2 | 2,2 | 3,8 | 2,9 | 3,0 |
| Зерноградский район | 4 | 2 | 2,4 | 3,2 | 2,7 | 2,9 |
| Кагальницкий район | 4 | 2 | 2,0 | 3,4 | 2,7 | 2,8 |
| Песчанокопский район | 4 | 2 | 1,6 | 3,4 | 2,8 | 2,8 |
| Сальский район | 4 | 2 | 2,8 | 3,6 | 2,3 | 2,9 |
| Целинский район | 4 | 2 | 2,0 | 3,0 | 2,8 | 2,8 |
| Юго-Восточный ТПАК | 1,2 | 1,4 | 2,2 | 2,4 | 2,7 | 2,0 |
| Дубовский район | 1 | 1 | 2,0 | 2,8 | 2,8 | 1,9 |
| Заветинский район | 1 | 1 | 2,2 | 1,8 | 2,9 | 1,8 |
| Зимовниковский район | 1 | 2 | 2,2 | 3,0 | 2,5 | 2,1 |
| Орловский район | 2 | 2 | 2,4 | 3,2 | 2,5 | 2,4 |
| Ремонтненский район | 1 | 1 | 2,0 | 2,2 | 2,8 | 1,8 |

Территориальные природно-антропогенные комплексы (ТПАК):

- I. Юго-Западный
- II. Донецкий
- III. Центральный
- IV. Северо-Западный
- V. Северо-Восточный
- VI. Южный
- VII. Юго-Восточный

ГОРОДСКИЕ ОКРУГА:

- 1. Азов
- 2. Батайск
- 3. Волгодонск
- 4. Гуково
- 5. Донецк
- 6. Зверево
- 7. Каменск-Шахтинский
- 8. Новошахтинск
- 9. Новочеркасск
- 10. Ростов-на-Дону
- 11. Таганрог
- 12. Шахты

АДМИНИСТРАТИВНЫЕ РАЙОНЫ:

- 1. Азовский
- 2. Аксайский
- 3. Багаевский
- 4. Белокалитвинский
- 5. Боковский
- 6. Верхнедонской
- 7. Веселовский
- 8. Волгодонской
- 9. Дубовский
- 10. Егорлыкский
- 11. Заветинский
- 12. Зерноградский
- 13. Зимовниковский
- 14. Кагальницкий
- 15. Каменский
- 16. Кашарский
- 17. Константиновский
- 18. Красносулинский
- 19. Куйбышевский
- 20. Мартыновский
- 21. Матвеево-Курганский
- 22. Миллеровский
- 23. Милютинский
- 24. Морозовский
- 25. Мясниковский
- 26. Неклиновский
- 27. Обливский
- 28. Октябрьский
- 29. Орловский
- 30. Песчанокопский
- 31. Пролетарский
- 32. Ремонтненский
- 33. Родионово-Несветайский
- 34. Сальский
- 35. Семикаракорский
- 36. Советский
- 37. Тарасовский
- 38. Тацинский
- 39. Усть-Донецкий
- 40. Целинский
- 41. Цимлянский
- 42. Чертовский
- 43. Шолоховский



Рис. 2. Уровень социально-экономического и экологического развития территорий Ростовской области / Fig. 2. The level of socio-economic and environmental development of the territories of the Rostov region

Проведенная оценка позволила выявить следующие территориальные особенности социально-экономического и экологического развития Ростовской области:

1) наилучшими показателями развития отличаются города и сельские районы Юго-Западного ТПАК, которые характеризуются высокими значениями экономического и природно-ресурсного потенциала. Вместе с этим на данной территории установлены максимальные показатели антропогенной нагрузки и загрязнения окружающей среды. Здесь проживает более половины населения региона и сосредоточено более 80 % экономического потенциала;

2) второе место по численности населения и экономическому потенциалу занимает Донецкий ТПАК, в котором преобладают города и районы со средними показателями социально-экономического развития и критической экологической ситуацией;

3) аграрные районы преимущественно орошаемого земледелия Центрального ТПАК характеризуются повышенным природно-ресурсным потенциалом и средними социально-экономическими и демографическими показателями;

4) аграрные районы богарного земледелия отличаются характером и интенсивностью сельскохозяйственного производства: повышенные социально-экономические и демографические показатели имеют аграрно-промышленные центры и сельские районы южной зоны области, низкими показателями развития отличаются удаленные северо-западные, северо-восточные и юго-восточные районы, в большинстве аграрных районов преобладает напряженная экологическая ситуация.

Оценка сбалансированности пространственного развития. Сбалансированное пространственное развитие региона предполагает поддержание необходимой пропорциональности между экономикой, социальной сферой и состоянием окружающей среды отдельных территориальных образований и сбалансированностью развития разных территорий региона.

Для большинства территориальных образований Ростовской области выявлен дисбаланс между основными факторами развития. В промышленных центрах и прилегающих к ним сельских районах при относительно высоком уровне социально-экономического развития наблюдается неблагоприятная экологическая ситуация. В аграрных районах недостаточным является уровень развития социальной сферы и отмечается негативная динамика демографического потенциала при удовлетворительном состоянии окружающей среды (табл. 2).

Для оценки сбалансированности развития разных территорий региона использованы следующие показатели: инвестиции в развитие, объем строительных работ, состояние транспортно-логистической системы, удаленность от регионального административного центра. Результаты оценки показывают существенную неравномерность развития различных территориальных образований региона. Основная часть инвестиций (56 % от общего объема инвестиций в регионе) и строительных работ (91 %), в значительной мере отражающих развитие территориальных образований, приходится на г. Ростов-на-Дону и прилегающие к нему территории. Инвестиции в средние промышленные города (Таганрог, Новочеркасск) на порядок меньше. Отдельно следует выделить г. Волгодонск с существенными для средних городов объемами инвестиций и строительных работ.

Из сельских районов высокими показателями развития выделяются Аксайский и Миллеровский районы, средними – большая часть районов пригородных урбанизированных зон и зон разработки минерального сырья Ростовской и Донецкой агломераций, а также районы Центрального и Южного ТПАК. Минимальные показатели развития наблюдаются в удаленных северо-восточных и юго-восточных районах, на них приходится всего 0,06 % инвестиций и 0,015 % от общего объема строительных работ (рис. 3).

Дисбаланс развития отдельных территориальных образований заключается в интенсивном развитии Юго-Западного ТПАК и стагнации удаленных районов Северо-Восточного и Юго-Восточного ТПАК. Основная тенденция пространственного развития прослеживается в уменьшении уровня развития территориальных образований по мере удаления от регионального административного центра.

По результатам оценки установлены следующие основные проблемы пространственного развития Ростовской области:

1) высокая дифференциация территориальных образований Ростовской области по уровню социально-экономического и экологического развития;

2) отток из удаленных районов и концентрация населения в городах и районах Ростовской агломерации;

- 3) существенные внутрирегионные различия по уровню жизни;
- 4) недостаточное количество центров экономического роста для обеспечения ускоренного развития отстающих аграрных районов;
- 5) несоответствие существующего уровня развития транспортной инфраструктуры потребностям экономики и населения удаленных районов.

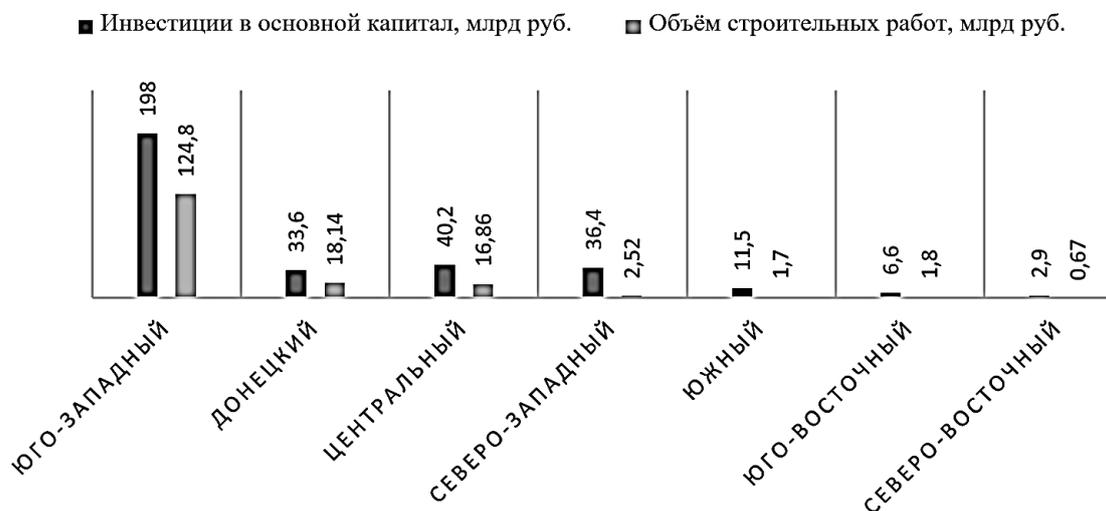


Рис. 3. Объем инвестиций в основной капитал и строительство
 / Fig. 3. The volume of investments in fixed assets and construction

Выводы

1. Разработана методика комплексной оценки пространственного развития региона, которая включает пространственную дифференциацию территории, установление территориальной структуры региона, определение уровня социально-экономического и экологического развития, оценку сбалансированности, выявление проблем и перспектив пространственного развития.
2. Определены основные факторы пространственного развития региона (экономический, демографический, природно-ресурсный потенциалы, состояние окружающей среды, уровень и качество жизни населения).
3. По результатам оценки установлены территориальные особенности социально-экономического и экологического развития и основные проблемы пространственного развития Ростовской области.
4. Для большинства территориальных образований Ростовской области выявлен дисбаланс между основными факторами развития, в промышленных центрах при относительно высоком уровне социально-экономического развития наблюдается неблагоприятная экологическая ситуация, в аграрных районах недостаточным является уровень развития социальной сферы и отмечается негативная динамика демографического потенциала при удовлетворительном состоянии окружающей среды.
5. Дисбаланс развития отдельных территориальных образований заключается в интенсивном развитии Юго-Западного ТПАК и стагнации удаленных районов Северо-Восточного и Юго-Восточного ТПАК. Основная тенденция пространственного развития прослеживается в уменьшении уровня развития территориальных образований по мере удаления от регионального административного центра.

Список источников

1. Бакланов П.Я. Территориальные структуры хозяйства в региональном управлении. М.: Наука, 2007. 239 с.
2. Бакланов П.Я. Подходы и основные принципы структуризации географического пространства // Изв. РАН. Сер. геогр. 2013. № 5. С. 7–18.
3. Артоболевский С.С., Бакланов П.Я., Трейвиш А.И. Пространство и развитие России: полимасштабный анализ // Вестн. РАН. 2009. № 2. С. 101–112.

4. Фундаментальные проблемы пространственного развития Российской Федерации: междисциплинарный синтез. М.: Медиа-Пресс, 2013. 664 с.
5. Кочуров Б.И. Экодиагностика и сбалансированное развитие: учебное пособие. Смоленск: Маджента, 2003. 384 с.
6. Дружинин А.Г. Россия в многополюсной Евразии: взгляд географа-обществоведа. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2016. 228 с.
7. Хованский А.Д., Кизицкий М.И., Орлинский А.С., Меринов Ю.Н. Комплексная эколого-хозяйственная оценка территории Ростовской области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. Приложение. 2006. № 10. С. 47–53.
8. Иванченко А.М., Коновалов А.И., Бессмертный И.В., Хованский А.Д., Латун В.В., Меринова Ю.Ю. Природный потенциал ландшафтов Ростовской области // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2019. № 4 (204). С. 62–70.
9. Хованский А.Д., Латун В.В., Хорошев О.А., Меринова Ю.Ю., Богачев И.В., Кравченко А.М. Типы природопользования и экологическая ситуация в Ростовской области // Экология. Информатика. Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2018. Т. 1, № 3. С. 262–269.

References

1. Baklanov P.Ya. *Territorial structures of the economy in regional management*. Moscow: Nauka Publ.; 2007. 239 p. (In Russ.).
2. Baklanov P.Ya. Approaches and main principles of structurization of geographical space. *Izvestiya RAN. Ser. geogr. = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*. 2013;(5):7-18. (In Russ.).
3. Artobolevsky S.S., Baklanov P.Ya., Treyvish A.I. Space and development of Russia: multi-scale analysis. *Vestn. RAN = Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2009;(2):101-112. (In Russ.).
4. *Fundamental problems of the spatial development of the Russian Federation: interdisciplinary synthesis*. Moscow: Media-Press; 2013. 664 p. (In Russ.).
5. Kochurov B.I. *Ecodiagnosics and balanced development: textbook*. Smolensk: Madzhenta Publ.; 2003. 384 p. (In Russ.).
6. Druzhinin A.G. *Russia in multipolar Eurasia: the view of a social geographer*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2016. 228 p. (In Russ.).
7. Khovanskii A.D., Kizitskii M.I., Orlinkii A.S., Merinov Yu.N. Comprehensive environmental and economic assessment of the territory of the Rostov region. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2006;(S10):47-53. (In Russ.).
8. Ivanchenko A.M., Konvalov A.I., Bessmertnyi I.V., Khovanskii A.D., Latun V.V., Merinova Yu.Yu. Natural potential of landscapes of the Rostov region. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2019;(4):62-70. (In Russ.).
9. Khovanskii A.D., Latun V.V., Khoroshev O.A., Merinova Yu.Yu., Bogachev I.V., Kravchenko A.M. Types of nature management and the ecological situation in the Rostov region. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Sistemnyi analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem = Ecology. Economy. Informatics Series: System Analysis and Modeling of Economic and Ecological Systems*. 2018;1(3):262-269. (In Russ.).

Информация об авторах

А.Д. Хованский – доктор географических наук, профессор, кафедра социально-экономической географии и природопользования, Институт наук о Земле.

В.В. Латун – кандидат географических наук, доцент, кафедра социально-экономической географии и природопользования, Институт наук о Земле.

И.В. Бессмертный – преподаватель, кафедра социально-экономической географии и природопользования, Институт наук о Земле.

Information about the authors

A.D. Khavansky - Doctor of Science (Geography), Professor, Department of Socio-Economic Geography and Nature Management, Institute of Earth Sciences.

V.V. Latun - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Department of Socio-Economic Geography and Nature Management, Institute of Earth Sciences.

I.V. Bessmertny - Lecturer, Department of Socio-Economic Geography and Nature Management, Institute of Earth Sciences.

Статья поступила в редакцию 01.07.2022; одобрена после рецензирования 20.07.2022; принята к публикации 15.11.2022.
The article was submitted 01.07.2022; approved after reviewing 20.07.2022; accepted for publication 15.11.2022.

Научная статья

УДК 550.8:528.92

doi: 10.18522/1026-2237-2022-4-2-99-107

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ТЕРРИТОРИИ ЮГА РУССКОЙ ПЛАТФОРМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

Андрей Леонидович Харитонов

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Россия*

ahariton@izmiran.ru

Аннотация. *Актуальность работы.* Использование региональных геолого-геофизических методов при геоморфологическом картировании территорий существенно повышает информативность и эффективность прогнозно-поисковых нефтегазовых исследований. **Цель работы** – показать возможности региональных геолого-геофизических методов исследования для изучения морфологических концентрических особенностей тектонического строения и поисков нефтегазовых залежей в пределах южных областей Русской платформы и Кавказа. **Методы исследования.** Были использованы различные геолого-геофизические методы (анализ данных дешифрирования космических снимков, теплового потока). **Результаты исследования.** Было выявлено наличие определенной пространственной взаимной корреляционной связи в расположении месторождений нефти и газа на территории южных регионов Русской платформы и Кавказа с расположением геоморфологических структур центрального типа по данным дешифрирования космических снимков и съемок измерений теплового потока, в виде кольцевых (иногда эллипсовидных, спиралевидных) структур. Впервые выявлено периферийное пространственное расположение (в бортовых зонах) основных месторождений нефти, газа, битумов относительно центральной части палеомантийных плюмов в южных регионах Русской платформы, образующих геоморфологические структуры центрального типа, подобных прикаспийской кольцевой структуре, где также сосредоточено значительное количество нефтяных и газовых месторождений. Выявлено, что высокие значения теплового потока определяют высокую продуктивность нефтяных и газовых месторождений, расположенных в пределах геоморфологических структур центрального типа. Показаны результаты прогнозной оценки для южных регионов России с целью выделения участков, перспективных для поисков новых месторождений нефти и газа.

Ключевые слова: региональная геология, кольцевые геоморфологические структуры, потенциальная нефтегазовые ресурсы

Для цитирования: Харитонов А.Л. Геолого-геофизические исследования кольцевых геоморфологических структур на территории юга Русской платформы и перспективы поисков месторождений нефти и газа // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 4-2. С. 99–107.

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

Original article

GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL STUDIES OF RING GEOMORPHOLOGICAL STRUCTURES IN THE SOUTH OF THE RUSSIAN PLATFORM AND PROSPECTS FOR OIL AND GAS EXPLORATION

Andrey L. Kharitonov

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS, Moscow, Russia
ahariton@izmiran.ru*

Abstract. Relevance. The use of regional geological and geophysical research methods in the geological and morphological mapping of areas significantly increases the information content and efficiency of predictive exploration of oil and gas research. **Aim.** To show the possibilities of regional geological and geophysical research methods for studying the morphological concentric features of the tectonic structure and the search for oil and gas deposits within the south regions of the Russian Platform and Caucasus. **Methods of research.** Various geological and geophysical methods (analysis data of decoding satellite images, of heat flow data) were used. **Results of research.** The paper revealed the presence of a certain spatial mutual correlational relationship in the location of oil and gas fields in the southern regions of the Russian Platform and Caucasus regions with the location of geomorphological structures of the central type according to the data of decoding satellite images and surveys of heat flow measurements, in the form of ring (sometimes elliptical, spiral) structures. For the first time, the peripheral spatial location (in the side zones) of the main oil, gas, and bitumen deposits relative to the central part of the paleomantle plumes in the southern regions of the Russian Platform, forming geological and morphological structures of the central type, similar to the Pre-Caspian ring morphological structure, where a significant number of oil and gas fields are also concentrated in the southern regions of Russia, is revealed. It is revealed that high values of the heat flow determine the high productivity of oil and gas fields located within the geomorphological structures of the central type. The results of the prognostic assessment in the southern regions of Russia are shown, in order to identify areas that are promising for the search for new oil and gas deposits.

Keywords: regional geology, ring geomorphological structures, potential resources of oil and gas

For citation: Kharitonov A.L. Geological and Geophysical Studies of Ring Geomorphological Structures in the South of the Russian Platform and Prospects for Oil and Gas Exploration. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(4-2):99-107. (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

Российскими геологами и геофизиками найдены определенные корреляционные связи пространственного расположения нефтегазовых залежей и геоморфологических структур центрального типа, сформированных на поверхности Земли синфазными структурами осадочного чехла, коррелирующими с выступами архейского и протерозойского фундамента палеомантийных плюмов [1–4]. Целью данной статьи является анализ результатов проведенной научной работы, показывающей возможности региональных геолого-геофизических методов исследования (в том числе и аэрокосмических методов) для изучения геоморфологических особенностей тектонического строения южных регионов Российской Федерации (юго-восток Русской платформы и прилегающие регионы Северного Кавказа), позволяющих провести обоснованный анализ нефтегазовых перспектив этих территорий.

Методы исследования

Для поиска геоморфологических структур центрального типа на территории юго-восточных регионов Русской платформы, а также на территории Скифской плиты и Северного Кавказа, помимо наземных геолого-геофизических данных [4, 5], были использованы данные дистанционного зондирования Земли из космоса [2, 6]. Известными российскими учеными [1, 2] было отмечено, что с увеличением разрешающей способности космических изображений могут быть выявлены все более глубокие слои земной коры. Было показано [2, 5], что достаточно надежная взаимосвязь проявляется между данными дистанционного зондирования Земли из космоса и геофизическими данными о тепловом потоке, поступающем из недр Земли. Результаты этих исследований [1, 4, 6] свидетельствуют о важности изучения механизма дистанционного зондирования из космоса геоморфологических структур центрального типа и подтверждают актуальность проводимой работы по изучению глубинного строения этих структур на территории юго-восточных регионов Русской платформы.

Результаты проведенных геоморфологических исследований

По данным дистанционного зондирования Земли из космоса, на территории юго-восточных регионов Русской платформы и ее ближайшего окружения было обнаружено [2, 6] значительное количество геоморфологических структур центрального типа с различными видами тектономагматических процессов их формирования, с разной глубиной очагов мантийных плюмов, их формирующих, и разных диаметральными размерами (от нескольких десятков километров до нескольких тысяч километров) (рис. 1).

Изображенные на рис. 1 геоморфологические структуры центрального типа формировались в течение «нуклеарных» этапов геологической эволюции Земли и связаны с различными геохронологическими периодами тектономагматической активизации эндогенных геологических процессов [7]. Необходимо отметить, что на территории юго-восточных регионов Русской платформы и в сопредельных регионах в архейско-протерозойские геохронологические периоды действовали различные тектономагматические процессы формирования геоморфологических структур центрального типа: магматический (плюм-магматический, магмато-вулканический, грязе-вулканический), дегазационно-взрывной, тектонический (цилиндрические дайки), комплексный [6]. Отмечают разные поверхностные морфологические особенности геоморфологических структур центрального типа, выявленных на территории Русской платформы: круговые, эллипсоидные, спиральные и некоторые другие. Примеры достаточно крупных геоморфологических структур центрального типа (7 – Скифская, 9 – Прикаспийская), расположенных на территории юго-восточных регионов Русской платформы, выявленных по геолого-геофизическим данным и данным дешифрирования космических снимков, представлены на рис. 1.

К наиболее крупным геоморфологическим структурам центрального типа на юго-востоке Русской платформы, территории Предкавказья и Северного Кавказа можно отнести Скифскую (7), Прикаспийскую (9) (рис. 1). На территории Предкавказья и Северного Кавказа также обнаружены геоморфологические структуры центрального типа меньшего диаметра, такие как Грозненская (52), Ставропольские (53), Ростово-Элистинские (54) и некоторые другие, которые образовались в бортовых зонах ближайших более крупных геоморфологических структур центрального типа, таких как Скифская (7), Прикаспийская (9) (рис. 1).

Пространственные размеры выявленных кольцевых геоморфологических структур центрального типа, наблюдаемых на территории юга Русской платформы, колеблются от нескольких сотен метров [2] до тысяч километров [6] в диаметре. По своим пространственным размерам геоморфологические структуры центрального типа на территории юга Русской платформы можно разделить на несколько структурных классов (пространственных порядковых размеров) (таблица).

Глубинные неоднородности палеомантийных плюм-магматических структур, являющихся источниками формирования геоморфологических структур центрального типа, в общем виде можно представить следующим образом (рис. 2).

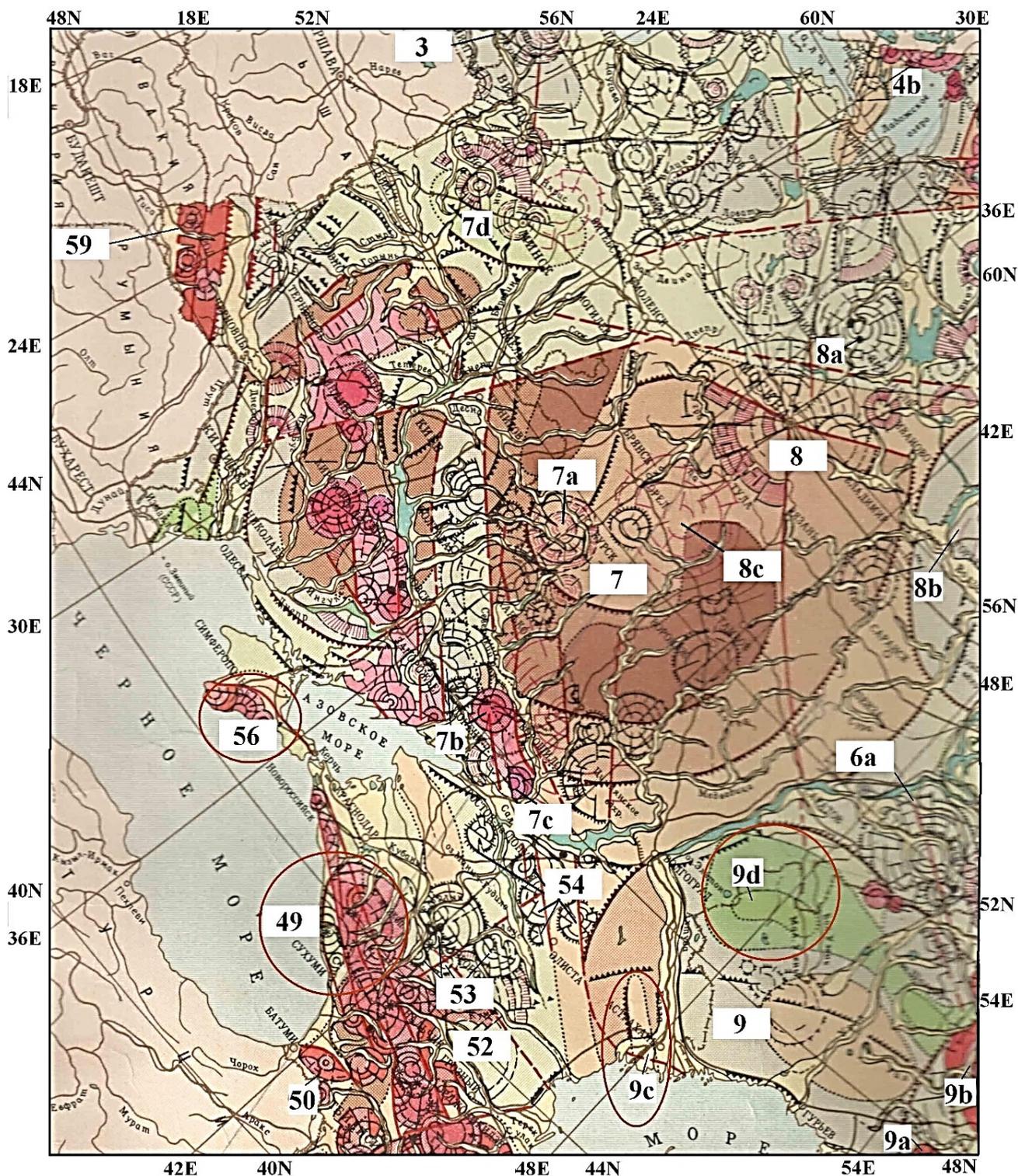


Рис. 1. Фрагмент карты геоморфологических структур центрального типа, расположенных на территории южных регионов России, построенной по данным дешифрирования космических снимков [2]. Главные геоморфологические структуры центрального типа на юге России: 7 – Скифская; 7а – Курская; 7б – Донецкая; 7с – Шахтинская; 9 – Прикаспийская; 9а – Эмбенская; 9б – Южно-Уральская; 9с – Астраханская; 9д – Волгоградская; 49 – Восточно-Черноморские; 50 – Закавказские; 52 – Грозненская; 53 – Ставропольские; 54 – Ростово-Элистинские; 56 – Крымо-Азовские / Fig. 1. Fragment of the map of geomorphological structures of the central type located on the territory of the southern regions of the Russia, constructed according to the data of remote sensing of the Earth from space [2]. The main geomorphological structures of the central type in the South of Russia: 7 - Scythian; 7a - Kursk; 7b - Donetsk; 7c - Shakhty; 9 - Pre-Caspian; 9a - Emben; 9b - South Ural; 9c - Astrakhan; 9d - Volgograd; 49 - East Black Sea; 50 - Transcaucasian; 52 - Grozny; 53 - Stavropol; 54 - Rostov-Elista; 56 - Crymea-Azov

Средние размеры геоморфологических структур центрального типа, зафиксированные на юге Русской платформы / Average sizes of geomorphological structures of the central type recorded in the south of the Russian Platform

| Порядок кольцевых структур | Диаметр геоморфологической структуры, км |
|----------------------------|--|
| 4-й | 500–999 |
| 5-й | 200–499 |
| 6-й | 80–199 |
| 7-й | 30–79 |

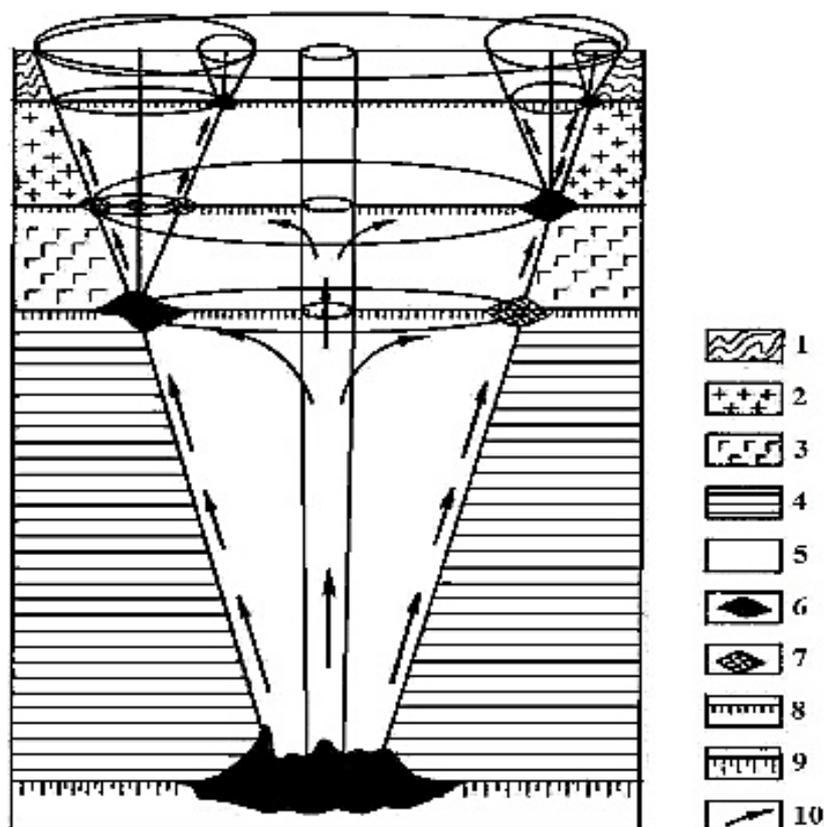


Рис. 2. Схема глубинного строения типичной палеомантийной плюм-магматической структуры (с «трубой дегазации» в центре), формирующего на поверхности Земли геоморфологические структуры центрального типа: 1 – породы «осадочного» слоя земной коры; 2 – слой земной коры с породами гранитоидного состава; 3 – слой земной коры с породами базитового состава; 4 – литосферный слой мантии Земли; 5 – астеносферный слой мантии Земли; 6 – скопление нефтяных залежей на пересечении субгоризонтальных границ физических слоев Земли и субвертикальных границ геоморфологических структур центрального типа; 7 – скопление газовых залежей на пересечении субгоризонтальных границ физических слоев Земли и субвертикальных границ в пределах палеомантийного плюма; 8 – границы, разделяющие физические слои земной коры; 9 – границы, разделяющие физические слои мантии Земли; 10 – направление субвертикального потока теплопереноса вещества мантии к поверхностным слоям Земли / Fig. 2. Scheme of the deep structure of a typical paleo-mantle plume-magmatic structure (with a “degassing pipe” in the center), which forms geomorphological structures of the central type on the Earth's surface: 1 - rocks of the “sedimentary” layer of the Earth's crust; 2 - layer of the Earth's crust with the granite rocks; 3 - layer of the Earth's crust with the basalt rocks; 4 - the lithospheric layer of the Earth's mantle; 5 - asthenosphere layer of the Earth's mantle; 6 - accumulation of petrol deposits at the intersection of the sub-horizontal boundaries of the physical layers of the Earth and the near-vertical boundaries of the geomorphological structures of the central type; 7 - accumulation of gas deposits at the intersection of the sub-horizontal boundaries of the physical layers of the Earth and near-vertical boundaries within the paleo-mantle plume; 8 - boundaries separating the physical layers of the Earth's crust; 9 - boundaries separating the physical layers of the Earth's mantle; 10 - the direction of the near-vertical flow of heat and mass transfer of mantle material to the surface layers of the Earth

Из глубин Земли в результате относительно постепенного (в геологических масштабах времени) продвижения из мантии к поверхностным слоям Земли плюм-магматических образований (термальных палеомантийных плюмов) [3, 8] образовались усеченные воронкообразные глубоководные структуры в кристаллическом фундаменте земной коры. По периферийным тектоническим разломам и так называемой трубе дегазации [3] в центральной части палеомантийных плюм-магматических структур мигрируют в приповерхностные слои осадочного слоя земной коры газовые и гидротермальные флюидные потоки с содержащимися в них углеводородами простейшего химического состава (С, Н₂, СО₂, СН₄). Подобные геоморфологические структуры центрального типа, сформированные палеомантийными термальными плюм-магматическими структурами, были частично изучены и проанализированы в работах [2–7].

На фрагменте схемы дешифрирования космических снимков (рис. 1) отчетливо выделяются относительно небольшие кольцевые геоморфологические структуры центрального типа (53 – Ставропольские, 54 – Ростово-Элистинские), расположенные вдоль краевого шва Русской платформы. На южном обрамлении Русской платформы, в Северо-Кавказском регионе, на территории Чеченской Республики отчетливо выделяется Грозненская геоморфологическая структура центрального типа 7-го порядка (52) (рис. 3), осложняющая Прикаспийскую геоморфологическую структуру центрального типа (9) 4-го порядка.

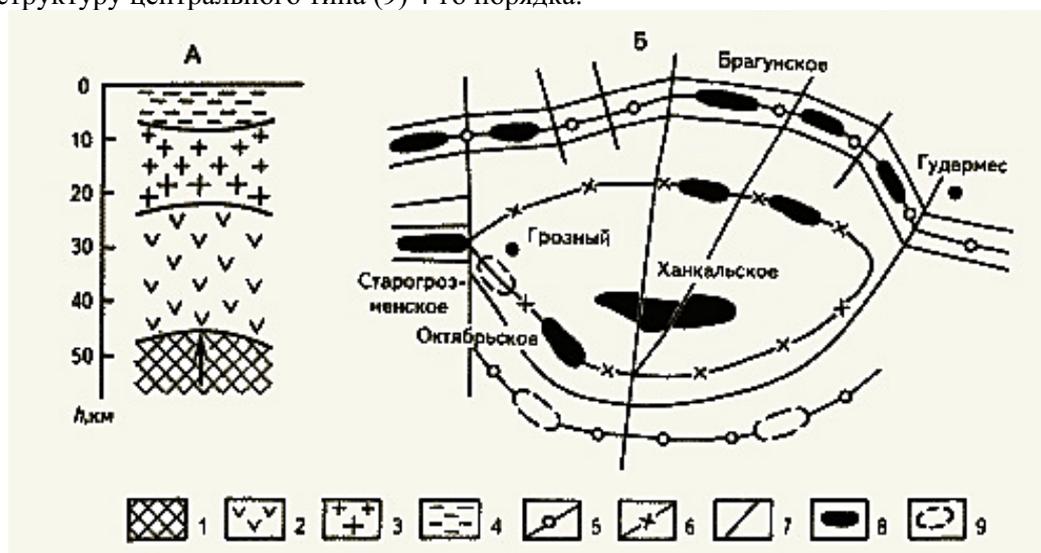


Рис. 3. Схема расположения и разрез земной коры Грозненской геоморфологической структуры центрального типа [4]: А – глубинный разрез земной коры в пределах Грозненской геоморфологической структуры центрального типа; Б – схема расположения нефтяных месторождений в пределах Грозненской геоморфологической структуры центрального типа; 1 – верхняя мантия; 2 – слой горных пород базальтового типа; 3 – палеозойский фундамент и слой горных пород гранитоидного типа; 4 – породы осадочного слоя; 5 – внешний вал; 6 – внутренний вал; 7 – разломы; 8 – нефтяные месторождения; 9 – предполагаемые нефтегазовые структуры / Fig. 3. Scheme and section of the Earth's crust of the Grozny geomorphological structure of the central type [4]: A - deep section of the Earth's crust of the Grozny geomorphological structure of the central type; B - scheme of oil fields within the Grozny geomorphological structure of the central type; 1 - upper mantle; 2 - the layer of basalt type rocks; 3 - Paleozoic basement and the layer of granite type rocks; 4 - rocks of the sedimentary layer; 5 - outer shaft; 6 - inner shaft; 7 - faults; 8 - oil fields; 9 - inferred structure of oil and gas

Геоморфологическая структура центрального типа (52) расположена в районе Сунженской антиклинальной зоны, южнее г. Грозного. Диаметр этой структуры составляет около 32 км, что позволяет отнести ее к 7-му пространственному классу размеров геоморфологических структур центрального типа [9]. По своей пространственной форме, выделяемой на земной поверхности по данным дешифрирования космических снимков [2], Грозненскую геоморфологическую структуру центрального типа (52) можно представить в виде окружности или слабовыраженного эллипса (рис. 3). По результатам глубинного сейсмического зондирования [4] и геологической интерпретации значений гравитационного поля в центральной её части наблюдаются поднятие верхней границы мантии и уменьшение вертикальной мощности гранито-гнейсового слоя

(рис. 3). Структура околнурена глубинными тектоническими разломами региональной сети: Терским и Пшекиш-Тырныузским широтной ориентировки и Аргунским и Восточно-Грозненским – меридиональной [4]. Исследуемая структура (52) состоит из небольшого поднятия в центре, образованного выходом «трубы дегазации» мантии, и бортовых валообразных зон на периферии этой структуры (52), ограниченных полукольцевыми тектоническими разломами. Глубоко проникающие тектонические разломы обеспечивают взаимосвязь приповерхностных слоев осадочного чехла с мантийными «корнями», сформировавшего её палеомантийного плюма. В периферийных валообразных зонах уже найдено несколько нефтегазовых месторождений. Наиболее известные из них – Старогрозненское и Октябрьское, которые являются самыми высокодебитными, а в зоне расположения «трубы дегазации» – месторождение Ханкальское (рис. 3). Грозненская геоморфологическая структура центрального типа характеризуется высокими значениями теплового потока [5], и это, по-видимому, определяет высокую продуктивность нефтяных месторождений, расположенных в ней (рис. 4).

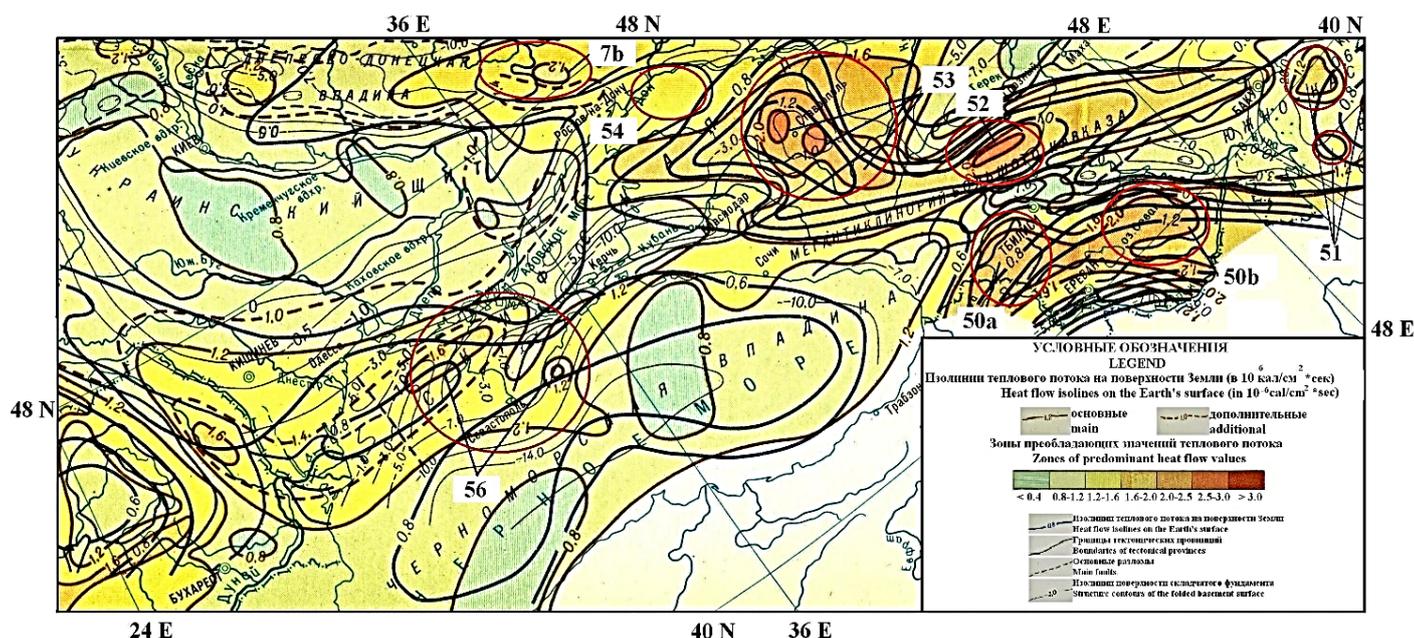


Рис. 4. Фрагмент карты теплового потока территории СССР [5]. Аномалии теплового потока, связанные с Донецкой (7b), Закавказскими (50a, 50b), Южно-Каспийскими (51), Грозненской (52), Ставропольскими (53), Ростовской (54), Крымскими (56) геоморфологическими структурами центрального типа / Fig. 4. Fragment of the heat flow map of the territory of the USSR [5]. Heat flow anomalies associated with Donetsk (7b), Transcaucasian (50a, 50b), South Caspian (51), Grozny (52), Stavropol (53), Rostov (54), Crimea (56) geomorphological structures of the central type

Основываясь на проведенных ранее исследованиях [3, 4, 8, 9], можно предположить, что и Ставропольские (53), и Ростово-Элистинские (54) геоморфологические структуры центрального типа, расположенные в зонах высоких значений теплового потока, подобно Грозненской геоморфологической структуре центрального типа (52), должны быть достаточно перспективными для постановки детальных геолого-разведочных работ на поиски месторождений нефти и газа. Сделанные в этой статье оценки нефтегазовой перспективности территорий расположения кольцевых геоморфологических структур центрального типа подтверждаются имеющимися наземными геолого-геофизическими данными, представленными на карте полезных ископаемых [10] (рис. 5).

Заключение

По результатам применения данных дешифрирования космических снимков, данных о значениях теплового потока на территории юго-восточных регионов Русской платформы и Северного Кавказа обнаружено несколько перспективных геоморфологических структур центрального типа (Грозненская, Ставропольские, Ростовская, Крымские), которые по своим геотермическим и геоморфологическим параметрам перспективны для поисков новых нефтегазовых месторождений.

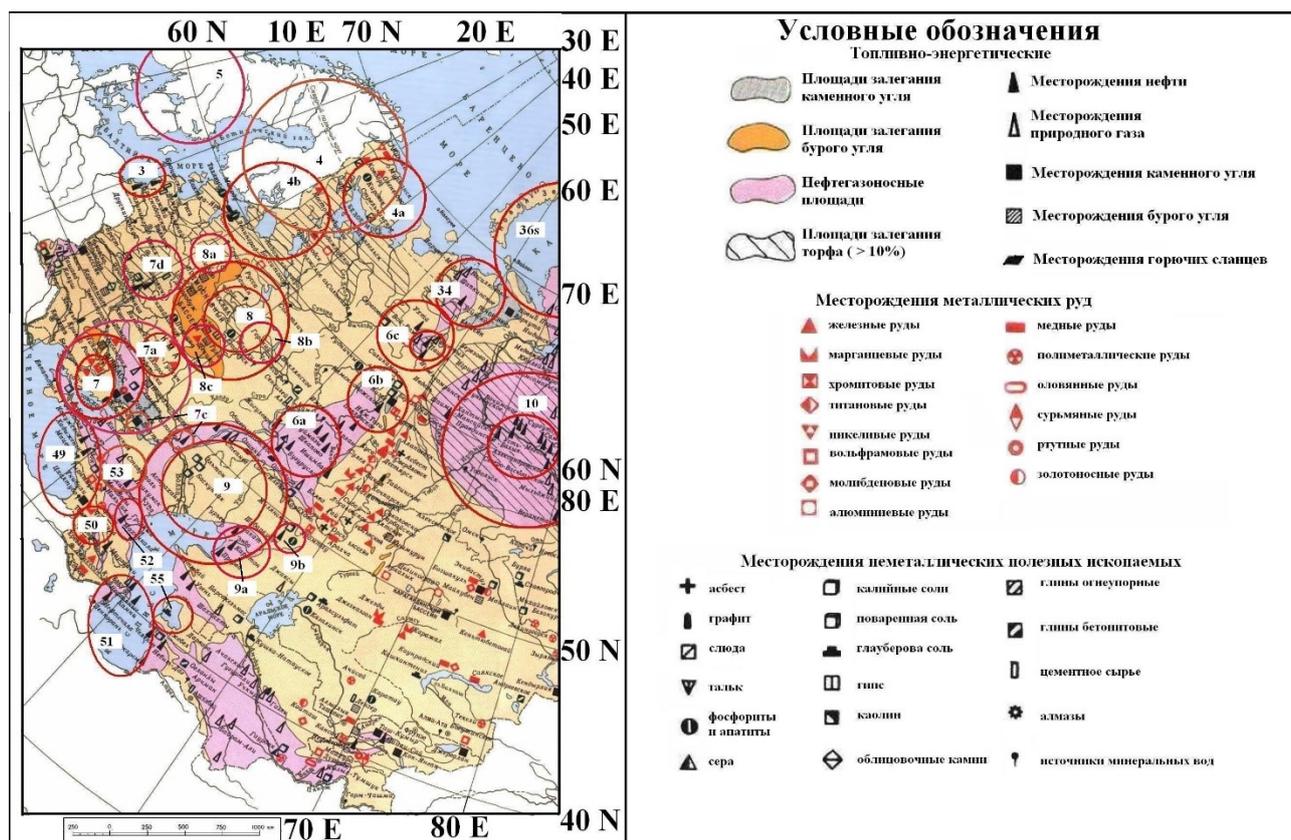


Рис. 5. Фрагмент карты полезных ископаемых территории СССР [10]. Окружностями отмечены кольцевые геоморфологические структуры, коррелирующие с нефтегазовыми провинциями на юге Русской плиты: 6а – Волго-Уральская; 7 – Скифская; 7с – Шахтинская; 9 – Прикаспийская; 9а – Эмбенская; 9б – Южно-Уральская; 10 – Ноябрьская; 34 – Печорская; 36с – Южно-Карская; 49 – Восточно-Черноморская; 50 – Закавказские; 51 – Южно-Каспийская; 52 – Грозненская; 53 – Ставропольские; 54 – Ростово-Элистинские; 55 – Кара-Богаз-Гольская / Fig. 5. Fragment of the map of minerals of the territory of the USSR [10]. Circular geomorphological structures correlating with oil and gas provinces on south of Russian Plate are marked: 6a - Volga-Ural; 7 - Scythian; 7c - Shakhty; 9 - Pre-Caspian; 9a - Emben; 9b - South Ural; 10 - November; 34 - Pechor; 36s - South Karsky; 49 - East Black Sea; 50 - Transcaucasian; 51 - South Kaspiysk; 52 - Grozny; 53 - Stavropol; 54 - Rostov-Elista; 55 - Kara-Bogaz-Gol

Список источников

1. Хаин В.Е. Загадки кольцевых структур // Основные проблемы современной геологии. М.: Научный мир, 2003. С. 242–259.
2. Соловьев В.В. Карта структур центрального типа территории СССР. Масштаб 1:10000000 (объяснительная записка). Л.: ВСЕГЕИ, 1982. 44 с.
3. Валяев Б.М. Углеродородная дегазация Земли, геотектоника и происхождение нефти и газа (признание и развитие идей П.Н. Кропоткина). Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений // Материалы Всерос. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения П.Н. Кропоткина. М.: ГЕОС, 2011. С. 10–32.
4. Смирнова М.Н. Нефтегазоносные кольцевые структуры и научно-методические аспекты их изучения // Геология нефти и газа. 1997. № 9. С. 35–40.
5. Смирнов Я.Б. Карта теплового потока территории СССР и сопредельных районов. М.: ГУГК, 1980. 1 с.
6. Брюханов В.Н., Глуховский Н.З., Ставцев А.Л. Кольцевые структуры Земли // Природа. 1977. № 10. С. 54–65.
7. Ботт М. Внутреннее строение Земли. М.: Мир, 1974. 375 с.
8. Гаврилов С.В. Проникновение теплового диапира в континентальную литосферную плиту из неьютоновской верхней мантии // Физика Земли. 1994. № 7–8. С. 18–26.

9. Тимурзиев А.И. Миф «энергетического голода» от Хабберта и пути воспроизводства ресурсной базы России на основе реализации проекта «Глубинная нефть» // Бурение и нефть. 2019. № 1. С. 12–20. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37088023> (дата обращения: 22.05.2022).

10. Колосова Л.Н. Карта полезных ископаемых России. М.: ГУГК, 1982. 1 л.

References

1. Khain V.E. Riddles of ring structures. *Basic Problems of Modern Geology*. Moscow: Nauchnyi mir Publ.; 2003:242-259. (In Russ.).

2. Solovyev V.V. *Map of structures of the central type of the territory of the USSR. Scale 1:10000000 (Explanatory note)*. Leningrad: Russian Geological Research Institute Press; 1982. 44 p. (In Russ.).

3. Valyaev B.M. Hydrocarbon degassing of the Earth, geotectonics and the origin of oil and gas (recognition and development of the ideas of P.N. Kropotkin). *Degassing of the Earth and the genesis of oil and gas fields*. Proceedings of the All-Russian Conference, dedicated 100th anniversary of the birth of P.N. Kropotkin. Moscow: GEOS Publ.; 2011:10-32. (In Russ.).

4. Smirnova M.N. Oil and gas bearing ring structures and scientific and methodological aspects of their study. *Geologiya nefti i gaza = Geology of Oil and Gas*. 1997;(9):35-40. (In Russ.).

5. Smirnov Ya.B. *Heat flow map of the USSR and adjacent areas*. Moscow: Main Directorate of Geodesy and Cartography Press; 1980. 1 p. (In Russ.).

6. Bryukhanov V.N., Glukhovskiy M.Z., Stavtsev A.L. The ring structures of the Earth. *Priroda = Nature*. 1977;(10):54-65. (In Russ.).

7. Bott M. *The internal structure of the Earth*. Moscow: Mir Publ.; 1974. 375 p. (In Russ.).

8. Gavrilov S.V. Penetration of the thermal diapir into the continental lithospheric plate from the non-Newtonian upper mantle. *Fizika Zemli = Physics of the Earth*. 1994;(7-8):18-26. (In Russ.).

9. Timurziev A.I. The myth of “energy hunger” from Hubbert and the ways of reproduction of the resource base of Russia on the basis of the implementation of the project “Deep Oil”. *Burenie i neft' = Drilling and Oil*. 2019;(1):12-20. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37088023> [Accessed 22th May 2022]. (In Russ.).

10. Kolosova L.N. *The map of mineral deposits in the territory of the USSR*. Moscow: Main Directorate of Geodesy and Cartography Press; 1982. 1 p. (In Russ.).

Информация об авторе

А.Л. Харитонов – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория главного магнитного поля Земли.

Information about the author

A.L. Kharitonov – Candidate of Science (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Department of Main Geomagnetic Field of Earth.

Статья поступила в редакцию 14.06.2022; одобрена после рецензирования 30.06.2022; принята к публикации 15.11.2022.
The article was submitted 14.06.2022; approved after reviewing 30.06.2022; accepted for publication 15.11.2022.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 631.525:635.9

doi: 10.18522/1026-2237-2022-4-2-108-117

ОСОБЕННОСТИ ФЕНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ИНТРОДУКЦИИ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА *HYDRANGEA* В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕГО ПРЕДУРАЛЬЯ

Надежда Михайловна Кузьмина^{1✉}, Александр Владимирович Федоров²,
Никита Владимирович Николаев³

^{1, 2} Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН, Ижевск, Россия

³ Ижевская государственная сельскохозяйственная академия, Ижевск, Россия

¹ kuzmina1956@mail.ru ✉

² udmgarden@mail.ru

³ nikitos_1240@mail.ru

Аннотация. Представители рода *Hydrangea* L. являются декоративно-цветущими кустарниками. Из-за недостаточной изученности биоэкологических особенностей виды и сорта представителей рода *Hydrangea* в Среднем Предуралье используются пока редко. Объектами исследования являются 14 сортов и видов рода *Hydrangea*, которые были высажены в коллекции отдела интродукции и акклиматизации растений УдмФИЦ УрО РАН, г. Ижевск, в 2017 г. Цель исследований – изучение биоэкологических особенностей новых для региона видов и сортов представителей рода *Hydrangea* для перспективности интродукции в условиях Среднего Предуралья. В работе представлены результаты фенологических наблюдений в 2019–2021 гг. по трем основным фазам для цветущих кустарников: начало вегетации, начало и конец цветения. Представлена характеристика климатических условий данного периода исследований. Выявлены аномальные периоды для развития растений (дефицит влаги на фоне высоких дневных температур, прохладные май и июнь), складывающиеся в период вегетации в условиях Среднего Предуралья, и их влияние на декоративность исследуемых растений. Отмечено, что начало вегетации представителей рода *Hydrangea* зависит от перехода среднесуточной температуры выше +10 °С. Дефицит влаги во время вегетации действует отрицательно на развитие растений и качество цветения. Важным свойством для цветущих кустарников является длительность цветения. Самое длительное суммарное цветение за три года наблюдений – более 300 сут у *H. paniculata* Вимс Ред, *H. petiolaris* Petiolaris, *H. arborescens* Анабель. Более 200 сут за три года цвели почти все исследуемые сорта *H. paniculata*, кроме сорта Пинк Даймонд и *H. serrata* Блюберд. По результатам исследований (2019–2021 гг.) в качестве перспективных (I, II группы) для зеленого строительства в городах Среднего Предуралья было определено 8 представителей рода *Hydrangea*, набравших по интегральной оценке перспективности интродукции более 75 баллов и имеющих хорошую декоративность: *H. paniculata* Лайм Лайт, Пинки Винки, Даймонд Рунж, Вимс Ред, Ванилла Фрайз; *H. serrata* Блюберд; *H. arborescens*; *H. petiolaris* Petiolaris. В группу менее перспективных и малоперспективных отнесены исследуемые сорта *H. macrophylla* Nikko Blue, Teller Blue, Tivoli и *H. quercifolia* Эпплоуз, использование которых в озеленении возможно с применением укрытия на зиму.

Ключевые слова: цветущие кустарники, представители рода *Hydrangea*, фенология, климатические условия, зимостойкость, качество цветения, оценка жизнеспособности, перспективность использования

© Кузьмина Н.М., Федоров А.В., Николаев Н.В., 2022

Для цитирования: Кузьмина Н.М., Федоров А.В., Николаев Н.В. Особенности фенологии и перспективность интродукции представителей рода *Hydrangea* в условиях Среднего Предуралья // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 4-2. С. 108–117.

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

Original article

FEATURES OF PHENOLOGY AND PROSPECTS FOR THE INTRODUCTION OF REPRESENTATIVES OF THE GENUS *HYDRANGEA* IN THE CONDITIONS OF THE MIDDLE URALS

Nadezhda M. Kuzmina^{1✉}, Alexander V. Fedorov², Nikita V. Nikolaev³

^{1,2}Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia,

³Izhevsk State Agricultural Academy

¹kuzmina1956@mail.ru ✉

²udmgarden@mail.ru

³nikitos_1240@mail.ru

Abstract. Representatives of the genus *Hydrangea* L. are ornamental flowering shrubs. Due to insufficient knowledge of bioecological features, species and varieties of representatives of the genus *Hydrangea* in the Middle Urals are still rarely used. The objects of the study are 14 varieties and species of the genus *Hydrangea*, which were planted in the collection of the Department of Plant Introduction and Acclimatization of the UdmFIC, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, in 2017. The aim of the research is to study the bioecological features of new species and varieties of representatives of the genus *Hydrangea* for the prospects of introduction in the conditions of the Middle Urals. The paper presents the results of phenological observations in the period 2019-2021 for three main phases for flowering shrubs: the beginning of vegetation, the beginning and the end of flowering. The characteristic of climatic conditions of this research period is presented. Abnormal periods for plant development (lack of moisture against the background of high daytime temperatures, cool May and June) and their effect on decorative during the growing season in the conditions of the Middle Urals and their influence on the decorative properties of the studied plants. It is noted that the beginning of vegetation of representatives of the genus *Hydrangea* depends on the transition of the average daily temperature above +10 °C. The lack of moisture during the growing season has a negative effect on the development of plants and on the quality of flowering. An important property for flowering shrubs is the duration of flowering. The longest total flowering over three years of observations is more than 300 days in *H. paniculata* Weems Ed, *H. petiolaris* Petiolaris, *H. arborescens* Anabel. For more than 200 days in three years, almost all the studied varieties of *H. paniculata* bloomed, except for the Pink Diamond and *H. serrata* Bluebird varieties. According to the results of research (2019-2021), 8 representatives of the genus *Hydrangea* were identified as promising (group I, II) for green construction in the cities of the Middle Urals, who scored more than 75 points according to the integral assessment of the prospects of introduction and have good decorative properties: *H. paniculata* Lime Light, Pinkie Winky, Diamond Runge, Weems Red, Vanilla Frise; *H. serrata* Bluebird; *H. arborescens*; *H. petiolaris* Petiolaris. The studied varieties of *H. macrophylla* Nikko Blue, Teller Blue, Tivoli and *H. quercifolia* Applose are included in the group of less promising and unpromising ones, the use of which in landscaping is possible with the use of shelter for the winter.

Keywords: flowering shrubs, representatives of the genus *Hydrangea*, phenology, climatic conditions, winter hardiness, flowering quality, viability assessment, prospects for use

For citation: Kuzmina N. M., Fedorov A.V., Nikolaev N.V. Features of Phenology and Prospects for the Introduction of Representatives of the Genus *Hydrangea* in the Conditions of the Middle Urals. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2022;(4-2):108-117. (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

Семейство гортензиевые (*Hydrangeaceae* Dumort.) включает 19 родов и 260 видов красивоцветущих древесных растений, распространенных главным образом в Северной Америке и Восточной Азии [1]. Первые представители семейства гортензиевых появились в Европе в XVIII в. Гортензия привезена из Китая английским ботаником Д. Банксом в 1789 г. [2]. В 1820 г. гортензию завезли в Европу из Японии, а с 1900 г. началась ее селекция [3]. В странах Европы, Канаде, Японии и Америке представители рода *Hydrangea* L. широко используются в ландшафтном строительстве [4]. Культивируя новые виды интродуцентов, необходимо знать степень адаптивности конкретного вида к неблагоприятным абиотическим и биотическим факторам окружающей среды, условия произрастания видов в природе [5–7].

Фитонцидная активность (ФА) является важным свойством растений при озеленении урбано-среды. Фитонциды даже в небольших дозах способны подавлять развитие вредных организмов в воздушной среде. Научными сотрудниками Воронежской государственной лесотехнической академии проведены исследования ФА красивоцветущих кустарников на базе коллекции Ботанического сада ВГУ. За основу взят метод Токина (1980). К группе с высокой ФА по шкале, ранее разработанной сотрудниками Воронежской государственной лесотехнической академии, отнесена *H. paniculata* (68 %). Соцветия *H. paniculata* также являются источником фитонцидов (18 %) [8–10]. Декоративность видов *Hydrangea* зависит от формы и размеров соцветий. Известно, что на качество и размер соцветий влияют климатические условия вегетационного периода в период формирования растения [11, 12].

Из-за недостаточной изученности биоэкологических особенностей виды и сорта представителей рода *Hydrangea* в Среднем Предуралье используются пока редко. Разнообразие представителей рода *Hydrangea* позволяет создавать высокодекоративные композиции для оформления кратковременных мест отдыха горожан [13, 14]. Поэтому актуальна необходимость изучения фенологических данных и зимостойкости новых видов и сортов представителей рода *Hydrangea* для перспективности использования в ландшафтном дизайне садов, парков и скверов в условиях Среднего Предуралья.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются 14 сортов и видов рода *Hydrangea*, которые были высажены в коллекции отдела интродукции и акклиматизации растений УдмФИЦ УрО РАН, г. Ижевск, в 2017 г.: *H. paniculata*, сорта Limelight, Pinky Winky, Wims Red, Vanille Fraise, Diamond Rouge, Pink Diamond; *H. serrata* Bluebird; *H. petiolaris* Petiolaris; *H. arborescens* Annabelle; *H. macrophylla*, сорта Nikko Blue, Teller Blue, Tivoli и *H. quercifolia* Applause.

Коллекция высажена на участок, по периметру которого растут старовозрастные *Betula pubescens* Ehrh. на расстоянии 2–5 м от стволов насаждений. В засушливую погоду представители коллекции *Hydrangea* произрастают с дефицитом влагообеспечения, так как поверхностная корневая система *B. pubescens* имеет преимущество в конкуренции за влагу.

В годы исследования (2019–2021 гг.) по метеорологическим данным отмечены вегетационные периоды с различной характеристикой [15].

Вегетационный период 2021 г. можно охарактеризовать как жаркий, с периодами высоких дневных температур в пределах +25...+33 °С (от 20 до 28 дней) с мая по август, с дефицитом влаги в мае, июне и августе [15]. Данные условия можно назвать аномальными для произрастания растений Среднего Предуралья.

Вегетационный период 2019 г. характеризуется избыточным влагообеспечением в мае, июле и августе, прохладными ночными температурами (ниже +10 °С в 15–16 случаях за месяц) в июне и августе [15].

Вегетационный период 2020 г. характеризуется прохладным июнем с дефицитом влаги (45 % от нормы), теплым июлем с избытком влагообеспечения (170 % от нормы) и прохладным августом с дефицитом влагообеспечения (55 % от нормы) [15]. Для теплолюбивых пород это – менее благоприятный вегетативный период, чем в 2019 г., из-за прохладного июня с дефицитом влаги и более благоприятный, чем в 2021 г., по влагообеспечению.

Фенологические наблюдения проведены на территории УдмФИЦ УрО РАН, в отделе интродукции и акклиматизации растений, в период 2019–2021 гг. по трем основным фазам для красивоцветущих кустарников (начало вегетации, начало и конец цветения). За основу взята общепринятая методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР [16].

Для интегральной оценки перспективности интродукции использовали методику, разработанную в ГБС РАН [17]. Используемые показатели, полученные по данным визуальных наблюдений, представлены в табл. 1, шкала оценки перспективности интродукции растений по полученной сумме баллов – в табл. 2.

Результаты исследований

По итогам фенологических наблюдений в табл. 3 представлена сравнительная характеристика фенологических данных начала вегетации представителей рода *Hydrangea* в период 2019–2021 гг.

Таблица 1 / Table 1

Оценка жизнеспособности и перспективности интродуцируемых растений по данным визуальных наблюдений / Assessment of viability and prospects of introduced plants according to visual observations

| Показатель | Характеристика показателя | Балл |
|---|---|------|
| Одревеснение побегов, % длины | 100 | 20 |
| | 75 | 15 |
| | 50 | 10 |
| | 25 | 5 |
| | Не одревесневает | 1 |
| Зимостойкость | I. Растение не обмерзает | 25 |
| | II. Обмерзает не более 50 % длины однолетних побегов | 20 |
| | III. Обмерзает от 50 до 100 % длины однолетних побегов | 15 |
| | IV. Обмерзают более старые побеги | 10 |
| | V. Растение обмерзает до уровня снега | 5 |
| | VI. Растение обмерзает до корневой шейки | 3 |
| | VII. Растение вымерзает целиком | 1 |
| Сохранение формы роста (габитуса) | Сохраняется | 10 |
| | Восстанавливается | 5 |
| | Не восстанавливается | 1 |
| Побегообразовательная способность | Высокая – 6 и более побегов на 1 двухлетний побег | 5 |
| | Средняя – побегов достаточно для сохранения типичной жизненной формы и габитуса – 3–5 побегов | 3 |
| | Низкая – новые побеги единичны, утрата типичной жизненной формы и габитуса | 1 |
| Прирост в высоту | Ежегодный | 5 |
| | Не ежегодный | 2 |
| Способность к генеративному размножению | Семена созревают | 25 |
| | Семена не созревают | 20 |
| | Цветет, не плодоносит | 15 |
| | Не цветет | 1 |
| Способы размножения в культуре | Самосев | 10 |
| | Искусственный посев | 7 |
| | Естественное вегетативное размножение | 5 |
| | Искусственное вегетативное размножение | 3 |
| | Привлечение семян или растений из других районов | 1 |

Таблица 2 / Table 2

**Шкала оценки перспективности интродукции растений по полученной сумме баллов
/ The scale of evaluation of the prospects of plant introduction according to the received sum of points**

| Индекс | Значение индекса | Сумма баллов |
|--------|-----------------------|--------------|
| I | Вполне перспективные | 91–100 |
| II | Перспективные | 76–90 |
| III | Менее перспективные | 61–75 |
| IV | Малоперспективные | 41–60 |
| V | Неперспективные | 21–40 |
| VI | Абсолютно непригодные | 5–15 |

Таблица 3 / Table 3

**Сравнительная характеристика фенологических данных начала вегетации представителей
рода *Hydrangea* в период 2019–2021 гг. / Comparative characteristics of the phenological data
of the beginning of vegetation of representatives of the genus *Hydrangea* in the period 2019-2021**

| № | Сортотип | Дата начала вегетации | | |
|----|------------------------------------|-----------------------|-------|-------|
| | | 2019 | 2020 | 2021 |
| 1 | <i>H. paniculata</i> Пинк Даймонд | 06.05 | 05.05 | 03.05 |
| 2 | <i>H. paniculata</i> Лайм Лайт | 06.05 | 05.05 | 27.04 |
| 3 | <i>H. paniculata</i> Пинки Винки | 06.05 | 02.05 | 27.04 |
| 4 | <i>H. paniculata</i> Диамонд Рунж | 06.05 | 02.05 | 27.04 |
| 5 | <i>H. paniculata</i> Вимс Ред | 06.05 | 02.05 | 27.04 |
| 6 | <i>H. paniculata</i> Ванилла Фрайз | 06.05 | 02.05 | 27.04 |
| 7 | <i>H. serrata</i> Блюберд | 06.05 | 02.05 | 27.04 |
| 8 | <i>H. macrophylla</i> Нико Блю | 10.05 | 08.05 | 27.04 |
| 9 | <i>H. quercifolia</i> Эпплоуз | 12.05 | 11.05 | 08.05 |
| 10 | <i>H. macrophylla</i> Тиволи | 08.05 | 05.05 | 27.04 |
| 11 | <i>H. petiolaris</i> Petiolaris | 28.04 | 27.04 | 20.04 |
| 12 | <i>H. macrophylla</i> Теллер Блю | 08.05 | 02.05 | 27.04 |
| 13 | <i>H. arborescens</i> Анабель | 06.05 | 02.05 | 27.04 |
| 14 | <i>H. macrophylla</i> * (синяя) | - | 06.05 | 27.04 |

* – сорт неизвестен.

По полученным данным фенологических наблюдений можно отметить, что почти у всех исследованных представителей рода *Hydrangea* начало вегетации 2019–2020 гг. зафиксировано в первой декаде мая. В 2020 г. начало вегетации произошло раньше на 1–4 сут, чем в 2019 г. Раньше распустились почки у *H. petiolaris* – 28.04.2019 и 27.04.2020. Исходя из данных таблицы, только в 2020 г. два сорта *H. paniculata* Пинк Даймонд и Лайм Лайт начали вегетацию на 3 дня позже, чем *H. arborescens* Анабель, а в 2021 г. только *H. paniculata* Пинк Даймонд начал вегетацию на 7 дней позже. По средним температурным показателям май 2019 и 2020 гг. был примерно одинаковый – теплый. По влажности 2020 г. был более засушливый, осадков выпало менее нормы – 74 %. Переход среднесуточной температуры на активные (+10 °C) в 2019 г. произошел 3 мая, а в 2020 г. – 27 апреля. В 2019 г. в конце апреля отмечено понижение ночных температур до –5 °C [15]. Можно предположить, что на начало вегетации повлияла дата перехода среднесуточной температуры на активные (+10 °C) и ночные заморозки в конце апреля. Дефицит влаги в начале весны на начало вегетации не повлиял.

Начало вегетации в 2021 г. почти у всех исследованных представителей рода *Hydrangea* отмечено 27 апреля, что раньше на 9 сут, чем в 2019 г., и на 5 сут, чем в 2020 г. Апрель 2021 г. был аномально тёплый. В середине апреля температура днем поднималась до 20 °C и выше. Последние ночные заморозки отмечены 21 апреля (–2,2 °C). Переход среднесуточной температуры через активные +10 °C в 2021 г. зафиксирован 14 апреля, это раньше, чем в 2020 г., на 13 сут и на 19 сут, чем в 2019 г. Осадков выпало ниже нормы (46 %) [15].

Можно сделать вывод, что начало вегетации представителей рода *Hydrangea* зависит от перехода среднесуточной температуры выше +10 °С.

Для красивоцветущих растений важным качеством является длительность цветения. В табл. 4 приведена фенология цветения (начало и конец) исследованных представителей рода *Hydrangea* в период 2019–2021 гг.

Таблица 4 / Table 4

Фенология цветения исследуемых представителей рода *Hydrangea* в период 2019–2021 гг.
/ Phenology of flowering of the studied representatives of the genus *Hydrangea* in the period 2019-2021

| Сортотип | Цветение | | |
|------------------------------------|----------------|-------------|-------------|
| | 2019 | 2020 | 2021 |
| | Начало – конец | | |
| <i>H. paniculata</i> Пинк Даймонд | 21.08–16.10 | Нет | 20.07–03.10 |
| <i>H. paniculata</i> Лайм Лайт | 30.07–16.10 | 25.07–16.10 | 16.07–03.10 |
| <i>H. paniculata</i> Пинки Винки | 24.07–16.10 | 24.07–16.10 | 12.07–03.10 |
| <i>H. paniculata</i> Диамонд Рунж | 13.07–16.10 | Нет | 30.06–03.10 |
| <i>H. paniculata</i> Вимс Ред | 08.07–16.10 | 15.07–16.10 | 28.06–03.10 |
| <i>H. paniculata</i> Ванилла Фрайз | 25.07–16.10 | 02.08–16.10 | 28.06–03.10 |
| <i>H. serrata</i> Блюберд | 02.07–16.10 | 05.07–16.10 | 21.06–10.09 |
| <i>H. macrophylla</i> Нико Блю | 23.07–16.10 | Нет | Нет |
| <i>H. quercifolia</i> Эпплоуз | Нет | Нет | Нет |
| <i>H. macrophylla</i> Тиволи | Нет | Нет | Нет |
| <i>H. petiolaris</i> Petiolaris | 11.06–16.10 | 13.06–16.10 | 02.06–15.09 |
| <i>H. macrophylla</i> Теллер Блю | Нет | Нет | Нет |
| <i>H. arborescens</i> Анабель | 02.07–16.10 | 01.07–16.10 | 16.06–03.10 |
| <i>H. macrophylla</i> * (синяя) | Нет | 28.07–16.10 | 18.07–03.10 |

* – сорт неизвестен.

Самое раннее цветение в период исследований отмечено у *H. petiolaris* Petiolaris 2, 11 и 13 июня. На втором месте – *H. serrata* Блюберд, у которой в 2019–2020 гг. цветение началось в первых числах июля (2 и 5 июля), а в 2021 г. начало цветения из-за теплого апреля отмечено 21 июня.

У *H. paniculata* в 2019–2020 гг. в зависимости от сортовой принадлежности начало цветения отмечено с 8 июля по 21 августа. Позже всех зацвела *H. paniculata* Пинк Даймонд (21 августа), произрастающая на самом близком расстоянии от березы. В 2020 г. у *H. paniculata* Пинк Даймонд цветение отсутствовало. У представителей *H. paniculata* начало цветения в основном отмечено во второй половине июля. Самое раннее цветение в 2019–2020 гг. наблюдали у *H. paniculata* Вимс Ред – с 8 и 15 июля. В 2021 г. у всех исследуемых *Hydrangea* начало цветения отмечено на 15–30 дней раньше, чем в 2019–2020 гг.

Можно сделать вывод, что начало цветения зависит от метеорологических условий, от видовых и сортовых особенностей.

В 2019 г. не цвели сорта трех видов гортензии, так как не достигли генеративного развития: *H. quercifolia* Эпплоуз, *H. macrophylla* Тиволи, *H. macrophylla* Теллер Блю. Сорта других видов гортензий по шкале декоративности получили от 49 до 73 баллов [18]. Близость произрастания представителей рода *Hydrangea* от *B. pubescens* (2–4 м) отрицательно повлияла на общую оценку по шкале декоративности. *H. paniculata* Pink Diamond, *H. arborescens* набрали от 49 до 60 баллов. Несмотря на то что *H. serrata* редко используется в ландшафтном строительстве из-за слабой морозостойкости, у исследуемого сорта Блюберд отмечена хорошая морозостойкость. Наблюдалось раннее цветение по сравнению с сортами других видов на 2–3 недели. Зафиксировано самое продолжительное цветение в 2019–2020 гг. (более 100 сут). В 2021 г. дефицит влагообеспечения в мае, июне и августе отрицательно сказался на продолжительности цветения, окончание периода цветения отмечено 10 сентября. Однако в предыдущие два года цветение продолжалось до заморозков (16 октября). Хорошее развитие и красивое цветение (67–70 баллов) имели представители *H. paniculata* сортов Limelight, Пинки Винки, Diamond rouge, Ванилла Фрайз. Исследованные представители рода *Hydrangea*, набравшие 67–73 баллов, произрастают в удалении от *B. pubescens* на 5–6 м.

В июне 2020 г. отмечены дефицит влагообеспечения (выпало 46 % от нормы) и прохладная погода [15]. Данные климатические условия особенно сильно повлияли на *H. paniculata* Pink Diamond и *H. paniculata* Диамонд Рунж, которые произрастают на самом близком расстоянии от *B. pubescens* (2 м). Цветения у этих гортензий не отмечено. У остальных представителей рода *Hydrangea* цветение было слабее, чем в 2019 г. В 2021 г. цветение было обильным у всех *H. paniculata*. Дефицит влаги в мае и июне повлиял отрицательно на цветение *H. serrata* Блюберд и *H. petiolaris*.

В табл. 5 представлена суммарная длительность цветения за три исследуемых года (2019–2021 гг.).

Таблица 5 / Table 5

Длительность цветения исследуемых представителей рода *Hydrangea*
/ Duration of flowering of the studied representatives of the genus *Hydrangea*

| Вид, сорт | Длительность цветения, дней | | | |
|------------------------------------|-----------------------------|---------|---------|---------------|
| | 2019 г. | 2020 г. | 2021 г. | 2019–2021 гг. |
| <i>H. paniculata</i> Пинк Даймонд | 57 | 0 | 89 | 146 |
| <i>H. paniculata</i> Лайм Лайт | 79 | 84 | 93 | 256 |
| <i>H. paniculata</i> Пинки Винки | 85 | 85 | 97 | 267 |
| <i>H. paniculata</i> Диамонд Рунж | 96 | 0 | 109 | 205 |
| <i>H. paniculata</i> Вимс Ред | 101 | 94 | 111 | 306 |
| <i>H. paniculata</i> Ванилла Фрайз | 84 | 76 | 111 | 271 |
| <i>H. serrata</i> Блюберд | 108 | 104 | 82 | 294 |
| <i>H. macrophylla</i> Нико Блю | 86 | 0 | 0 | 86 |
| <i>H. quercifolia</i> Эпплоуз | 0 | 0 | 0 | 0 |
| <i>H. macrophylla</i> Тиволи | 0 | 0 | 0 | 0 |
| <i>H. petiolaris</i> Petiolaris | 128 | 126 | 106 | 360 |
| <i>H. macrophylla</i> Теллер Блю | 0 | 0 | 0 | 0 |
| <i>H. arborescens</i> Анабель | 107 | 108 | 110 | 325 |
| <i>H. macrophylla</i> * (синяя) | - | 81 | 91 | 172 |

* – сорт неизвестен.

По данным табл. 5 самое длительное суммарное цветение за три года наблюдений, более 300 сут, отмечено у *H. paniculata* Вимс Ред, *H. petiolaris* Petiolaris, *H. arborescens* Анабель. Более 200 сут цвели почти все исследуемые сорта *H. paniculata*, кроме сорта Пинк Даймонд и *H. serrata* Блюберд. *H. paniculata* Пинк Даймонд произрастает на самом близком расстоянии от *B. pubescens* (2 м), поэтому больше всех страдает от дефицита влаги.

По результатам исследований (2019–2021 гг.) в качестве наиболее перспективных претендентов, набравших по оценке декоративности более 50 баллов и ежегодно цветущих, можно отметить 6 сортов, принадлежащих к разным видам: *H. paniculata* Лайм Лайт, Пинки Винки, Вимс Ред, Ванилла Фрайз, *H. serrata* Блюберд, *H. arborescens* Анабель. Данные таксоны имели высокий балл зимостойкости (5) и, несмотря на некомфортные условия произрастания для представителей рода *Hydrangea* в годы наблюдений (дефицит влаги, прохладные май и июнь), каждый год цвели.

Дефицит влаги во время вегетации действует отрицательно на развитие растения и на качество цветения. Поэтому высаживать гортензию рядом с деревьями с поверхностной корневой системой (береза, тополь) на расстоянии ближе 5 м не рекомендуется [18].

Оценка жизнеспособности и перспективности интродуцируемых сортов и видов рода *Hydrangea* была проведена по данным визуальных наблюдений по методике, разработанной в ГБС РАН [17]. На основе анализа показателей жизнеспособности растений и суммы баллов проведена предварительная оценка перспективности интродукции (табл. 6).

По сумме баллов интегральной оценки перспективности (табл. 6) выделено четыре группы перспективности интродукции представителей рода *Hydrangea*. В группу вполне перспективных (I) вошла только *H. arborescens* Анабель, которая издавна выращивается в садах и парках городов Среднего Предуралья. В группу перспективных (II) вошли менее известные представители рода *Hydrangea*: *H. paniculata* Пинк Даймонд, Лайм Лайт, Пинки Винки, Диамонд Рунж, Вимс Ред, Ванилла Фрайз, *H. serrata* Блюберд, *H. petiolaris* Petiolaris.

Таблица 6 / Table 6

Интегральная оценка перспективности интродукции представителей рода *Hydrangea*
/ Integral assessment of the prospects for the introduction of representatives of the genus *Hydrangea*

| Вид, сорт | ОП | З | СФР | ПС | ПВ | СГР | СРК | ОО | ГП |
|------------------------------------|----|----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|
| <i>H. paniculata</i> Пинк Даймонд | 20 | 20 | 10 | 3 | 5 | 20 | 3 | 81 | II |
| <i>H. paniculata</i> Лайм Лайт | 20 | 25 | 10 | 5 | 5 | 20 | 3 | 88 | II |
| <i>H. paniculata</i> Пинки Винки | 20 | 20 | 10 | 5 | 5 | 20 | 3 | 88 | II |
| <i>H. paniculata</i> Диамонд Рунж | 20 | 25 | 10 | 3 | 5 | 20 | 3 | 86 | II |
| <i>H. paniculata</i> Вимс Ред | 20 | 25 | 10 | 5 | 5 | 20 | 3 | 88 | II |
| <i>H. paniculata</i> Ванилла Фрайз | 20 | 25 | 10 | 3 | 5 | 20 | 3 | 86 | II |
| <i>H. serrata</i> Блюберд | 15 | 20 | 10 | 3 | 5 | 20 | 3 | 76 | II |
| <i>H. macrophylla</i> Нико Блю | 15 | 20 | 5 | 3 | 5 | 15 | 1 | 64 | III |
| <i>H. quercifolia</i> Эпплоуз | 15 | 20 | 5 | 3 | 5 | 1 | 1 | 50 | IV |
| <i>H. macrophylla</i> Тиволи | 10 | 15 | 5 | 3 | 5 | 1 | 1 | 50 | IV |
| <i>H. petiolaris</i> Petiolaris | 20 | 25 | 10 | 5 | 5 | 25 | 3 | 83 | II |
| <i>H. macrophylla</i> Теллер Блю | 15 | 15 | 5 | 3 | 5 | 1 | 1 | 45 | IV |
| <i>H. arborescens</i> Анабель | 20 | 25 | 10 | 5 | 5 | 25 | 5 | 95 | I |
| <i>H. macrophylla</i> * (синяя) | 15 | 20 | 10 | 5 | 5 | 15 | 1 | 71 | III |

Примечание. ОП – одревеснение побегов; З – зимостойкость; СФР – сохранение формы роста; ПС – побегообразовательная способность; ПВ – прирост в высоту; СГР – способность к генеративному размножению; СРК – способы размножения в культуре; ОО – общая оценка; ГП – группа перспективности; * – сорт неизвестен.

Эти представители рода *Hydrangea* имеют высокую оценку зимостойкости и зимуют без укрытия при низких температурах (-30°C). *H. serrata* Блюберд зимует под легким укрытием из спанбонда. Несмотря на различные по характеристике вегетационные сезоны с аномальными периодами (засуха на фоне высоких дневных температур), ежегодно цветёт. При оценке декоративных качеств эти таксоны также набирают высокий балл и отнесены к группе декоративных, кроме *H. paniculata* Пинк Даймонд. Данный таксон произрастает на самом близком расстоянии от *V. pubescens* и испытывает дефицит влаги в засушливые периоды [18]. При исследовании в Южно-Уральском ботаническом саду-институте Уфимского ФИЦ РАН *H. paniculata* Пинк Даймонд отмечен как менее морозоустойчивый, чем сорта Лайм Лайт, Пинки Винки, Вимс Ред, Ванилла Фрайз [19, 20]. В условиях г. Ижевска Удмуртской Республики *H. paniculata* Пинк Даймонд показала хорошую морозоустойчивость [18].

В группу менее перспективных и малоперспективных отнесены сорта *H. macrophylla* и *H. quercifolia* Эпплоуз. Они менее зимостойки, зимуют под легким укрытием из нетканого материала. Установлено обмерзание верхней части ветвей. Цветение отмечено не каждый год.

Заключение

По полученным данным фенологических наблюдений отмечено, что начало вегетации представителей рода *Hydrangea* зависит от перехода среднесуточной температуры выше $+10^{\circ}\text{C}$. Начало вегетации 2019–2020 гг. почти у всех исследованных представителей рода *Hydrangea* зафиксировано в первой декаде мая, а в 2021 г. из-за теплого апреля – 27 апреля.

Начало цветения зависит от видовых и сортовых особенностей представителей *Hydrangea* и метеорологических условий. Аномально теплый апрель 2021 г. повлиял на сроки начала цветения всех исследуемых *Hydrangea*. Цветение началось на 15–30 сут раньше, чем в 2019–2020 гг. Выявлено, что дефицит влаги влияет на длительность и качество цветения. Поэтому гортензию не рекомендуется высаживать ближе 5 м от стволов деревьев с поверхностной корневой системой (береза, тополь). Это важно учитывать при реконструкции имеющихся рекреационных зон для отдыха населения.

По результатам исследований (2019–2021 гг.) в качестве перспективных (I, II группы) претендентов для зеленого строительства в населенных местах Среднего Предуралья было отмечено 8 сортов разных видов представителей рода *Hydrangea*, набравших по интегральной оценке перспективности интродукции более 75 баллов и имеющих хорошую декоративность: *H. paniculata*

сорта Лайм Лайт, Пинки Винки, Диамонд Рунж, Вимс Ред, Ванилла Фрайз, *H. serrata* Блюберд, *H. arborescens* Анабель, *H. petiolaris* Petiolaris. Неблагоприятные климатические условия (дефицит влаги в 2021 г. и прохладные май и июнь в 2020 г.) снизили среднюю оценку декоративности всей коллекции на 10 баллов в 2020 г. и на 5 баллов – в 2021 г. [18].

В группу менее перспективных и малоперспективных отнесены сорта *H. Macrophylla* Нико Блю, Тиволи, Теллер Блю и *H. quercifoli* Эпплоуз. Данные таксоны необходимо укрывать на зиму.

Список источников

1. Тахтаджян А.Л. Система магнолиофитов. Л.: Наука, 1987. 439 с.
2. Цвелев Н.Н. Семейство гортензиевые, или гидрангиевые (Hydrangeaceae). Жизнь растений. М.: Провсвещение, 1981. Т. 5, ч. 2. С. 154–155.
3. Фомин Е.М. Гортензия. М.: Колос, 1967. 40 с.
4. Lombarts P. Eine Pflanze im Aufwind // Garten Praxis. 2000. № 4. URL: <http://www.websad.ru/> (дата обращения: 09.10.2021).
5. McClintock E. A monograph of the genus *Hydrangea* // Proceedings of the California Academy of Sciences, Fourth Series. 1957. Vol. 29 (5). P. 147–256.
6. Гортензия. Посадка и уход. URL: <https://flowertimes.ru/gortenziya/> (дата обращения: 04.04.2022).
7. Гортензия. URL: <http://ru.wikipedia.org> Гортензия (дата обращения 04.04.2022).
8. Кочергина М.В. Антимикробное воздействие лесонасаждений на компоненты окружающей среды // Математика. Образование. Экология. Гендерные проблемы : материалы Междунар. конф., 22–27 мая 2000 г. Воронеж, 2001. Т. 2. С. 365–370.
9. Кочергина М.В. К вопросу изучения бактерицидных свойств фитонцидов древесно-кустарных пород // Лес. Наука. Молодежь ВГЛТА-2002 : сб. материалов по итогам науч.-исслед. работы молодых ученых ВГЛТА за 2001–2002 годы. Воронеж: ВГЛТА, 2002. С. 90–95.
10. Кочергина М.В., Дарковская А.С. Фитонцидная активность интродуцентов в условиях Ботанического сада Воронежского государственного университета // Бюл. Ботанического сада Саратовского гос. ун-та. 2009. Т. 8. С. 164–168.
11. Кожеева И.М., Нехайченко Д.В., Творогов С.П. Структурные особенности соцветия *Hydrangea petiolaris* Siebold et Zucc // Вестн. ДВО РАН. 2018. Т. 3. С. 156–161.
12. Нехайченко Д.В. Модульная структура соцветий гортензии (*Hydrangea* L.): Особенности цветения и качества пыльцы // Вестн. ДВО РАН. 2020. Т. 2. С. 108–114. Doi: 10.37102/08697698.2020.210.2.014.
13. Полякова Н.Б., Мурзабулатова Ф.К. Ассортимент декоративных кустарников для создания сада непрерывного цветения в условиях Башкирского Предуралья // Аграрная Россия. 2017. Вып. 2. С. 10–17.
14. Хайрова Л.Н., Наумова А.А. Сравнительная оценка разных видов и сортов гортензии в условиях Ленинградской области // Вестн. студенческого науч. общества. 2018. Т. 9 (1). С. 119–122.
15. Архив погоды в Ижевске. 2021. Данные метеостанции (2019–2021 гг.) Ижевск, Россия (WMO ID)=28411. URL: <http://rp5.ru> Архив погоды в Ижевске (дата обращения: 23.09.2021).
16. Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР. М., 1975. 27 с.
17. Лапин П.И., Сиднева С.В. Оценка перспективности интродукции древесных растений по данным визуальных наблюдений. Опыт интродукции древесных растений. М.: Наука, 1973. С. 7–67.
18. Кузьмина Н.М., Федоров А.В. Сравнительная характеристика декоративности сортов и видов рода гортензия в зависимости от метеорологических условий в годы исследования (2019, 2020) в Среднем Предуралье // Вестн. рос. сельскохоз. науки. 2021. Т. 6. С. 19–22. Doi: 10.30850/vrtn/2021/6/19-22.
19. Мурзабулатова Ф.К., Полякова Н.Б. Интродукция сортов гортензий в Южно-Уральском ботаническом саду-институте Уфимского ФИЦ РАН // Субтропическое и декоративное садоводство. 2019. Т. 71. С. 84–91.
20. Мурзабулатова Ф.К. Биология видов и сортов рода гортензия (*Hydrangea* L.) при интродукции в Башкирском Предуралье : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Уфа, 2021. 19 с.

References

1. Takhtadzhyan A.L. *Magnoliophyte system*. Leningrad: Nauka Publ.; 1987. 439 p. (In Russ.).
2. Tsevelev N.N. *Family hydrangea, or hydrangia (Hydrangeaceae)*. *Plant life*. Moscow: Prosveshchenie Publ.; 1981;5(2):154-155. (In Russ.).
3. Fomin E.M. *Hydrangea*. Moscow: Kolos Publ.; 1967. 40 p. (In Russ.).
4. Lombarts P. Eine Pflanze im Aufwind. *Garten Praxis*. 2000;(4). Available from: <http://www.websad.ru/> [Accessed 9th October 2021].

5. McClintock E. A Monograph of the Genus *Hydrangea*. *Proceedings of the California Academy of Sciences, Fourth Series*. 1957;29(5):147-256.

6. *Hydrangea. Landing and care*. Available from: <https://flowertimes.ru/gortenziya> [Accessed 4th April 2022]. (In Russ.).

7. *Hydrangea*. Available from: <http://ru.wikipedia.org> Гортензия [Accessed 4th April 2022]. (In Russ.).

8. Kochergina M. V. Antimicrobial impact of forest plantations on environmental components. *Mathematics. Education. Ecology. Gender Issues*. Proceedings of the International Conference, May 22-27. Voronezh, 2001;2:365-370. (In Russ.).

9. Kochergina M. V. To the question of studying the bactericidal properties of phytoncides of woody-handicraft species. *Forest. The science. Youth VGLTA 2002*: Proceedings based on the results of the research work of young scientists of Voronezh State Forestry Academy for 2001-2002. Voronezh: Voronezh State Forestry Academy Press; 2002:90-95. (In Russ.).

10. Kochergina M. V., Darkovskaya A. S. Phytoncidal activity of introducers in the conditions of the Botanical Garden of Voronezh State University. *Byul. Botanicheskogo sada Saratovskogo gos. un-ta = Bulletin of the Botanical Garden of Saratov State University*. 2009;8:164-168. (In Russ.).

11. Koksheeva I. M., Nekhaychenko D. V., Tvorogov S. P. Structural features of the inflorescence of *Hydrangea petiolaris* Siebold et Zucc. *Vestn. DVO RAN = Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*. 2018;3:156-161. (In Russ.).

12. Nekhaychenko D. V. Modular structure of hydrangea (*Hydrangea* L.) inflorescences: features of flowering and pollen quality. *Vestn. DVO RAN = Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*. 2020;2:108-114, doi: 10.37102/08697698.2020.210.2.014. (In Russ.).

13. Polyakova N. B., Murzabulatova F. K. An assortment of ornamental shrubs for creating a garden of continuous flowering in the conditions of the Bashkir Urals. *Agrarnaya Rossiya = Agricultural Russia*. 2017;(2):10-17. (In Russ.).

14. Khairova L. N., Naumova A. A. Comparative evaluation of different types and varieties of hydrangea in the conditions of the Leningrad region. *Vestn. studencheskogo nauch. obshchestva = Bulletin of Student Scientific Society*. 2018;9(1):119-122. (In Russ.).

15. *Weather archive in Izhevsk. 2021*. Weather station data (2019-2021) Izhevsk, Russia, (WMO ID)=28411. Available from: <http://rp5.ru> Архив погоды в Ижевске [Accessed 23rd September 2021]. (In Russ.).

16. *Methods of phenological observations in the botanical gardens of the USSR*. Moscow, 1975. 27 p. (In Russ.).

17. Lapin P. I., Sidneva S.V. *Evaluation of the prospects for the introduction of woody plants according to visual observations. Experience in the introduction of woody plants*. Moscow: Nauka Publ.; 1973:7-67. (In Russ.).

18. Kuzmina N. M., Fedorov A. V. Comparative characteristics of decorative varieties and species of the genus *Hydrangea* depending on meteorological conditions during the years of study (2019, 2020) in the Middle Urals. *Vestn. Ros. sel'skokhoz. nauki = Bulletin of the Russian Agricultural Science*. 2021;6:19-22, doi: 10.30850/vrsn/2021/6/19-22. (In Russ.).

19. Murzabulatova F. K., Polyakova N. B. Introduction of hydrangea varieties in the South Ural Botanical Garden-Institute of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. *Subtropicheskoe i dekorativnoe sadovodstvo = Subtropical and Ornamental Horticulture*. 2019;71:84-91. (In Russ.).

20. Murzabulatova F. K. *Biology of species and varieties of the genus Hydrangea (Hydrangea L.) during introduction in the Bashkir Urals*. Dissertation Thesis. Ufa, 2021. 19 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Н.М. Кузьмина – старший научный сотрудник, отдел интродукции и акклиматизации растений.

А.В. Федоров – доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник, отдел интродукции и акклиматизации растений.

Н.В. Николаев – аспирант, кафедра плодовоовощеводства и защиты растений.

Information about the authors

N.M. Kuzmina - Senior Researcher, Department of Plant Introduction and Acclimatization.

A.V. Fedorov - Doctor of Science (Agricultural Science), Leading Researcher, Department of Plant Introduction and Acclimatization.

N.V. Nikolaev – Postgraduate Student, Department of Horticulture and Plant Protection.

Статья поступила в редакцию 12.07.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022; принята к публикации 15.11.2022.
The article was submitted 12.07.2022; approved after reviewing 07.09.2022; accepted for publication 15.11.2022.

Научная статья

УДК 57.044; 631.46

doi: 10.18522/1026-2237-2022-4-2-118-124

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКОТОКСИЧНОСТИ ЧЕТЫРЕХ ХИМИЧЕСКИХ ФОРМ СЕРЕБРА ПО ФЕРМЕНТАТИВНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВЫ

Н.И. Цепина^{1✉}, **С.И. Колесников**², **Т.В. Минникова**³, **А.Н. Тимошенко**⁴, **К.Ш. Казеев**⁵

^{1,2,3,4,5} Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹cepinanatalia@yandex.ru✉

²kolesnikov@sfedu.ru

³tminnikova@sfedu.ru

⁴atimoshenko@sfedu.ru

⁵kamil_kazeev@mail.ru

Аннотация. Проведено исследование и дана оценка экотоксичности четырех химических соединений серебра (нитрат, оксид, сульфид, наночастицы) на ферментативную активность чернозема обыкновенного карбонатного. Определено влияние нитрата, оксида, сульфида и наночастиц серебра в концентрации 0,5, 1, 5, 10, 50 и 100 мг/кг на активность каталазы и дегидрогеназ через 30 сут после загрязнения. Отмечено, что в большинстве случаев эти вещества негативно влияют на ферментативную активность чернозема обыкновенного карбонатного. Степень экотоксичности серебра зависит от его концентрации в почве. Несколько большую экотоксичность оказывает нитрат серебра – хорошо растворимый в воде, тем самым обеспечивая повышенную подвижность серебра в почве. Практически нерастворимые в воде формы (оксид и сульфид) проявили меньшее негативное воздействие. В результате исследования были получены ряды экотоксичности четырех химических соединений серебра по ферментативной активности: в % от контроля по активности каталазы (% от контроля): нитрат (90) = наночастицы (90) > сульфид (91) > оксид (92); по активности дегидрогеназ (% от контроля): нитрат (80) > наночастицы (81) > сульфид (83) ≥ оксид (83).

Ключевые слова: почва, серебро, нитрат, оксид, сульфид, наночастицы, активность каталазы, активность дегидрогеназ, загрязнение

Благодарности: исследование выполнено при государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук (грант Президента РФ МК-1168.2022.5) и финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания (Южный федеральный университет, проект № 0852-2020-0029).

Для цитирования: Цепина Н.И., Колесников С.И., Минникова Т.В., Тимошенко А.Н., Казеев К.Ш. Сравнительная оценка экотоксичности четырех химических форм серебра по ферментативной активности почвы // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 4-2. С. 118–124.

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

Original article

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE ECOTOXICITY OF FOUR CHEMICAL FORMS OF SILVER BY THE ENZYMATIC ACTIVITY OF THE SOIL

N.I. Tsepina^{1✉}, **S.I. Kolesnikov**², **T.V. Minnikova**³, **A.N. Timoshenko**⁴, **K.Sh. Kazeev**⁵

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹cepinanatalia@yandex.ru✉

²kolesnikov@sfedu.ru

³tminnikova@sfedu.ru

⁴atimoshenko@sfedu.ru

⁵kamil_kazeev@mail.ru

© Цепина Н.И., Колесников С.И., Минникова Т.В., Тимошенко А.Н., Казеев К.Ш., 2022

Abstract. The study assessed the ecotoxicity of four chemical compounds of silver (nitrate, oxide, sulfide, nanoparticles) by the enzymatic activity of ordinary carbonate chernozem. The effect of nitrate, oxide, sulfide and silver nanoparticles at concentrations of 0.5, 1, 5, 10, 50 and 100 mg/kg on catalase and dehydrogenase activity was evaluated 30 days after contamination. In most cases, the negative effect of nitrate, oxide, sulfide and silver nanoparticles on the enzymatic activity of ordinary carbonate chernozem was noted. The degree of ecotoxicity of silver is affected by its concentration in the soil. Silver nitrate, which is highly soluble in water and provides greater mobility of silver in the soil, has a somewhat greater ecotoxicity. Practically insoluble forms in water (oxide and sulfide) showed slightly less negative effects. As a result of the study, the ecotoxicity series of four chemical compounds of silver were obtained by enzymatic activity: in % of the control by catalase activity (% of the control): nitrate (90) = nanoparticles (90) > sulfide (91) > oxide (92); by dehydrogenases activity (% of control): nitrate (80) > nanoparticles (81) > sulfide (83) ≥ oxide (83).

Keywords: soil, silver, nitrate, oxide, sulfide, nanoparticles, catalase activity, dehydrogenases activity, pollution

Acknowledgments: the study was carried out with the state support of young Russian scientists - candidates of science (grant of the President of the Russian Federation MK-1168.2022.5) and financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state task (Southern Federal University, project No. 0852-2020-0029).

For citation: Tsepina N.I., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Timoshenko A.N., Kazeev K.S. Comparative Assessment of the Ecotoxicity of Four Chemical Forms of Silver by the Enzymatic Activity of the Soil. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(4-2):118-124. (In Russ.).

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

В результате деятельности человека за последние годы увеличилось поступление в окружающую среду оксидов, сульфидов и наночастиц серебра [1–3]. Отмечено высокое содержание серебра в почвах [4] и его негативное влияние на состояние почвенной биоты [5–7]. Экоотоксичность химических соединений серебра чаще всего проявляется в снижении длины корней и побегов растений [5, 8–10], ингибировании численности бактерий [11, 12] и активности почвенных ферментов [13, 14]. В исследованиях, проведенных ранее, было отмечено ингибирование нитратом серебра активности каталазы [15, 16], дегидрогеназ [16, 17], ариламидазы и фенолоксидазы [7]. Под воздействием наночастиц серебра ингибируется активность каталазы [18], дегидрогеназ [7, 18], уреазы [7, 19] и фосфатазы [19, 20] и др. Большинство исследований посвящено именно сравнению экоотоксичности нитрата и наночастиц серебра. Актуальным представляется проведение сравнительной оценки экоотоксичности четырех химических форм серебра (нитрат, оксид, сульфид, наночастицы) по ферментативной активности чернозема обыкновенного карбонатного.

Цель работы – провести сравнительную оценку экоотоксичности четырех химических форм серебра по ферментативной активности почвы.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран чернозем обыкновенный карбонатный. Он обладает высоким уровнем плодородия, благодаря чему интенсивно используется в сельском хозяйстве. Зафиксированные авторами концентрации серебра в незагрязненной почве составляют 0,01–1 мг/кг [21], в загрязненных почвах – до 35,9 мг/кг [4], в почвах рудных месторождений – до 7000 мг/кг [22]. Серебро поступает в почву в различных химических соединениях: оксиды [1], сульфиды [23], наночастицы [24]. В эксперименте для достижения максимальной токсичности серебра использовали нитрат серебра, который достаточно хорошо растворим в воде. Стоит также отметить высокую экоотоксичность нитрата серебра в исследованиях, проведенных ранее [25, 26].

В лабораторных условиях было смоделировано загрязнение чернозема обыкновенного карбонатного оксидом, сульфидом, нитратом и наночастицами серебра в концентрациях 0,5, 1, 5, 10, 50 и 100 мг/кг почвы. Для оценки токсичности разных химических форм серебра исследовали верхний слой почвы (0–20 см). Дозы рассчитывали исходя из фоновой концентрации серебра в черноземе обыкновенном карбонатном, которая составляет 0,303 мг/кг. Ферментативную активность чернозема обыкновенного карбонатного оценивали через 30 сут после загрязнения.

Оксидоредуктазы наиболее чувствительны к химическому загрязнению среди ферментов [27], активность которых является показателем потенциальной биологической активности почвы. Оценку экотоксичности химических соединений серебра проводили по стандартным биологическим методам анализа [28]. Активность каталазы определяли по скорости разложения перекиси водорода ($n = 36 : 3$ вегетационных сосуда с почвой в 3 биологических повторностях \times 4 аналитические повторности), дегидрогеназ – по скорости превращения трифенилтетразолия хлористого в трифенилформазан ($n = 36 : 3$ вегетационных сосуда с почвой в 3 биологических повторностях \times 4 аналитические повторности).

Для проверки полученных данных на достоверность был проведен дисперсионный анализ с последующим определением наименьшей существенной разности (НСР).

Результаты и их обсуждение

Результаты воздействия химических соединений серебра на активность каталазы представлены на рис. 1.

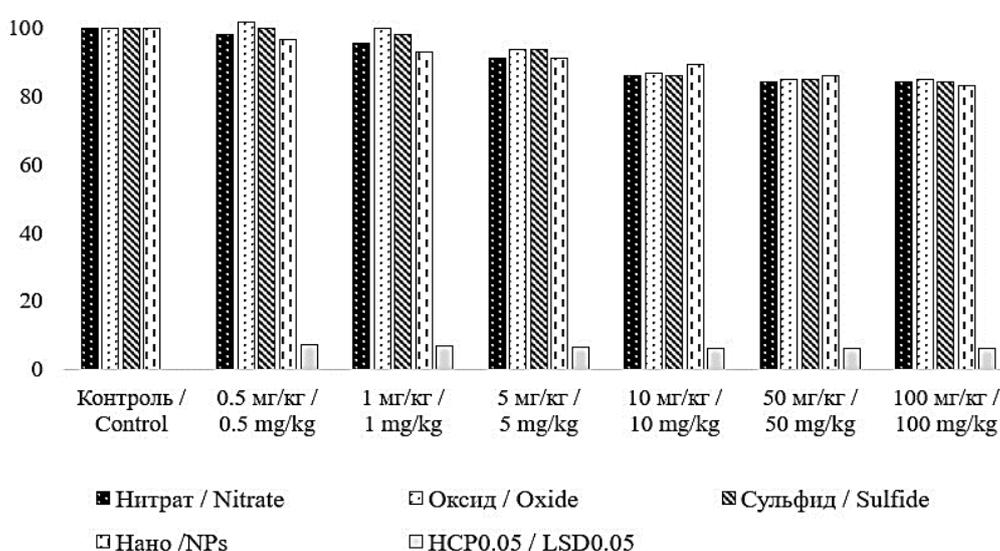


Рис. 1. Изменение активности каталазы чернозема обыкновенного карбонатного при загрязнении оксидом, сульфидом, нитратом и наночастицами серебра, % от контроля / Fig. 1. Change in catalase activity of ordinary carbonate chernozem when contaminated with oxide, sulfide, nitrate and silver nanoparticles, % of control

Достоверное снижение активности каталазы чернозема обыкновенного отмечено при загрязнении нитратом, оксидом, сульфидом и наночастицами серебра, начиная с дозы 10 мг/кг.

Нитрат и сульфид серебра в концентрации 10 мг/кг вызвали снижение активности каталазы на 14 % относительно контроля. Оксид и наночастицы серебра ингибировали активность каталазы на 13 и 11 % соответственно относительно контроля.

При дозе 50 мг/кг наиболее экотоксичен нитрат серебра, он снижает активность каталазы чернозема обыкновенного на 16 % относительно контроля. Одинаковы по экотоксичности при концентрации 50 мг/кг оксид и сульфид серебра, показатель снизился на 15 % относительно контрольных значений. Наночастицы серебра менее экотоксичны в отношении активности каталазы, снижение – 14 % относительно контроля.

Концентрация наночастиц серебра 100 мг/кг ингибирует активность каталазы на 17 % относительно контроля. Нитрат, сульфид и оксид серебра – на 15–16 % относительно контроля.

Исследуемые химические соединения серебра по степени действия экотоксичности на активность каталазы образуют следующий ряд: нитрат (90) = наночастицы (90) > сульфид (91) > оксид (92).

Результаты воздействия химических соединений серебра на активность дегидрогеназ чернозема обыкновенного представлены на рис. 2.

Достоверное снижение активности дегидрогеназ чернозема обыкновенного зафиксировано при загрязнении нитратом, оксидом, сульфидом и наночастицами серебра при дозе 5 мг/кг.

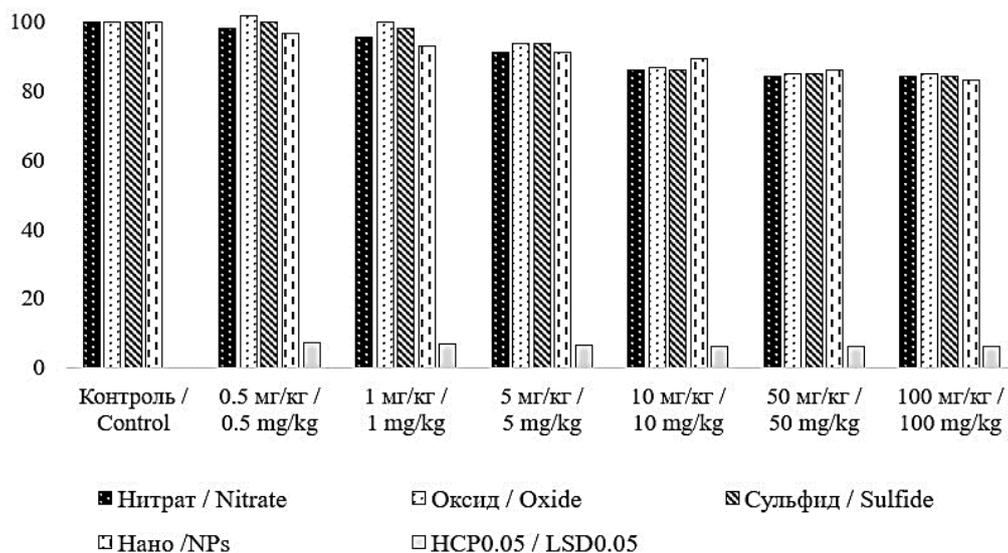


Рис. 2. Изменение активности дегидрогеназ чернозема обыкновенного карбонатного при загрязнении оксидом, сульфидом, нитратом и наночастицами серебра, % от контроля / Fig. 2. Change in the activity of ordinary carbonate chernozem dehydrogenases when contaminated with oxide, sulfide, nitrate and silver nanoparticles, % of control

Активность дегидрогеназ при концентрации 5 мг/кг нитрата серебра снизилась на 12 % относительно контроля, оксида, сульфида и наночастиц – на 10 %.

Наночастицы серебра при дозе 10 мг/кг более экотоксичны. Они ингибировали активность дегидрогеназ на 17 % относительно контрольных значений, сульфид, нитрат и оксид серебра – на 14, 13 и 12 % соответственно.

Доза 50 мг/кг более экотоксична для нитрата серебра. Она снизила активность дегидрогеназ на 39 % относительно контрольных значений, наночастицы серебра – на 37 %, оксид и сульфид серебра – на 33 %.

Большей экотоксичностью при дозе 100 мг/кг обладает нитрат серебра. Он снижает активность дегидрогеназ на 45 % относительно контрольных значений, наночастицы, оксид и сульфид серебра – на 41, 40 и 37 % соответственно.

Ряд экотоксичности химических соединений серебра по активности дегидрогеназ имеет следующую последовательность: нитрат (80) > наночастицы (81) > сульфид (83) ≥ оксид (83).

Из исследованных ферментов более чувствительной к загрязнению различными химическими соединениями серебра является активность дегидрогеназ. Высокая чувствительность активности дегидрогеназ к загрязнению наночастицами серебра отмечена в [7, 18], нитратом серебра – в [16].

Ранее авторами, как и в нашем исследовании, было обнаружено, что активность дегидрогеназ более восприимчива к загрязнению серебром, чем активность каталазы [16, 18]. По результатам исследований, проведенных ранее, показано, что нитрат серебра оказывает более сильное ингибирующее влияние на активность почвенных ферментов (каталазы и дегидрогеназ) [16], чем наночастицы серебра [18].

Заключение

В результате исследования влияния нитрата, оксида, сульфида и наночастиц серебра на ферментативную активность чернозема обыкновенного карбонатного установлено, что на степень экотоксичности серебра влияет его концентрация в почве. Сравнительно большую экотоксичность оказывает нитрат серебра – он хорошо растворим в воде, обладает способностью к быстрому продвижению серебра в почве. Практически нерастворимые в воде формы (сульфид и оксид) проявили несколько меньшее негативное воздействие. Чем выше концентрация серебра в почве, тем более выражено токсическое действие на активность каталазы и дегидрогеназ. При

оценке экотоксичности химических соединений серебра по ферментативной активности получены следующие ряды, % от контроля. По активности каталазы: нитрат (90) = наночастицы (90) > сульфид (91) > оксид (92); по активности дегидрогеназ: нитрат (80) > наночастицы (81) > сульфид (83) ≥ оксид (83).

Список источников

1. Xing G., Zhu J., Xiong Z. Ag, Ta, Ru, and Ir enrichment in surface soil: Evidence for land pollution of heavy metal from atmospheric deposition // *Global Biogeochem Cycles*. 2004. Vol. 18. P. 1–5.
2. Künninger T., Gerecke A.C., Ulrich A., Huch A., Vonbank R., Heeb M., Wichser A., Haag R., Kunz P., Faller M. Release and environmental impact of silver nanoparticles and conventional organic biocides from coated wooden façades // *Environmental Pollution*. 2014. Vol. 184. P. 464–471.
3. Michels C., Perazzoli S., Soares M. Inhibition of the enriched culture of ammonium-oxidizing bacteria by two different nanoparticles: silver and magnetite // *Common Environment Science*. 2017. Vol. 586. P. 995–1002.
4. Yildirim D., Sasmaz A. Phytoremediation of As, Ag, and Pb in contaminated soils using terrestrial plants grown on Gumuskoy mining area (Kutahya Turkey) // *J. of Geochemical Exploration*. 2017. Vol. 182. P. 228–234.
5. Цепина Н.И., Минникова Т.В., Колесников С.И., Казеев К.Ш. Оценка фитотоксичности серебра на почвах разной устойчивости: бурых лесных, черноземах, серопесках // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2020. № 3. С. 107–112.
6. Yin L., Colman B.P., McGill B.M., Wright J.P., Bernhardt E.S. The effect of silver nanoparticles on the germination and early growth of eleven wetland plants // *PLoS ONE*. 2012. Vol. 7. P. e47674.
7. Yan C., Huang J., Cao C., Li R., Ma Y., Wang Y. Effects of PVP-coated silver nanoparticles on enzyme activity, bacterial and archaeal community structure and function in a yellow-brown loam soil // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. P. 8058–8070.
8. Song U., Jun H., Waldman B., Roh J., Kim Y., Yi J., Lee E.J. Functional analyses of nanoparticle toxicity: a comparative study of the effects of TiO₂ and Ag on tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2013. Vol. 93. P. 60–67.
9. Kuamri M., Ernest V., Mukherjee A., Chandrasekaran N. In Vivo Nanotoxicity Assays in Plant Models // *Nanotoxicity*. 2012. Vol. 926. P. 399–410.
10. Цепина Н.И., Колесников С.И., Минникова Т.В., Тимошенко А.Н., Казеев К.Ш. Оценка экотоксичности химических соединений серебра по показателям фитотоксичности чернозема // *АгроЭкоИнфо*. 2022. № 5. URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/5/st_535.pdf (дата обращения: 08.07.2022).
11. Grün A., Straskraba S., Schulz S., Schloter M., Emmerling C. Long-term effects of environmentally relevant concentrations of silver nanoparticles on microbial biomass, enzyme activity, and functional genes involved in the nitrogen cycle of loamy soil // *J. of Environmental Science*. 2018. Vol. 69. P. 12–22.
12. Montes de Oca-Vásquez G., Solano-Campos F., Vega-Baudrit J.R., López-Mondéjar R., Vera A., Morenof J.L., Bastidaf F. Organic amendments exacerbate the effects of silver nanoparticles on microbial biomass and community composition of a semiarid soil // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 744. P. 140919.
13. Eivazi F., Afrasiabi Z., Jose E. Pedosphere Effects of Silver Nanoparticles on the Activities of Soil Enzymes Involved in Carbon and Nutrient Cycling // *Pedosphere*. 2018. Vol. 28. P. 209–214.
14. Samarajeewa A.D., Velicogna J.R., Princz J.I., Subasinghe R.M., Scroggins R.P., Beaudette L.A. Effect of silver nano-particles on soil microbial growth, activity and community diversity in a sandy loam soil // *Environmental Pollution*. 2017. Vol. 220. P. 504–513.
15. Цепина Н.И., Судбина Л.В., Минникова Т.В., Колесников С.И. Влияние загрязнения серебром на активность каталазы почв юга России // *Учен. записки Крымского фед. ун-та им. В.И. Вернадского. Биология. Химия*. 2020. Т. 6 (72), № 2. С. 259–266.
16. Kolesnikov S.I., Tsepina N.I., Sudina L.V., Minnikova T.V., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V. Silver Ecotoxicity Estimation by the Soil State Biological Indicators // *Applied and Environmental Soil Science*. 2020. Vol. 2020. P. 9.
17. Цепина Н.И., Колесников С.И., Минникова Т.В., Судбина Л.В., Тер-Мусабянц Т.А., Неведомая Е.Н., Казеев К.Ш. Влияние серебра на активность дегидрогеназ разных типов почв // *АгроЭкоИнфо*. 2020. № 3. URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2020/3/st_320.pdf (дата обращения: 01.07.2022).
18. Kolesnikov S., Tsepina N., Minnikova T., Kazeev K., Mandzhieva S., Sushkova S., Minkina T., Mazarj M., Singh R.K., Rajput V.D. Influence of Silver Nanoparticles on the Biological Indicators of Haplic Chernozem // *Plants*. 2021. Vol. 10. P. 1022.
19. Shin Y.J., Kwak J.I., An Y.J. Evidence for the inhibitory effects of silver nanoparticles on the activities of soil exoenzymes // *Chemosphere*. 2012. Vol. 88. P. 524–529.
20. Ottoni C.A., Lima Neto M.C., Leo P., Ortolan B.D., Barbieri E., De Souza A.O. Environmental impact of biogenic silver nanoparticles in soil and aquatic organisms // *Chemosphere*. 2020. Vol. 239. P. 124698.
21. Jones K.C., Davies B.E., Peterson P.J. Silver in Welsh soils: Physical and chemical distribution studies // *Geoderma*. 1986. Vol. 37. P. 157–174.

22. Дружинин А.В., Карелина Е.В. Основные типы промышленных месторождений серебра // Вестн. РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2008. № 1. С. 35–41.

23. Kaegi R., Voegelín A., Sinnet B., Zuleeg S., Hagendorfer H., Burkhardt M., Siegrist H. Behavior of metallic silver nanoparticles in a pilot wastewater treatment plant // *Environmental Science & Technology*. 2011. Vol. 45. P. 3902–3908.

24. Khanna V.K. Nanomaterials and their Properties // *Integrated Nanoelectronics*. New Delhi: Springer, 2016. P. 25–41.

25. Tripathi A., Liu S., Kumar S.P., Kumar N., Chandra P.A., Tripathi D.K., Chauhan K. D., Sahi Sh. Differential phytotoxic responses of silver nitrate (AgNO₃) and silver nanoparticle (AgNps) in *Cucumis sativus* L. // *Plant Gene*. 2017. Vol. 11. P. 255–264.

26. Cvjetko P., Milošić A., Domijan A.-M., Vinković Vrček I., Tolić S., Peharec Štefanić P., Letofsky-Papst I., Tkalec M., Balen B. Toxicity of silver ions and differently coated silver nanoparticles in *Allium cepa* roots // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2017. Vol. 137. P. 8–28.

27. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F. Effects of Heavy Metal Pollution on the Ecological and Biological Characteristics of Common Chernozem // *Russian J. of Ecology*. 2000. Vol. 31, № 3. P. 174–181.

28. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2016. 356 с.

References

1. Xing G., Zhu J., Xiong Z. Ag, Ta, Ru, and Ir enrichment in surface soil: Evidence for land pollution of heavy metal from atmospheric deposition. *Global Biogeochem. Cycles*. 2004;18:1-5.

2. Künniger T., Gerecke A.C., Ulrich A., Huch A., Vonbank R., Heeb M., Wichser A., Haag R., Kunz P., Faller M. Release and environmental impact of silver nanoparticles and conventional organic biocides from coated wooden façades. *Environmental Pollution*. 2014;184:464-471.

3. Michels C., Perazzoli S., Soares M. Inhibition of the enriched culture of ammonium-oxidizing bacteria by two different nanoparticles: silver and magnetite. *Common Environment Science*. 2017;586:995-1002.

4. Yildirim D., Sasmaz A. Phytoremediation of As, Ag, and Pb in contaminated soils using terrestrial plants grown on Gumuskoy mining area (Kutahya Turkey). *Journal of Geochemical Exploration*. 2017;182:228-234.

5. Tsepina N.I., Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh. Assessment of phytotoxicity of silver on soils of different stability: brown forest, chernozems, gray sand. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2020;(3):107-112. (In Russ.).

6. Yin L., Colman B.P., McGill B.M., Wright J.P., Bernhardt E.S. The effect of silver nanoparticles on the germination and early growth of eleven wetland plants. *PLoS ONE*. 2012;7:e47674.

7. Yan C., Huang J., Cao C., Li R., Ma Y., Wang Y. Effects of PVP-coated silver nanoparticles on enzyme activity, bacterial and archaeal community structure and function in a yellow-brown loam soil. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27:8058-8070.

8. Song U., Jun H., Waldman B., Roh J., Kim Y., Yi J., Lee E.J. Functional analyses of nanoparticle toxicity: a comparative study of the effects of TiO₂ and Ag on tomatoes (*Lycopersicon esculentum*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2013;93:60-67.

9. Kuamri M., Ernest V., Mukherjee A., Chandrasekaran N. In Vivo Nanotoxicity Assays in Plant Models. *Nanotoxicity*. 2012;926:399-410.

10. Tsepina N.I., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Timoshenko A.N., Kazeev K.Sh. Assessment of ecotoxicity of chemical compounds of silver by indicators of phytotoxicity of chernozem. *AgroEcoInfo*. 2022;(5). Available from: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/5/st_535.pdf [Accessed 8th July 2022]. (In Russ.).

11. Grün A., Straskraba S., Schulz S., Schloter M., Emmerling C. Long-term effects of environmentally relevant concentrations of silver nanoparticles on microbial biomass, enzyme activity, and functional genes involved in the nitrogen cycle of loamy soil. *Journal of Environmental Science*. 2018;69:12-22.

12. Montes de Oca-Vásquez G., Solano-Campos F., Vega-Baudrit J.R., López-Mondéjar R., Vera A., Morenof J. L., Bastidaf F. Organic amendments exacerbate the effects of silver nanoparticles on microbial biomass and community composition of a semiarid soil. *Science of the Total Environment*. 2020;744:140919.

13. Eivazi F., Afrasiabi Z., Jose E. Pedosphere Effects of Silver Nanoparticles on the Activities of Soil Enzymes Involved in Carbon and Nutrient Cycling. *Pedosphere*. 2018;28:209-214.

14. Samarajeewa A.D., Velicogna J.R., Princz J.I., Subasinghe R.M., Scroggins R.P., Beaudette L.A. Effect of silver nanoparticles on soil microbial growth, activity and community diversity in a sandy loam soil. *Environmental Pollution*. 2017;220:504-513.

15. Tsepina N.I., Sudyina L.V., Minnikova T.V., Kolesnikov S.I. The effect of silver pollution on the catalase activity of soils in Southern Russia. *Uchen. zapiski Krymskogo fed. un-ta im. V.I. Vernadskogo. Biologiya. Khimiya = Scientific Notes of the Crimean Federal University by Vernadsky Biology Chemistry*. 2020;6(2):259-266. (In Russ.).

16. Kolesnikov S.I., Tsepina N.I., Sudina L.V., Minnikova T.V., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V. Silver Ecotoxicity Estimation by the Soil State Biological Indicators. *Applied and Environmental Soil Science*. 2020;2020:9.

17. Tsepina N.I., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Sudyina L.V., Ter-Misakyants T.A., Nevedomaya E.N., Kazeev K.Sh. The effect of silver on the activity of dehydrogenases of different types of soils. *AgroEkoInfo*. 2020;(3). Available from: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2020/3/st_320.pdf [Accessed 1st July 2022]. (In Russ.).
18. Kolesnikov S., Tsepina N., Minnikova T., Kazeev K., Mandzhieva S., Sushkova S., Minkina T., Mazarji M., Singh R.K., Rajput V.D. Influence of Silver Nanoparticles on the Biological Indicators of Haplic Chernozem. *Plants*. 2021;10:1022.
19. Shin Y.J., Kwak J.I., An Y.J. Evidence for the inhibitory effects of silver nanoparticles on the activities of soil exoenzymes. *Chemosphere*. 2012;88:524-529.
20. Ottoni C.A., Lima N.M.C., Leo P., Ortolan B.D., Barbieri E., De Souza A.O. Environmental impact of biogenic silver nanoparticles in soil and aquatic organisms. *Chemosphere*. 2020;239:124698.
21. Jones K.C., Davies B.E., Peterson P.J. Silver in Welsh soils: Physical and chemical distribution studies. *Geoderma*. 1986;37:157-174.
22. Druzhinin A.V., Karelina E.V. The main types of industrial silver deposits. *Vestn. RUDN. Seriya: Inzhenernye issledovaniya = Bulletin of the RUDN: Engineering Research Series*. 2008;(1):35-41. (In Russ.).
23. Kaegi R., Voegelin A., Sinnet B., Zuleeg S., Hagendorfer H., Burkhardt M., Siegrist H. Behavior of metallic silver nanoparticles in a pilot wastewater treatment plant. *Environmental Science & Technology*. 2011;45:3902-3908.
24. Khanna V. K. Nanomaterials and their Properties. *Integrated Nanoelectronics*. New Delhi: Springer Publ.; 2016:25-41.
25. Tripathi A., Liu S., Kumar S.P., Kumar N., Chandra P.A., Tripathi D.K., Chauhan K. D., Sahi Sh. Differential phytotoxic responses of silver nitrate (AgNO₃) and silver nanoparticle (AgNPs) in *Cucumis sativus* L. *Plant Gene*. 2017;11:255-264.
26. Cvjetko P., Milošić A., Domijan A.-M., Vinković Vrček I., Tolić S., Peharec Štefanić P., Letofsky-Papst I., Tkalec M., Balen B. Toxicity of silver ions and differently coated silver nanoparticles in *Allium cepa* roots. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2017;137:8-28.
27. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F. Effects of Heavy Metal Pollution on the Ecological and Biological Characteristics of Common Chernozem. *Russian Journal of Ecology*. 2000;31(3):174-181.
28. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Akimenko Yu.V., Dadenko E.V. *Methods of biagnostics of terrestrial ecosystems*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2016. 356 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Наталья Игоревна Цепина – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Сергей Ильич Колесников – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Татьяна Владимировна Минникова – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Алена Николаевна Тимошенко – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Камиль Шагидуллоевич Казеев – доктор географических наук, профессор, директор Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Information about the authors

Natalia I. Tsepina - Candidate of Science (Biology), Junior Researcher, Academy of Biology and Biotechnologies.

Sergey I. Kolesnikov - Doctor of Science (Agricultural Sciences), Professor, Head of Department of Ecology and Nature Management, Academy of Biology and Biotechnologies.

Tatiana V. Minnikova - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Academy of Biology and Biotechnologies.

Alena N. Timoshenko - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher, Academy of Biology and Biotechnologies.

Kamil Sh. Kazeev - Doctor of Science (Geography), Professor, Director of the Academy of Biology and Biotechnologies.

Статья поступила в редакцию 12.07.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022; принята к публикации 15.11.2022.
The article was submitted 12.07.2022; approved after reviewing 07.09.2022; accepted for publication 15.11.2022.

Научная статья

УДК 535.3:575:632.08

doi: 10.18522/1026-2237-2022-4-2-125-138

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФИТОПАТОГЕНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

**В.А. Чохели^{1✉}, П.А. Дмитриев², Б.Л. Козловский³, В.В. Степаненко⁴, А.А. Дмитриева⁵,
А.А. Бушкова⁶, В.Д. Раджпут⁷, Д.П. Купрюшкин⁸, О.А. Капралова⁹, Т.В. Вардуни¹⁰**

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10}Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹vachokheli@sfedu.ru ✉

²pdmiriev@sfedu.ru

³blk@sfedu.ru

⁴vstepanenko@sfedu.ru

⁵admit@sfedu.ru

⁶abushkova@sfedu.ru

⁷rvishnu@sfedu.ru

⁸dkupryushkin@sfedu.ru

⁹oakapralova@sfedu.ru

¹⁰varduny@sfedu.ru

Аннотация. В данной статье представлен обзор основных молекулярно-генетических методов и технологий дистанционного зондирования Земли, применяемых при диагностике различных заболеваний хозяйственно ценных видов и сортов растений. Во введении названы основные культуры, возделываемые на территории России. Также приведены основные фитопатогены, рассмотренные на примере пшеницы. К ним относятся грибковые заболевания (различного рода головневые, ржавчинные болезни, септориозные пятнистости и др.), бактериальные, вирусные и нематодные болезни. В главе, посвященной генетическим методам исследования, рассмотрены как универсальные праймеры под грибковые и бактериальные инфекции, так и видоспецифичные праймеры на фитопатогены под некоторые хозяйственно ценные культуры. В главе, посвященной дистанционному зондированию Земли, представлены основные этапы идентификации фитопатогенов и методы анализа данных дистанционного зондирования Земли. В последней главе описаны возможные пути совместного использования генетических методов и дистанционного зондирования Земли с целью создания библиотек для оценки площадей пораженных культур, положительные и отрицательные стороны при генетическом анализе фитопатогенов. Предложены пути нивелирования отрицательных сторон с использованием генетического анализа, с привлечением методов дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: фитопатогены, хозяйственно ценные виды растений, генетические технологии, дистанционное зондирование Земли, гиперспектральная съемка, вегетационные индексы, праймеры, универсальные последовательности, ПЦР

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № 0852-2020-0029.

Для цитирования: Чохели В.А., Дмитриев П.А., Козловский Б.Л., Степаненко В.В., Дмитриева А.А., Бушкова А.А., Раджпут В.Д., Купрюшкин Д.П., Капралова О.А., Вардуни Т.В. Идентификация фитопатогенов сельскохозяйственных культур с применением генетических методов и технологий дистанционного зондирования Земли // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 4-2. С. 125–138.

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

© Чохели В.А., Дмитриев П.А., Козловский Б.Л., Степаненко В.В., Дмитриева А.А., Бушкова А.А., Раджпут В.Д., Купрюшкин Д.П., Капралова О.А., Вардуни Т.В., 2022

Original article

IDENTIFICATION OF PHYTOPATOGENES OF AGRICULTURAL CROPS USING GENETIC METHODS AND REMOTE SENSING TECHNOLOGIES

V.A. Chokheli¹, P.A. Dmitriev², B.L. Kozlovsky³, V.V. Stepanenko⁴, A.A. Dmitrieva⁵,
A.A. Bushkova⁶, V.D. Rajput⁷, D.P. Kupryushkin⁸, O.A. Kapralova⁹, T.V. Varduny¹⁰

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10}Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹vachokheli@sfedu.ru

²pdmitriev@sfedu.ru

³blk@sfedu.ru

⁴vstepanenko@sfedu.ru

⁵admit@sfedu.ru

⁶abushkova@sfedu.ru

⁷rvishnu@sfedu.ru

⁸dkupryushkin@sfedu.ru

⁹oakapralova@sfedu.ru

¹⁰varduny@sfedu.ru

Abstract. This article presents an overview of the main molecular genetic methods and technologies of remote sensing used in the diagnosis of various diseases of economically valuable plant species and varieties. The introduction shows the main crops cultivated in Russia. The main phytopathogens considered on the example of wheat are also given. These include fungal diseases (various kinds of smut diseases, rust diseases, septiriosis spots, etc.), bacterial diseases, viral diseases and nematode diseases. In the chapter devoted to genetic research methods, both universal primers for fungal and bacterial infections and species-specific primers for phytopathogens for some economically valuable crops are considered. The chapter on remote sensing presents the main stages of identification of phytopathogens using remote sensing of the Earth. The methods used for analyzing remote sensing data of the Earth are also presented. The last chapter describes possible ways to combine genetic methods and remote sensing of the Earth to create libraries for assessing the areas of affected crops. The positive and negative sides of the genetic analysis of phytopathogens are described. The ways of leveling the negative sides using genetic analysis, involving methods of remote sensing of the Earth are proposed.

Keywords: phytopathogens, economically valuable plant species, genetic technologies, remote sensing of the Earth, hyperspectral imaging, vegetation indices, primers, universal sequences, PCR

Acknowledgments: the study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state task in the field of scientific activity No. 0852-2020-0029.

For citation: Chokheli V.A., Dmitriev P.A., Kozlovsky B.L., Stepanenko V.V., Dmitrieva A.A., Bushkova A.A., Rajput V.D., Kupryushkin D.P., Kapralova O.A., Varduny T.V. Identification of Phytopathogens of Agricultural Crops Using Genetic Methods and Remote Sensing Technologies. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(4-2):125-138. (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

Болезни растений ежегодно существенно снижают урожайность сельскохозяйственных культур, что приводит к огромным экономическим потерям во всем мире. В связи с этим своевременное выявление пораженных растений является одной из наиболее важных задач в сельском хозяйстве.

По данным Росстата на 2019 г., основные сельскохозяйственные культуры, возделываемые на территории России: пшеница (озимая и яровая), рожь (озимая и яровая), тритикале (озимая и яровая), ячмень (озимый и яровой), пшеница, овёс, кукуруза (на зерно), сорго, просо, гречиха, рис, зернобобовые культуры (в том числе горох и фасоль), сахарная свёкла, подсолнечник, соя, рапс (озимый и яровой), рыжик, горчица, картофель, овощи открытого грунта, бахчевые продовольственные культуры и др. [1].

Для многих сельскохозяйственных растений уже изучен видовой состав фитопатогенов, вызывающих различные заболевания. Так, например, для твердой и мягкой пшеницы (озимой и яровой) насчитывается порядка 19 заболеваний, вызванных грибковыми инфекциями (табл. 1), три бактериальные и две вирусные и нематодные болезни [2].

Таблица 1 / Table 1

Основные фитопатогены пшеницы (*Triticum*) / Main phytopathogens of wheat (*Triticum*)

| Название | Возбудитель* |
|--|--|
| Грибковые заболевания | |
| <i>Головневые болезни</i> | |
| Твердая (мокрая) головня | <i>Tilletia caries</i> (DC) Tul. & C. Tul. (син.: <i>Tilletia foetidia</i> Liro, <i>Uredo sitophila</i> Ditmar и др.) |
| | <i>Tilletia laevis</i> J.G. Kühn (син.: <i>Tilletia tritici</i> var. <i>laevis</i> (J.G. Kühn) Kawchuk, <i>Erysibe foetida</i> Wallr. и др.) |
| Карликовая головня | <i>Tilletia controversa</i> J.G. Kühn [as 'contraversa'] (син.: <i>Tilletia tritici</i> var. <i>controversa</i> (J.G. Kühn) Kawchuk, <i>Tilletia tritici-nanifica</i> F. Wagner [as 'tritici nanifica'] и др.) |
| Пыльная головня | <i>Ustilago tritici</i> (Bjerk.) Rostr. (син.: <i>Lycoperdon tritici</i> Bjerk., <i>Uredo segetum</i> β <i>tritici</i> (Bjerk.) Pers. и др.) |
| Индийская (карнальская) головня | <i>Tilletia indica</i> Mitra (син.: <i>Neovossia indica</i> (Mitra) Mundk.) |
| Стеблевая головня | <i>Urocystis tritici</i> Körn. (син.: <i>Tuburcinia tritici</i> (Körn.) Liro) |
| <i>Ржавчинные болезни</i> | |
| Стеблевая (линейная или черная) ржавчина | <i>Puccinia graminis</i> Pers. (син.: <i>Dicaeoma graminis</i> (Pers.) Gray, <i>Uredo frumenti</i> Sowerby и др.) |
| Бурая (листовая) ржавчина | <i>Puccinia recondita</i> Roberge ex Desm. (син.: <i>Aecidium asperifolii</i> Pers., <i>Dicaeoma asperifolii</i> (Pers.) Kuntze и др.) |
| Желтая (чешуйчатая) ржавчина | <i>Puccinia striiformis</i> Westend. (син.: <i>Puccinia rubigo-vera</i> var. <i>tritici</i> (Erikss.) Carleton <i>Puccinia glutarum</i> (J.C. Schmidt) Erikss. & Henning и др.) |
| <i>Мучнистая роса</i> | |
| Мучнистая роса | <i>Blumeria graminis</i> (DC) Speer. (син.: <i>Erysiphe graminis</i> DC.) |
| <i>Септориозные пятнистости</i> | |
| Септориозные пятнистости | <i>Parastagonospora nodorum</i> (Berk.) Quaedvl., Verkley & Crous (син.: <i>Stagonospora nodorum</i> (Berk.) E. Castell. & Germano, <i>Septoria nodorum</i> (Berk.) Berk.) |
| | <i>Zymoseptoria tritici</i> (Roberge ex Desm.) Quaedvl. & Crous (син.: <i>Septoria tritici</i> (Rob. et Desm.), <i>Mycosphaerella graminicola</i> f. <i>alpina</i> (Rehm) Magnus и др.) |
| <i>Гельминтоспориозные пятнистости листьев</i> | |
| Желтая пятнистость листьев (пиренофороз) | <i>Pyrenophora tritici-repentis</i> (Died.) Drechsler (син.: <i>Drechslera tritici-repentis</i> (Died.) Shoem., <i>Helminthosporium tritici-vulgaris</i> Y. Nisik. и др.) |
| Темно-бурая гельминтоспориозная пятнистость | <i>Bipolaris sorokiniana</i> Shoemaker, (син.: <i>Helminthosporium sativum</i> Pammel, C.M. King & Bakke, <i>Helminthosporium sorokinianum</i> Sacc. и др.) |
| <i>Корневые гнили</i> | |
| Гельминтоспориозная (обыкновенная), гельминтоспориозно-фузариозная гнили | <i>Bipolaris sorokiniana</i> Shoemaker, (син.: <i>Bipolaris californica</i> (Mackie & G.E. Paxton) Gornostaj [as 'californicum'], <i>Ophiobolus sativus</i> S. Ito & Kurib. и др.) |
| | Грибы из рода <i>Fusarium</i> , в частности <i>F. avenaceum</i> (Fr.) Sacc., <i>F. gibbosum</i> Appel & Wollenw., <i>F. graminearum</i> Schwabe, <i>F. oxysporum</i> Schldl. |
| Церкоспореллезная, или глазковая, пятнистость | <i>Oculimacula yallundae</i> (Wallwork & Spooner) Crous & W. Gams (син.: <i>Cercospora herpotrichoides</i> Fron., <i>Tapesia yallundae</i> Wallwork & Spooner и др.) |
| Офиоболезная корневая гниль | <i>Gaeumannomyces graminis</i> (Sacc.) Arx & D.L. Olivier, (син.: <i>Rhaphidophora graminis</i> Sacc., <i>Ophiobolus graminis</i> (Sacc.) Sacc. и др.) |
| Снежная плесень | <i>Microdochium nivale</i> (Fr.) Samuels & I.C. Hallett (син.: <i>Calonectria graminicola</i> F. Stevens, <i>Fusarium nivale</i> (Fr.) Sorauer и др.) |

Окончание табл. 1

| Название | Возбудитель* |
|--|--|
| <i>Болезни зерна</i> | |
| «Черный зародыш» зерна и фузариоз колоса | <i>Fusarium graminearum</i> Schwabe, <i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keisl. (син.: <i>Alternariatenues</i> Nees, <i>Torula alternata</i> Fr и др.), <i>Bipolaris sorokiniana</i> Shoemaker (син.: <i>Helminthosporium sativum</i> Pammel, C.M. King & Bakke, <i>Helminthosporium sorokinianum</i> Sacc. и др.) |
| Энзимно-микозное истощение семян (ЭМИС) | <i>Cladosporium herbarum</i> (Pers.) Link (син.: <i>Dematium herbarum</i> Pers., <i>Bysus herbarum</i> (Pers.) DC. и др.), <i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keisl. (син.: <i>Alternariatenues</i> Nees, <i>Torula alternata</i> Fr и др.) |
| Спорынья | <i>Claviceps purpurea</i> (Fr.) Tul. (син.: <i>Sphaeria purpurea</i> Fr., <i>Cordyceps purpurea</i> (Fr.) Fr. и др.) |
| Бактериальные заболевания | |
| Чёрный, или базальный, бактериоз | <i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>Atrofaciens</i> (McCulluch) Young (син.: <i>P. atrofaciens</i> Stevens, <i>Bact. Atrofaciens</i> Me. Cull.) |
| Бактериальная пятнистость | <i>Xanthomonas campestris</i> pv. <i>translucens</i> (Jones, Jonson and Reddy) Dye. |
| Слизистый, или желтый, бактериоз | <i>Rathayibacter tritici</i> (Carls. et Vidav) (син.: <i>Clavibacter iranicus</i> (Carls. et Vidav), <i>Corynebacterium tritici</i> Hutch., <i>Phytomonas tritici</i> Elliott, <i>Agrobacterium tritici</i> Savul.) |
| Вирусные болезни | |
| Мозаика (русская) озимой пшеницы | Russian winter wheat mosaic virus, cereal mosaic virus из рода <i>Cytorhabdovirus</i> |
| Полосатая мозаика пшеницы | Wheat streak mosaic rymovirus (WSMV) из рода <i>Tritimovirus</i> (<i>Rymovirus</i>) |
| Нематодные болезни | |
| Галловая, или пшеничная, нематода зерна | <i>Anguina tritici</i> (Stein.) |
| Нематоды, поражающие корневую систему | <i>Heterodera avenae</i> |
| | <i>Meloidogyne</i> spp. |
| | <i>Pratylenchus</i> spp. |

* – синонимы возбудителей уточняли на сайте <http://speciesfungorum.org>.

Некоторые заболевания являются эндемичными для субконтинента Азия, как, например, индийская (карнальская) головня, а остальные в той или иной степени присутствуют в различных регионах [2]. Так, по мнению Г.В. Волковой [3], есть пять основных экономически значимых для Юга России болезней пшеницы: три вида ржавчины (бурая, желтая, стеблевая) и два вида пятнистостей (желтая, или пиренофороз, и септориоз).

Для эффективной борьбы с болезнями растений и своевременного принятия управленческих решений необходимы современные технологии быстрой и точной идентификации фитопатогенов сельскохозяйственных культур [4], позволяющие качественно и количественно идентифицировать широкий спектр патогенных микроорганизмов [5].

Для фитопатологического мониторинга сельскохозяйственных земель наряду со стандартными методами визуального наблюдения чрезвычайно важно применение молекулярно-биологических методов анализа ДНК патогенов совместно с технологиями, основанными на методах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Генетические методы

На сегодняшний день с применением высокоэффективных методов молекулярно-генетической диагностики есть возможность видовой идентификации фитопатогенных микроорганизмов [6, 7]. ДНК-маркеры нашли свое широкое применение в медицине и биологии при профилактике инфекционных, врожденных и онкологических заболеваний. К явным преимуществам ДНК-маркеров

перед остальными группами методов фитопатологического анализа можно отнести раннюю диагностику болезней, точность определения, быстроту выполнения анализов и др. [8]. Наличие или отсутствие грибковых, бактериальных или вирусных фитопатогенов в настоящее время может быть определено по анализу его участков ДНК без выделения в чистую культуру [9, 10]. Это позволяет уменьшить время исследования до нескольких дней. Идентификация фитопатогенов происходит благодаря видоспецифическим праймерам, которые сразу информируют о наличии ДНК возбудителя в растительном образце, даже на ранних стадиях. Этот подход позволяет применять своевременные меры по борьбе с заболеванием и предотвращением очага распространения [11, 12]. Благодаря скорости и высокой производительности метода можно массово анализировать наличие ДНК фитопатогенов с целью оценки перспективы их развития. При помощи данного анализа можно проводить фитопатологический анализ насаждений на ранних стадиях развития инфекции без выделения патогена в чистую культуру; определять наличие фитопатогенов в почве при подготовке посадочных площадей (использовать в качестве экспресс-анализа) без выделения патогена в чистую культуру; устанавливать истинные границы распространения инфекции при обнаружении очага поражения, источник инфекции (вода, почва и др.) и количество патогенов (максимально допустимую концентрацию для заражения растений); давать оценку эффективности карантинных и санитарных мероприятий; определять породный состав на зараженных территориях; осуществлять мониторинг появления новых видов патогенов и гибридов [9–12].

Из-за специфики работы с растительным материалом требуется правильный подход к выбору стратегии анализа: отбору проб, выбору маркерных регионов ДНК и методу их исследования [8, 7]. Так, при отборе проб для проведения молекулярно-генетических исследований патогенов необходимо сохранение РНК, а не ДНК. Общие принципы по отбору проб в основном совпадают с требованиями к проведению микробиологических исследований. Одним из основных пунктов является возможность длительного хранения образцов путем фиксации в специализированных растворах или заморозки. Определение количественного содержания фитопатогена в образце проводится с помощью технологии ПЦР в реальном времени, микрочипов, цифровой ПЦР [7, 8]. Для выбора маркерных регионов ДНК и метода их исследования существует несколько вариантов стратегии: метагеномный анализ, использование универсальных локусов, использование мультিকопийных локусов [7].

Основным принципом определения фитопатогена является выявление генетического материала патогена в тканях хозяина. Большинство фитозаболеваний связано с мультивидовым комплексом, не ассоциированным с одним фитопатогеном [6]. В данном случае для изучения ассоциаций фитопатогенов наиболее достоверен метагеномный подход, при котором анализируются материалы, полученные в результате одновременного диагностирования генов и геномов всех микроорганизмов, представленных в инфицированном образце [13]. Преимуществом метагеномного анализа являются учет и количественная оценка некультивируемых в искусственных условиях, имеющих выраженную специализацию к живым тканям микроорганизмов наряду с культивируемыми [7, 10].

В течение последних десятилетий базы данных генных банков [14] ежедневно пополняются фрагментами генома, важных фитопатогенов хозяйственно ценных видов растений. В числе основных маркеров генома – универсальные локусы рДНК и мтДНК [15]. Основным преимуществом универсальных локусов является их консервативность в пределах одного вида, что позволяет определять таксономическую принадлежность инфекции [7]. Так, для определения грибковых фитопатогенов принято использовать праймеры на внутренний транскрибируемый спейсерный регион (Internal transcribed spacer region – ITS region) гена рибосомальной ДНК, кодирующего 5.8S рРНК, а для определения бактериальной инфекции обычно применяют праймеры на ген 16S рРНК (табл. 2) [16].

Полногеномный анализ ДНК фитопатогенов накладывает определённые сложности, связанные с отделением нефрагментированного генетического материала патогена от генетического материала хозяина. Учитывая данный факт, анализ проводят на основании анализа коротких (менее 1 тыс. п.н.) фрагментов генов или межгенных участков, так называемых мультিকопийных локусов [22]. При этом мультিকопийность может быть обусловлена как большим числом дублированных фрагментов, имеющих кластерное или дисперсное распределение в ядерном геноме, так и расположением данных локусов в генетическом аппарате ДНК органогенов, представленным множественным числом [7].

Таблица 2 / Table 2

Универсальные праймеры на грибковые и бактериальные фитопатогены
/ Universal primers for fungal and bacterial phytopathogens

| Название | Последовательность | Позиция | Автор |
|--|----------------------------|----------------|-------|
| <i>Грибковые фитопатогены (5.8S)</i> | | | |
| ITS1 | TCCGTAGGTGAACCTGCGG | 1773-1791(18S) | [15] |
| ITS1-F | CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA | 1735-1756(18S) | [17] |
| ITS2 | GCTGCGTTCTTCATCGATGC | 53-34 | [15] |
| ITS3 | GCATCGATGAAGAACGCAGC | 34-53 | [15] |
| ITS4 | TCCTCCGCTTATTGATATGC | 57-38 (25S) | [15] |
| ITS4-B | CAGGAGACTTGTACACGGTCCAG | 194-172 (25S) | [17] |
| ITS5 | GGAAGTAAAAGTCGTAACAAGG | 1749-1770(18S) | [15] |
| 5.8S | CGCTGCGTTCTTCATCG | 54-38 | [18] |
| 5.8SR | TCGATGAAGAACGCAGCG | 37-54 | [18] |
| <i>Бактериальные фитопатогены (16S рPHK)</i> | | | |
| U1 | CCAGCAGCCGCGGTAATACG | - | [19] |
| U2 | ATCGG(C/T)ACCTTGTTACGACTTC | - | |
| 8F | AGAGTTTGATCCTGGCTCAG | | [20] |
| 1510R | GGTACCTTGTTACGACTT | | [21] |

Многие исследователи находятся в поиске альтернативных вариантов для анализа конкретных фитопатогенов и подбора оптимальных ДНК-маркеров. Так, Н.С. Пильщикова и Ф.Б. Ганнибал [23] изучали белосоломенную гниль (гибеллиноз), вызванную *Gibellina cerealis*. Для идентификации возбудителя были секвенированы ITS-области рибосомального оперона и ген β -тубулина *G. cerealis* и сконструированы две пары праймеров Gib-F (CCGGAGGTACCAAACCTCTAAG), Gib-R (GCTGGAACCCGACTGGAG) и GibC-F (GCGCCCTCTTCTCCATCTCA), GibC-R (TAGACGCTCATGCGCTCCAG) для видоспецифичной амплификации.

Для стеблевой ржавчины злаков (пшеница и рожь), вызванной грибом *Puccinia graminis* Pers., был амплифицирован фрагмент 660 п.н. с использованием праймеров ITS4 и ITS5, содержащих некодирующие межгенные участки ITS1-5,8S-ITS2 [24]. Был исследован полиморфизм двух форм гриба *P. graminis* (f. sp. *tritici* и f. sp. *secalis*), поражающего пшеницу и рожь, с использованием RAPD-праймеров RP3 ((GTG)₅) и Core (GAGGGTGGXGGXTCT). Исследование показало, что RAPD-анализ эффективен на большой группе грибов, в том числе и возбудителе стеблевой ржавчины пшеницы [25].

Кроме сельскохозяйственных видов растений, индивидуальные праймеры подбираются также для хозяйственно ценных растений. Так, например, для гриба *Cryphonectria parasitica*, паразитирующего на каштане посевном (*Castanea sativa*), были разработаны видоспецифичные маркеры [26]. Показано, что изученные пары праймеров: MF1-F: 5'-GAA GCC TGG TGT CTC TTC CAC-3'; MF1-R: 5'-GTG GAA GAG ACA CCA AGC CTC-3'; MF2-F: 5'-ATG CCT TCC AAC ACC CAG AC-3'; MF2-R: 5'-GAC AAC GCA GTA GGA GTA GCC-3', специфичные для генов *Mf1/1*, *Mf2/1* (*Vir1*), и *Mf2/2* (*Vir2*), кодируют белки-предшественники половых феромонов [26, 27].

Дистанционное зондирование Земли

ДЗЗ – это быстрый, неинвазивный и эффективный метод, с помощью которого можно дистанционно получать спектральные характеристики сельскохозяйственных культур с обширных территорий. Еще в начале XX в. его начали применять для дифференциации живых и мертвых растений, а также идентификации очагов поражения сельскохозяйственных культур. Для этих целей в 1920-х гг. использовали черно-белые фотографии, а с 1930-х – инфракрасные пленки [28]. Позднее в США на опытных и действующих полях была проведена серия экспериментов с целью разработки технологии идентификации поражения черной стеблевой ржавчиной и вирусом желтого карлика четырех культур: пшеницы, овса, ячменя и ржи [29]. Результаты испытаний показали, что по данным аэрофотосъемки можно идентифицировать здоровую пшеницу, овес, ячмень и рожь; пшеницу и овес, пораженные черной стеблевой ржавчиной (*Puccinia graminis*); овес, пораженный вирусом желтого карлика (BYDV).

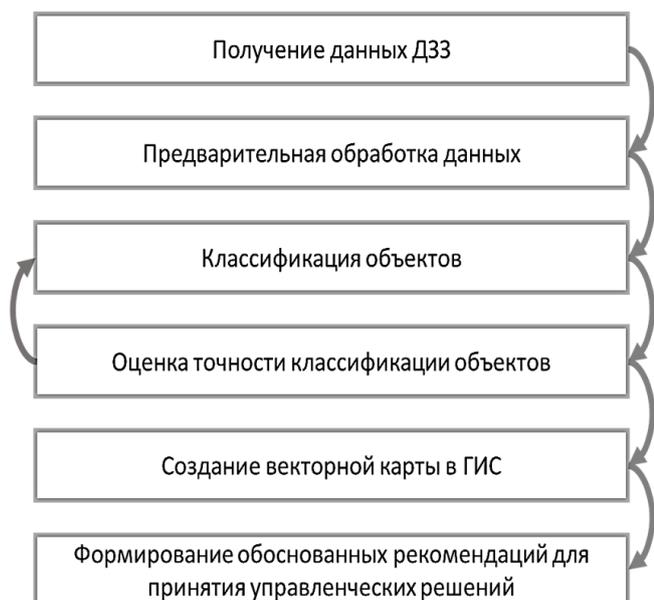


Рис. 1. Этапы идентификации фитопатогенов с использованием ДЗЗ / Fig. 1. Stages of identification of phytopathogens using remote sensing

На данный момент в ряде исследований показана эффективность применения ДЗЗ для раннего выявления очагов поражения ячменя мучнистой росой и листовой ржавчиной, фузариоза на банановых плантациях, хлопчатника нематодами, а корневой гнилью – хлопчатника, люцерны, ореха пекан и citrusовых деревьев [30–32].

В общих чертах этапы применения ДЗЗ для целей идентификации фитопатогенов можно изобразить на схеме, представленной на рис. 1.

Для получения данных ДЗЗ используют LiDAR, RGB-камеры, мультиспектральные и гиперспектральные датчики, установленные на разных носителях – от наземных платформ до спутников [33–35]. Предварительная обработка данных включает в себя атмосферную, радиометрическую и геометрическую коррекцию изображений, расчет статистических показателей, геопривязку снимков и создание ортофотоплана. Для классификации объектов на снимках применяются различные подходы или их комбинации (табл. 3).

Таблица 3 / Table 3

Метод анализа данных ДЗЗ / Method of analysis of Earth remote sensing data

| Метод анализа данных ДЗЗ | Краткое описание | Источник |
|---|---|----------|
| Искусственные нейронные сети (CNN, 3D-CNN, ...) | Вычислительные системы, основанные на принципах биологических нейронных сетей | [36] |
| Метод опорных векторов (SVM, wSVM) | Набор схожих алгоритмов обучения с учителем, использующихся для задач классификации и регрессионного анализа. Основная идея метода – перевод исходных векторов в пространство более высокой размерности и поиск разделяющей гиперплоскости с наибольшим зазором в этом пространстве | [37] |
| Вегетационные индексы | Математическое преобразование двух или более спектральных каналов с целью получения информации о флоре растительности | [38] |
| Дерево принятия решений (регрессионное дерево) | Дерево принятия решений (также может называться деревом классификации, или регрессионным деревом). Метод реализован в ENVI и ERDAS | [39] |
| Объектно ориентированная классификация | Проводится в два этапа: 1. Сегментация изображения. 2. Классификация сегментов на основе спектральных, пространственных и других характеристик | [40] |
| Классификация с обучением | Группировка объектов по категориям на основе предварительно классифицированного набора данных | [41] |
| Классификация без обучения | Итерационная самоорганизующаяся методика анализа данных базируется на кластерном анализе | [42] |

В результате поражения фитопатогенами меняются спектральные характеристики растений [32]. Эти изменения визуально воспринимаются как пожелтение листа и в той или иной степени связаны с разной концентрацией фотосинтетических пигментов и их соотношением в растениях. Цель классификации – выявление очагов поражения на всей территории съемки и создание тематических векторных карт в ГИС для формирования на их основе обоснованных рекомендаций для принятия оперативных управленческих решений.

Совместное использование генетических методов и ДЗЗ

В результате анализа литературных источников представлен алгоритм для анализа фитопатогенов:

1. Создание генетической библиотеки фитопатогенов хозяйственно ценных видов и сортов растений.

Точечно, с использованием универсальных или видоспецифичных праймеров, можно определять видовую принадлежность фитопатогена на конкретной культуре. При работе с универсальными праймерами после секвенирования генетическую последовательность образцов необходимо сверить через приложение BLAST (Basic local alignment search tool) от NCBI. Это позволит определить родовую или видовую специфичность фитопатогена.

2. Создание гиперспектральной библиотеки фитопатогенов хозяйственно ценных видов и сортов растений.

Провести гиперспектральную съёмку зараженного растения с известным фитопатогенным спектром на основе генетического анализа. Создать гиперспектральную библиотеку зараженных культур.

Второй вариант, подходящий под создание библиотек, – это использование чистых растительных культур и заражение их непосредственно известным штаммом. И затем на основе полученных данных масштабировать модель на поле, заполненном той или иной сельскохозяйственной культурой (рис. 2).

Таким образом, на основе проведенного нами обзора можно составить алгоритм построения исследования по анализу фитопатогенов хозяйственно ценных видов и сортов растений.

Однако наряду с положительными аспектами совместного использования генетических методов и ДЗЗ есть ряд ограничений, накладываемых этими методиками. Так, например, многие фитопатогены могут присутствовать в тканях растительных организмов, но не проявлять себя, не приводя к вспышкам инфекции [43, 44]. Поскольку все ПЦР-тесты очень чувствительны, они могут уловить даже незначительное количество копий ДНК. И при генетическом мониторинге возможно получать ложноположительный эффект. Поэтому необходимо разрабатывать тесты с пороговой чувствительностью при переходе от латентной фазы к активной на основе qPCR (количественная ПЦР, или ПЦР в реальном времени) [44, 45]. Так, например, М. Макнил с соавторами [45] использовали технологию TaqMan для определения количества спор *Tilletia caries* в семенах.

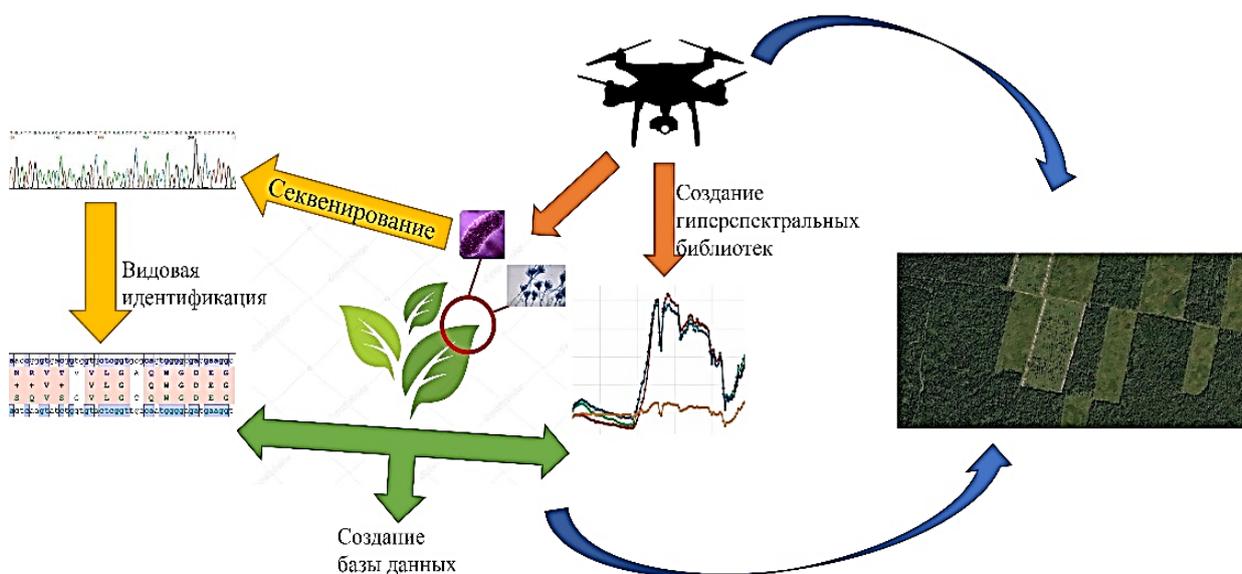


Рис. 2. Схема взаимодействия генетических методов и гиперспектральной съёмки для анализа фитопатогенов / Fig. 2. Diagram of the interaction of genetic methods and hyperspectral imaging for the analysis of phytopathogens

Нивелировать ложноположительный эффект можно с использованием потенциально универсальных генов иммунного ответа растений на внедрение фитопатогена. У растений имеется врожденный (естественный) иммунитет, который бывает двух типов: пассивный и активный [46]. Пассивный препятствует внедрению фитопатогена в клетку (за счёт наличия кутикулы и клеточной стенки). Активный запускает череду физиологических ответов [47, 48]. Активный иммунитет, в свою очередь, подразделяется на неспецифический и специфический иммунный ответ [46]. Неспецифический – это первый уровень иммунного ответа, или паттерн-активированный иммунитет (pattern-triggered immunity, PTI), который ассоциирован с микробными молекулярными структурами (pathogen-associated molecular patterns, PAMP). Специфический – это второй уровень защиты растений, или эффектор-активированный иммунитет (effector-triggered immunity, ETI). Он опосредуется белками внутриклеточной резистентности (R-белками), которые распознают молекулы – эффекторы, вводимые патогенами в клетки растений [46, 49–52]. По каскаду реакций, запускаемых в ответ на наличие токсинов патогенов, включаются основные факторы транскрипции растений (WRKY, MYB, NAC и ERF), которые регулируют несколько R-генов, способствующих иммунитету [46]. Возможно, изучение экспрессии генов, кодирующих факторы транскрипции и гены резистентности (R-гены) для конкретных культур растений, станет ключом к пониманию иммунного ответа, называемого количественной болезнестойкостью (quantitative disease resistance, QDR). Также особое внимание стоит уделить генам, кодирующим универсальный набор молекул, включая тритерпены, дитерпены и флавоноиды, отвечающие за химическую защиту растений от инфекций [53].

Таким образом, на основе генетического анализа, применения ДЗЗ, использования вегетационных индексов (NDVI и др.) возможно проводить мониторинг уже пораженных растений [54]. Основываясь на принципе математического преобразования двух или более спектральных каналов [38], можно по фенотипическим признакам, в частности по изменённому спектру отражения от пораженных тканей, оценить очаги инфицированных растений.

Заключение

На сегодняшний день на смену визуальным методам определения фитопатогенов пришли современные молекулярно-генетические методы на основе ДНК-маркирования и технологии, основанные на методах ДЗЗ, которые обладают рядом преимуществ при анализе заболеваний хозяйственно ценных видов и сортов растений.

Использование современных методов анализа (генетические и ДДЗ) позволяет не только с высокой точностью идентифицировать патогены, но и одновременно анализировать большие выборки.

Список источников

1. Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://www.gks.ru> (дата обращения: 15.12.2021).
2. *Койшыбаев М.* Болезни пшеницы. Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО). Анкара, 2018. 394 с.
3. *Волкова Г.В.* Изучение и использование генетического потенциала устойчивости пшеницы к грибным заболеваниям // Защита и карантин растений. 2010. № 9. С. 13–17.
4. *Tibebu B., Nuh B.* Biotechnological tools for detection, identification and management of plant diseases // African J. of Biotechnology. 2019. Vol. 18, № 29. P. 797–807. Doi: 10.5897/ajb2018.16591.
5. *Ahmad F., Babalola O.O., Tak H.I.* Potential of MALDI-TOF mass spectrometry as a rapid detection technique in plant pathology: identification of plant-associated microorganisms // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2012. Vol. 404, № 4. P. 1247–1255. Doi: 10.1007/s00216-012-6091-7.
6. *Дьяков Ю.Т.* Общая и молекулярная фитопатология. М.: Общество фитопатологов, 2001. 301 с.
7. *Баранов О.Ю.* Молекулярная фитопатология: современные подходы и основные направления диагностики болезней древесных растений // Сиб. лесной журн. 2014. № 4. С. 42–45.
8. *Падутков В.Е., Баранов О.Ю., Воронаев Е.В.* Методы молекулярно-генетического анализа. Минск: Юнипол, 2007. 176 с.
9. *Алимова Т.С., Сиволопов В.А., Карпеченко Н.А., Шишкина О.К., Пантелеев С.В., Ковалевич О.А.* Применение методов молекулярной генетики для анализа наличия фитопатогенов в лесных насаждениях и питомниках Российской Федерации // Сиб. лесной журн. 2014. № 4. С. 35–41.

10. Баранов О.Ю., Ярмолович В.А., Пантелеев С.В., Купреенко Д.Г. Молекулярно-генетическая диагностика грибных болезней в лесных питомниках // Лесное и охотничье хозяйство. 2012. № 6. С. 21–29.
11. Баранов О.Ю., Падуттов В.Е., Пантелеев С.В. Молекулярно-генетическое маркирование патогенеза лесных древесных видов // Молодежь в науке – 2009 : прилож. к журналу «Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. биял. наук.». 2010. № 4. С. 10–12.
12. Баранов О.Ю., Ярмолович В.А., Пантелеев С.В. Молекулярно-генетические особенности пораженных шютте тканей хвои сеянцев ели европейской // Современное состояние и перспективы охраны и защиты лесов в системе устойчивого развития : материалы Междунар. науч. конф. Гомель: Ин-т леса НАН Беларуси, 2013. С. 63–66.
13. Charles T. Metagenomics: theory, methods and applications. Caister Academic Press, 2010. 212 p.
14. National Center for Biotechnological Information, NCBI. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/Genbank> (дата обращения: 15.12.2021).
15. White T. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics // PCR protocols: a guide to methods and applications. Academic Press, 1990. P. 315–322.
16. Khalilov I., Azimova N., Kobilov F., Mardonov I., Nazirov M. Molecular genetic identification and CRY-gene analysis of *Bacillus thuringiensis* native bacterial strains // Conference “Biology and Biotechnology of Microorganisms”. September 16-17. Tashkent, 2021.
17. Gardes M., Bruns T.D. ITS primers with enhanced specificity for Basidiomycetes: application to identification of Mycorrhizae and rusts // Mol. Ecol. 1993. № 2. P. 113–118.
18. Vilgalys R., Hester M. Rapid genetic identification and mapping of enzymatically amplified ribosomal DNA from several *Cryptococcus* species // J. Bacteriol. 1990. № 172. P. 4238–4246.
19. Lu J.-J., Perng C.-L., Lee S.-Y., Wan C.-C. Use of PCR with Universal Primers and Restriction Endonuclease Digestions for Detection and Identification of Common Bacterial Pathogens in Cerebrospinal Fluid // J. of Clinical Microbiology. 2000. Vol. 38, № 6. P. 2076–2080.
20. Edwards U., Rogall T., Blocker H., Emde M., Bottger E.C. Isolation and direct complete nucleotide determination of entire genes. Characterization of a gene coding for 16S ribosomal RNA // Nucleic Acids Res. 1989. Vol. 17. P. 7843–7853.
21. Reysenbach A.L., Wickham G.S., Pace N.R. Phylogenetic analysis of the hyperthermophilic pink filament community in Octopus Spring, Yellowstone National Park // Appl. Environ. Microbiol. 1994. Vol. 60. P. 2113–2119.
22. Tooley P.W. [et al.]. Development of PCR primers from internal transcribed spacer region 2 for detection of *Phytophthora* species infecting potatoes // Appl. Environ. Microbiol. 1997. Vol. 63. P. 1467–1475.
23. Пильщикова Н.С., Ганнибал Ф.Б. Идентификация возбудителя белосоломенной гнили пшеницы (*Gibellina cerealis*) методом ПЦР // Вестн. защиты растений. 2015. Т. 3, № 85. С. 46–50.
24. Сколотнева Е.С. Изменчивость внутривидовых структур *Puccinia graminis* Pers.: дис. ... канд. биол. наук. М., 2008. 121 с.
25. Малеева Ю.В., Лебедева Л.А., Инсарова И.Д., Лекомцева С.Н. Исследование генетической изменчивости географических изолятов возбудителя стеблевой ржавчины пшеницы *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* // Журн. РФО. 2004. № 1, вып. 4. С. 31–40.
26. Popov A.P., Tsvetkov I.L., Belov A.A., Konichev A.S., Ivanushkina N.E., Kochkina G.A., Ozerskaya S.M. Molecular genetic identification of the phytopathogenic fungus *Cryphonectria parasitica* // Microbiology. 2010. Vol. 79, № 2. P. 223–228.
27. Zhang L., Baasiri R.A., van Alfen N.K. Vira Repression of Fungal Pheromone Precursor Gene Expression // Mol. Cell. Biol. 1998. Vol. 18. P. 953–958.
28. Blakeman R.H. The identification of crop disease and stress by aerial photography // Applications of Remote Sensing in Agriculture. Butterworths; London, 1990. P. 229–254. Doi: 10.1016/b978-0-408-04767-8.50020-7.
29. Colwell R.N. Determining the prevalence of certain cereal crop diseases by means of aerial photography // Hilgardia. 1956. Vol. 26. P. 223.
30. Jim Lee Y. Aerial photography for the detection of soil-borne disease // Canadian J. of Plant Pathology. 1989. Vol. 11, № 2. P. 173–176. Doi: 10.1080/07060668909501134.
31. Yu K., Kang Yu, Leufen G., Hunsche M., Noga G.J., Chen X., Bareth G. Investigation of leaf diseases and estimation of chlorophyll concentration in seven barley varieties using fluorescence and hyperspectral indices // Remote Sensing. 2013. Vol. 6. P. 64–86.
32. Huichun Ye, Wenjiang Huang, Shanyu Huang, Bei Cui, Yingying Dong, Anting Guo, Yu Ren, Yu Jin. Recognition of Banana Fusarium Wilt Based on UAV Remote Sensing // Remote Sens. 2020. Vol. 12. P. 938.
33. Dmitriev P.A., Kozlovsky B.L., Kupriushkin D.P., Lysenko V.S., Rajput V.D., Ignatova M.A., Tarik E.P., Kapralova O.A., Tokhtar V.K., Singh A.K., Minkina T.M., Varduni T.V., Sharma M., Taloor A.K., Thapliyal A. Identification of species of the genus *Acer* L. using vegetation indices calculated from the hyperspectral images of leaves // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2022. P. 100679. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100679>.
34. Alonzo M., Bookhagen B., Roberts D.A. Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion // Remote Sens. Environ. 2014. Vol. 148. P. 70–83.

35. Ortiz S.M., Breidenbach J., Knuth R., Kändler G. The influence of DEM quality on mapping accuracy of coniferous- and deciduous-dominated forest using TerraSAR-X images // *Remote Sens.* 2012. Vol. 4. P. 661–681.

36. Fukushima K. Neocognitron: A Self-organizing Neural Network Model for A Mechanism of Pattern Recognition Unaffected by Shift in Position // *Biological Cybernetics.* 1980. Vol. 36. P. 193–202. Doi: 10.1007/BF00344251.

37. Vapnik V.N. *The Nature of Statistical Learning Theory.* N.Y.: Springer-Verlag, 1995. 314 p.

38. Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // *Remote Sensing of Environment.* 2002. Vol. 83, № 1–2. P. 195–213. Bibcode:2002 RSEnv. 83.195H. Doi: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2.

39. Breiman L. Random Forests // *Machine Learning.* 2001. Vol. 45, № 1. P. 5–32. Doi: 10.1023/A:1010933404324.

40. Heinzl J., Koch B. Investigating Multiple Data Sources for Tree Species Classification in Temperate Forest and Use for Single Tree Delineation // *International J. of Applied Earth Observation.* 2012. Vol. 18. P. 101–110. Doi: 10.1016/j.jag.2012.01.025.

41. Mohri M., Rostamizadeh A., Talwalkar A. *Foundations of Machine Learning.* The MIT Press, 2012.

42. Hinton G., Sejnowski T. *Unsupervised Learning: Foundations of Neural Computation.* MIT Press, 1999.

43. Позов С.М., Дейнеко Е.В. Бактериальные внутриклеточные патогены: стратегии нападения и защиты // *Успехи современной биологии.* 2015. Т. 135, № 5. С. 464–479.

44. Матяшова Г.Н. Разработка и совершенствование методов диагностики фитоплазм – возбудителей болезней плодовых и ягодных культур : дис. ... канд. биол. наук. М., 2017. 150 с.

45. McNeil M., Roberts A.M.I., Cockerell V., Mulholland V. Real-time PCR assay for quantification of *Tilletia caries* contamination of UK wheat seed // *Plant Pathology.* 2004. Vol. 53. P. 741–750.

46. Кабашикова Л.Ф. Молекулярные механизмы взаимодействия растений и фитопатогенов: врожденный иммунитет // *Журн. Белорусского гос. ун-та. Экология.* 2018. № 2. С. 26–37.

47. Шкаликов В.А., Дьяков Ю.Т., Смирнов А.Н. [и др.] *Иммунитет растений.* М.: КолосС, 2005. 190 с.

48. Николайчик Е.А. Индукция и супрессия иммунного ответа растений бактериальным патогеном *Pectobacterium carotovorum* // *Тр. БГУ.* 2012. Т. 7, № 1, 2. С. 43–55.

49. Glowacki S., Macioszek V.K., Kononowicz A.K. Proteins as fundamentals of plant innate immunity // *Cellular & Molecular Biology Letters.* 2011. Vol. 16. P. 1–24.

50. Шафикова Т.Н., Омеличкина Ю.В. Молекулярно-генетические аспекты иммунитета растений к фитопатогенным бактериям и грибам // *Физиология растений.* 2015. Т. 62, № 5. С. 611–627. Doi: 10.7868/S0015330315050140.

51. Копытина Д.А., Касенова А.М., Омашева М.Е., Качиева З.С., Галиакбаров Н.Н. Молекулярные основы иммунитета растений // *Биотехнология. Теория и практика.* 2012. № 3. С. 31–41.

52. Вахрушева О.А., Недоспасов С.А. Система врожденного иммунитета у растений // *Молекулярная биология.* 2011. Т. 45, № 1. С. 20–29.

53. Polturak G., Dippe M., Stephenson M.J., Misra R.C., Owen C., Ramirez-Gonzalez R.H., Haidoulis J.F., Schoonbeek H.J., Chartrain L., Borrill P., Nelson D.R., Brown J.K.M., Nicholson P., Uauy C., Osbourn A. Pathogen-induced biosynthetic pathways encoded defense-related molecules in bread wheat // *PNAS.* 2022. Vol. 119, № 16. P. e2123299119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2123299119>.

54. Gröll K., Graeff S., Claupein W. Use of Vegetation indices to detect plant diseases. Agrarinformatik im Spannungsfeld zwischen Regionalisierung und globalen Wertschöpfungsketten, Referate der 27. GIL Jahrestagung, 5–7. März, Stuttgart, Germany. 2007. P. 91–94.

References

1. Federal State Statistics Service. Available from: <https://www.gks.ru> [Accessed 15th December 2021]. (In Russ.).

2. Koishybaev M. *Wheat diseases. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).* Ankara, 2018. 394 p. (In Russ.).

3. Volkova G.V. The study and use of the genetic potential of wheat resistance to fungal diseases. *Zashchita i karantin rastenii = Protection and Quarantine of Plants.* 2010;(9):13-17. (In Russ.).

4. Tibebu B., Nuh B. Biotechnological tools for detection, identification and management of plant diseases. *African Journal of Biotechnology.* 2019;18(29):797-807, doi: 10.5897/ajb2018.16591.

5. Ahmad F., Babalola O.O., Tak H.I. Potential of MALDI-TOF mass spectrometry as a rapid detection technique in plant pathology: identification of plant-associated microorganisms. *Analytical and Bioanalytical Chemistry.* 2012;404(4):1247-1255. Doi:10.1007/s00216-012-6091-7.

6. Dyakov Yu.T. *General and molecular phytopathology.* Moscow: Society of Phytopathologists Press; 2001. 301 p. (In Russ.).

7. Baranov O.Yu. Molecular phytopathology: modern approaches and main directions of diagnostics of diseases of woody plants. *Sib. lesnoi zhurn. = Siberian Journal of Forest Science.* 2014;(4):42-45. (In Russ.).

8. Padutov V.E., Baranov O.Yu., Voropaev E.V. *Methods of molecular genetic analysis*. Minsk: Yunipol Publ.; 2007. 176 p. (In Russ.).
9. Alimova T.S., Sivolapov V.A., Karpechenko N.A., Shishkina O.K., Panteleev S.V., Kovalevich O.A. Application of molecular genetics methods for the analysis of the presence of phytopathogens in forest plantations and nurseries of the Russian Federation. *Sib. lesnoi zhurn. = Siberian Journal of Forest Science*. 2014;(4):35-41. (In Russ.).
10. Baranov O.Yu., Yarmolovich V.A., Panteleev S.V., Kupreenko D.G. Molecular genetic diagnostics of fungal diseases in forest nurseries. *Lesnoe i okhotnich'e khozyaistvo = Forestry and Hunting*. 2012;(6):21-29. (In Russ.).
11. Baranov O.Yu., Padutov V.E., Panteleev S.V. Molecular genetic labeling of pathogenesis of forest tree species. *Youth in Science – 2009. App. to the magazine “Vestn. Nats. acad. navuk Belarussi. Ser. biyal. navuk”*. 2010;(4):10-12. (In Russ.).
12. Baranov O.Yu., Yarmolovich V.A., Panteleev S.V. Molecular genetic features of schutte-affected tissues of needles of European spruce seedlings. *Current state and prospects of forest protection and protection in the system of sustainable development. Proceedings of the International Scientific Conference*. Gomel: Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus Press; 2013:63-66. (In Russ.).
13. Charles T. *Metagenomics: theory, methods and applications*. Caister Academic Press; 2010. 212 p.
14. *National Center for Biotechnological Information, NCBI*. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/Genbank> [Accessed 15th December 2021].
15. White T. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. *PCR protocols: a guide to methods and applications*. Academic Press; 1990:315-322.
16. Khalilov I., Azimova N., Kobilov F., Mardonov I., Nazirov M. Molecular genetic identification and CRY-gene analysis of *Bacillus thuringiensis* native bacterial strains. *Conference “Biology and Biotechnology of Microorganisms”*. September 16-17. Tashkent, Uzbekistan, 2021.
17. Gardes M., Bruns T. D. ITS primers with enhanced specificity for Basidiomycetes: application to identification of mycorrhizae and rusts. *Mol. Ecol.* 1993;(2):113-118.
18. Vilgalys R., Hester M. Rapid genetic identification and mapping of enzymatically amplified ribosomal DNA from several *Cryptococcus* species. *J. Bacteriol.* 1990;(172):4238-4246.
19. Lu J.-J., Perng C.-L., Lee S.-Y., Wan C.-C. Use of PCR with Universal Primers and Restriction Endonuclease Digestions for Detection and Identification of Common Bacterial Pathogens in Cerebrospinal Fluid. *Journal of Clinical Microbiology*. 2000;38(6):2076-2080.
20. Edwards U., Rogall T., Blocker H., Emde M., Bottger E.C. Isolation and direct complete nucleotide determination of entire genes. Characterization of a gene coding for 16S ribosomal RNA. *Nucleic Acids Res.* 1989;17:7843-7853.
21. Reysenbach A.L., Wickham G.S., Pace N.R. Phylogenetic analysis of the hyperthermophilic pink filament community in Octopus Spring, Yellowstone National Park. *Appl. Environ. Microbiol.* 1994;60:2113-2119.
22. Tooley P. W. [et al.]. Development of PCR primers from internal transcribed spacer region 2 for detection of *Phytophthora* species infecting potatoes. *Appl. Environ. Microbiol.* 1997;63:1467-1475.
23. Pilshchikova N.S., Gannibal F.B. Identification of wheat false eyespot agent *Gibellina cerealis* by use of PCR. *Vestn. zashchity rastenii = Plant Protection News*. 2015;3(85):46-50. (In Russ.).
24. Skolotneva E.S. *Variability of intraspecific structures of Puccinia graminis Pers.* Dissertation. Moscow, 2008. 121 p. (In Russ.).
25. Maleeva Yu.V., Lebedeva L.A., Insarova I.D., Lekomtseva S.N. Investigation of genetic variability of geographical isolates of the causative agent of wheat stem rust *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*. *Zhurn. RFO = Journal of the Russian Society of Phytopathologists*. 2004;(1-4):31-40. (In Russ.).
26. Popov A.P., Tsvetkov I.L., Belov A.A., Konichev A.S., Ivanushkina N.E., Kochkina G.A., Ozerskaya S.M. Molecular genetic identification of the phytopathogenic fungus *Cryphonectria parasitica*. *Microbiology*. 2010;79(2):223-228.
27. Zhang L., Baasiri R.A., van Alfen N.K. Vira Repression of Fungal Pheromone Precursor Gene Expression. *Mol. Cell. Biol.* 1998;18:953-958.
28. Blakeman R.H. The identification of crop disease and stress by aerial photography. *Applications of Remote Sensing in Agriculture*. Butterworths; London, 1990:229-254, doi: 10.1016/b978-0-408-04767-8.50020-7.
29. Colwell R.N. Determining the prevalence of certain cereal crop diseases by means of aerial photography. *Hilgardia*. 1956;26:223.
30. Jim Lee Y. Aerial photography for the detection of soil-borne disease. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 1989;11(2):173-176, doi:10.1080/07060668909501134.
31. Yu K., Kang Yu, Leufen G., Hunsche M., Noga G.J., Chen X., Bareth G. Investigation of leaf diseases and estimation of chlorophyll concentration in seven barley varieties using fluorescence and hyperspectral indices. *Remote Sensing*. 2013;6:64-86.
32. Huichun Ye, Wenjiang Huang, Shanyu Huang, Bei Cui, Yingying Dong, Anting Guo, Yu Ren, Yu Jin. Recognition of Banana Fusarium Wilt Based on UAV Remote Sensing. *Remote Sens.* 2020;12:938.

33. Dmitriev P.A., Kozlovsky B.L., Kupriushkin D.P., Lysenko V.S., Rajput V.D., Ignatova M.A., Tarik E.P., Kapralova O.A., Tokhtar V.K., Singh A.K., Minkina T.M., Varduni T.V., Sharma M., Taloor A.K., Thapliyal A. Identification of species of the genus *Acer* L. using vegetation indices calculated from the hyperspectral images of leaves. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2022;100679, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100679>.
34. Alonzo M., Bookhagen B., Roberts D.A. Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion. *Remote Sens. Environ.* 2014;148:70-83.
35. Ortiz S.M., Breidenbach J., Knuth R., Kändler G. The influence of DEM quality on mapping accuracy of coniferous- and deciduous-dominated forest using TerraSAR-X images. *Remote Sens.* 2012;4:661-681.
36. Fukushima K. Neocognitron: A Self-organizing Neural Network Model for A Mechanism of Pattern Recognition Unaffected by Shift in Position. *Biological Cybernetics*. 1980;36:193-202, doi: 10.1007/BF00344251.
37. Vapnik V.N. *The Nature of Statistical Learning Theory*. New York: Springer-Verlag Publ.; 1995. 314 p.
38. Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 2002;83(1-2):195-213. Bibcode:2002 RSEnv. 83.195H. Doi:10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
39. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*. 2001;45(1):5-32, doi: 10.1023/A:1010933404324.
40. Heinzl J., Koch B. Investigating Multiple Data Sources for Tree Species Classification in Temperate Forest and Use for Single Tree Delineation. *International Journal of Applied Earth Observation*. 2012;18:101-110, doi: 10.1016/j.jag.2012.01.025.
41. Mohri M., Rostamizadeh A., Talwalkar A. *Foundations of Machine Learning*. The MIT Press; 2012.
42. Hinton G., Sejnowski T. *Unsupervised Learning: Foundations of Neural Computation*. MIT Press; 1999.
43. Rozov S.M., Deineko E.V. Bacterial intracellular pathogens: attack and defense strategies. *Uspekhi sovremennoi biologii = Advances in Modern Biology*. 2015;135(5):464-479. (In Russ.).
44. Matyashova G.N. *Development and improvement of methods for diagnosing phytoplasmas - causative agents of diseases of fruit and berry crops*. Dissertation. Moscow, 2017. 150 p. (In Russ.).
45. McNeil M., Roberts A.M.I., Cockerell V., Mulholland V. Real-time PCR assay for quantification of *Tilletia caries* contamination of UK wheat seed. *Plant Pathology*. 2004;53:741-750.
46. Kabashnikava L.F. Molecular mechanisms of interaction between plants and phytopathogens: innate immunity. *Zhurnal Belorusskogo gos. un-ta. Ekologiya = Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2018;(2):26-37. (In Russ.).
47. Shkalikov V.A., Dyakov Yu.T., Smirnov A.N. [et al.]. *Plant immunity*. Moscow: KolosS Publ.; 2005. 190 p. (In Russ.).
48. Nikolaichik Y.A. Induction and suppression of plant immune response by bacterial pathogen *Pectobacterium carotovorum*. *Tr. BGU = Proceedings of BSU*. 2012;7(1-2):43-55. (In Russ.).
49. Glowacki S., Macioszek V.K., Kononowicz A.K. Proteins as fundamentals of plant innate immunity. *Cellular & Molecular Biology Letters*. 2011;16:1-24.
50. Shafikova T.N., Omelichkina Yu.V. Molecular genetic aspects of plant immunity to phytopathogenic bacteria and fungi. *Fiziologiya rastenii = Plant Physiology*. 2015;62(5):611-627, doi: 10.7868/S0015330315050140. (In Russ.).
51. Kopytina D.A., Kasenova A.M., Omasheva M.E., Kachieva Z.S., Galiakparov N.N. Molecular basis of plant immunity. *Biotekhnologiya. Teoriya i praktika = Biotechnology. Theory and practice*. 2012;(3):31-41. (In Russ.).
52. Vakhrusheva O.A., Nedospasov S.A. The system of innate immunity in plants. *Molekulyarnaya biologiya = Molecular Biology*. 2011;45(1):20-29. (In Russ.).
53. Polturak G., Dippe M., Stephenson M.J., Misra R.C., Owen C., Ramirez-Gonzalez R.H., Haidoulis J.F., Schoonbeek H.J., Chartrain L., Borrill P., Nelson D.R., Brown J.K.M., Nicholson P., Uauy C., Osbourn A. Pathogen-induced biosynthetic pathways encoded defense-related molecules in bread wheat. *PNAS*. 2022;119(16):e2123299119, <https://doi.org/10.1073/pnas.2123299119>.
54. Gröll K., Graeff S., Claupein W. Use of Vegetation indices to detect plant diseases. *Agrarinformatik im Spannungsfeld zwischen Regionalisierung und globalen Wertschöpfungsketten, Referate der 27. GIL Jahrestagung*, 5.-7. März 2007. Stuttgart, Germany, 2007:91-94.

Информация об авторах

Василий Александрович Чохели – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник, ведущий инженер, Ботанический сад.

Павел Александрович Дмитриев – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Ботанический сад.

Борис Леонидович Козловский – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Ботанический сад.

Виктория Вячеславовна Степаненко – биолог, Ботанический сад.

Анастасия Анатольевна Дмитриева – лаборант, Ботанический сад.

Анастасия Аркадьевна Бушкова – студент, кафедра ботаники, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Вишну Даял Раджпут – ведущий научный сотрудник, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Денис Павлович Купрюшкин – директор учебно-опытного хозяйства «Недвиговка», Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Ольга Анатольевна Капралова – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Ботанический сад.

Татьяна Викторовна Вардунни – доктор биологических наук, профессор, директор Ботанического сада.

Information about the authors

Vasiliy A. Chokheli - Candidate of Science (Biology), Junior Researcher, Leading Engineer, Botanical Garden.

Pavel A. Dmitriev - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Botanical Garden.

Boris L. Kozlovsky - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Botanical Garden.

Victoriya V. Stepanenko - Biologist, Botanical Garden.

Anastasia A. Dmitrieva - Laboratory Assistant, Botanical Garden.

Anastasia A. Bushkova - Student, Department of Botany, Academy of Biology and Biotechnology.

Vishnu Dayal Rajput - Leading Researcher, Academy of Biology and Biotechnology.

Denis P. Kupryushkin - Director of the Educational and experimental farm "Nedvigovka", Academy of Biology and Biotechnology.

Olga A. Kapralova - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Botanical Garden.

Tatiana V. Varduny - Doctor of Science (Biology), Professor, Director of the Botanical Garden.

*Статья поступила в редакцию 11.07.2022; одобрена после рецензирования 16.08.2022; принята к публикации 15.11.2022.
The article was submitted 11.07.2022; approved after reviewing 16.08.2022; accepted for publication 15.11.2022.*

Научная статья

УДК 631.46, 574.42

doi: 10.18522/1026-2237-2022-4-2-139-147

БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ БУРОЗЕМОВ В МОЛОДЫХ «ОКНАХ» ПОЛОГА ЛЕСА КАВКАЗСКОГО БИОСФЕРНОГО ЗАПОВЕДНИКА

Аслан Капланович Шхапацев¹, Евгений Александрович Грабенко²,
Камиль Шагидуллович Казеев³✉

¹ Майкопский государственный технологический университет, Майкоп, Республика Адыгея, Россия

² Институт географии РАН, Москва, Россия

³ Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ f_agr_technolog@mkgtu.ru

² grabenko@inbox.ru

³ kamil_kazeev@mail.ru✉

Аннотация. Проведены исследования экологических особенностей и биологической активности буроземов кислых низкогорий в верхнем течении реки Белой на Западном Кавказе, выполненные на территории Кавказского государственного природного биосферного заповедника в коренных буково-пихтовых лесах и «окнах» вывалов, образованных на месте гибели старых деревьев. «Окна» возрастом 2–6 лет характеризуются повышенной инсоляцией и особым микроклиматом, быстро зарастают подростом и травянистой растительностью. Это приводит к изменению физических, химических и биологических свойств буроземов. Существенно возрастает влажность почв, степень насыщенности почв основаниями, возрастает содержание гумуса и активного углерода. Изменение эдафических свойств приводит к увеличению численности микроорганизмов и микробной биомассы. Ферментативная активность буроземов разных участков значительно варьирует и не имеет однозначного поведения. Несмотря на различия в значениях отдельных показателей биологической активности, интегральная оценка показала практически равные величины для буроземов коренных лесов и молодых «окон» вывалов.

Ключевые слова: сукцессии, биоиндикация почв, ферментативная активность

Благодарности: исследование выполнено при поддержке ведущей научной школы Российской Федерации (НШ-2511.2020.11) и программы стратегического академического лидерства Южного федерального университета («Приоритет 2030»), № СП-12-22-9).

Для цитирования: Шхапацев А.К., Грабенко Е.А., Казеев К.Ш. Биологическая активность буроземов в молодых «окнах» полога леса Кавказского биосферного заповедника // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 4-2. С. 139–147.

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

Original article

BIOLOGICAL ACTIVITY OF BUROZEMS IN YOUNG “WINDOWS” OF THE FOREST CANOPY OF THE CAUCASUS BIOSPHERE RESERVE

Aslan K. Shkhatsev¹, Evgeny A. Grabenko², Kamil Sh. Kazeev³✉

¹ Maykop State Technological University, Maykop, Republic of Adygea, Russia

² Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹ f_agr_technolog@mkgtu.ru

² grabenko@inbox.ru

³ kamil_kazeev@mail.ru✉

© Шхапацев А.К., Грабенко Е.А., Казеев К.Ш., 2022

Abstract. *The ecological features and biological activity of Cambisols of acidic low mountains in the upper reaches of the Belaya River in the Western Caucasus have been carried out. The studies were carried out on the territory of the Caucasian State Natural Biosphere Reserve in the primary beech-fir forests and “windows” of fallouts formed at the site of the death of old trees. The investigated “windows” aged 2-6 years are characterized by increased insolation and a special microclimate, they quickly overgrow with undergrowth and grassy vegetation. This leads to a change in the physical, chemical and biological properties of Cambisols. The moisture content of soils, the degree of saturation of soils with bases increase significantly, the content of humus and active carbon increases. A change in edaphic properties leads to an increase in the number of microorganisms and microbial biomass. The enzyme activity of Cambisols from different areas varies considerably and does not have an unambiguous behavior. Despite the differences in the values of individual indicators of biological activity, the integral assessment showed practically equal values for the Cambisols of primary forests and young “windows” of fallouts.*

Keywords: *successions, soil bioindication, enzyme activity*

Acknowledgments: *the study was supported by the leading scientific school of the Russian Federation (NSh-2511.2020.11) and the Strategic Academic Leadership Program of the Southern Federal University (“Priority 2030”, No. SP-12-22-9).*

For citation: *Shkhatpatsev A.K., Grabenko E.A., Kazeev K.Sh. Biological Activity of Burozems in Young “Windows” of the Forest Canopy of the Caucasus Biosphere Reserve. Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science. 2022;(4-2):139-147. (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

Кавказский государственный природный биосферный заповедник является крупнейшим естественным резерватом природы на Западном Кавказе, практически не подверженным прямому антропогенному воздействию [1]. Леса покрывают 62 % территории заповедника. Лесной пояс северного макросклона представлен мезофитными широколиственными буковыми, дубово-грабовыми и темнохвойными, преимущественно буково-пихтовыми лесами. В пределах 600–1900 м среди лесов преобладают пихтарники и буко-пихтарники, составляющие 44 % всей лесной площади заповедника [2].

Естественные леса представляют собой сукцессивную мозаику элементов мозаично-ярусной структуры. Мозаика формируется в естественных лесах после нарушений, приводящих к образованию прорывов в сплошном пологе леса. «Окно» – небольшой по площади участок леса, образующийся в сомкнутом пологе деревьев. Размеры прорывов – «окон» – в пологе леса определяют видовой состав успешно возобновляющихся древесных видов и их количественные сочетания [3]. В результате появляются ветровально-почвенные комплексы. Особенности сукцессий и запасов органического углерода в подобных условиях в лесах Северо-Западного Кавказа исследованы ранее [4, 5]. Подобные изменения могут возникать и при антропогенных воздействиях на лесные экосистемы. Основными факторами воздействия на лесные экосистемы являются рубка и пожары [6–8], которые способны привести к ухудшению экологического состояния почв и даже к полной ее деградации в результате эрозии, активно проявляющейся в нарушенных лесах в условиях расчлененного рельефа [9]. Ранее на Западном Кавказе было выявлено, что на после-лесных участках после рубки лесов почвенный покров и почвы претерпевают существенную трансформацию [10]. При этом отмечены не только ухудшение экологического состояния и даже полная деградация почв, но и улучшение гумусного состояния и биологической активности почв на отдельных участках вырубков в результате экотонного эффекта [11–14]. Биологические свойства почв быстрее других реагируют на внешние воздействия, что позволяет использовать методы биоиндикации для оценки экологического состояния почв и почвенного покрова [15–17]. Среди биологических показателей высокой информативностью и чувствительностью обладают почвенные экзоферменты [18–20]. Ферментативная активность почв может быть использована в качестве диагностического показателя плодородия [21, 22], загрязнения [23, 24], климатических изменений [25–28]. Методы почвенной энзимологии также успешно используются при оценке последствий лесных пожаров [7, 29–31].

Цель работы – изучение закономерностей изменения биологической активности буроземов Западного Кавказа на начальных стадиях образования «окон» вывалов деревьев в пологе древостоя.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили в верховьях р. Белой (Республика Адыгея, Кавказский биосферный заповедник). Данная территория относится к Западной горной провинции Большого Кавказа. Среднегодовое количество осадков составляет 1200 мм. Среднегодовая температура – +10,3 °С. Высота над уровнем моря 650–700 м. Исследуемая территория занята старовозрастными пихто-буковыми (*Fagus orientalis* и *Abies nordmanniana*) мертвопокровными сообществами в терминальной стадии [5]. Исследуемые участки окон находятся на ранней стадии восстановительной сукцессии (таблица).

В почвенном покрове исследуемой территории отмечены буроземы кислые и глееватые или Cambisols Dystric [32] на элювии глинистых сланцев. Подстилка маломощная, деструктивного типа.

В настоящую работу вошли результаты исследований, проведенных с 2010 по 2020 г. ежегодно в летний период. На каждом участке было отобрано по 3 почвенных образца почв случайно на расстоянии нескольких метров друг от друга. Глубина отбора образцов составляла 0–10 см, в нескольких случаях отбор проводили по всему почвенному профилю.

Характеристика участков исследований / Characteristics of research sites

| Участок | Растительность | Географические координаты | Высота над уровнем моря, м | Почва |
|---------------------------------|--|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Контрольный лес № 1 | Буково-пихтовый лес трехярусный мертвопокровный | 44°12.602' с.ш., 40°11.543' в.д. | 700 | Бурозем кислый слабокаменистый |
| «Окно» 4–6 лет, размер 20×8 м | Травянистая стадия сукцессии | 43°59.689' с.ш., 40°08.499' в.д. | 717 | Бурозем кислый слабокаменистый |
| Контрольный лес № 2 | Пихто-букняк трехярусный мертвопокровный, 7Б 3П | 43°59.531' с.ш., 40°08.160' в.д. | 703 | Бурозем турбированный |
| «Окно» 3–4 года, размер 20×10 м | Восстановительная сукцессия, подрост бука, граба, папоротник | 43°59.533' с.ш., 40°08.175' в.д. | 738 | Бурозем глееватый турбированный |
| Контрольный лес № 3 | Буко-пихтарник, 6П 4Б, мертвопокровный | 44°00.000' с.ш., 40°08.544' в.д. | 692 | Бурозем кислый |
| «Окно» 2 года, размер 15×5 м | Травянисто-кустарниковая стадия зарастания | 44°00.000' с.ш., 40°08.544' в.д. | 690 | Бурозем глееватый |

Лабораторно-аналитические исследования проведены в лабораториях Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета. Исследовали физические, химические и биологические свойства почв с использованием традиционных и современных методов [33]. Статистическая обработка данных выполнена с использованием методов вариационной статистики и дисперсионного анализа в программах MS Excel и Statistica.

Результаты и обсуждение

Исследуемые «окна» возрастом 2–6 лет и площадью 75–200 м² характеризуются повышенной инсоляцией и особым микроклиматом, быстро зарастают подростом и травянистой растительностью. Это приводит к изменению физических, химических и биологических свойств буроземов. Исследования показали значительное расхождение значений влажности почв в исследуемых буроземах. В почвах «окон» выявлены достоверно более высокие значения этого показателя (рис. 1), потому что кроны деревьев не задерживают атмосферную влагу в дождливый период во время полевых исследований. Температурных отличий в почвах разных мест наблюдения не выявлено. Избыточное увлажнение способствовало некоторому ухудшению структурности почв в «окнах» по сравнению с фоновыми участками лесов. Однако даже при этом содержание ценных почвенных

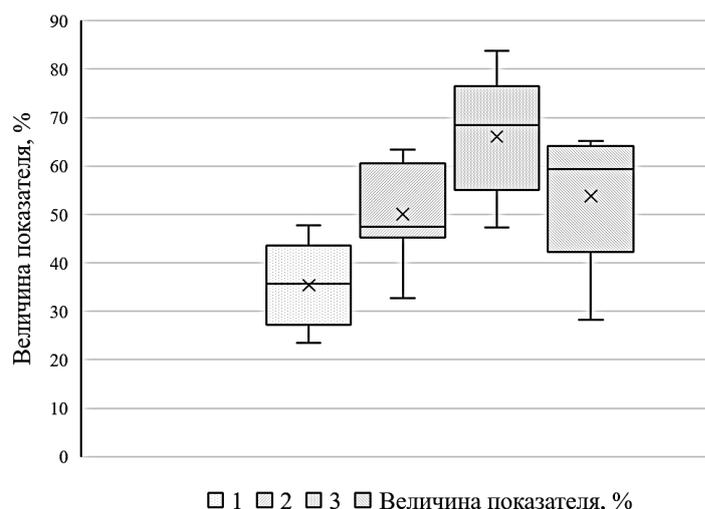


Рис. 1. Влажность и структурность буроземов, %:
 1 – влажность в лесу; 2 – влажность в «окнах»;
 3 – структурность в лесу; 4 – структурность в «окнах»
 / Fig. 1. Humidity and structure of burozems, %:
 1 - humidity in the forest; 2 - humidity in the “windows”;
 3 - structure in the forest; 4 - structure in “windows”

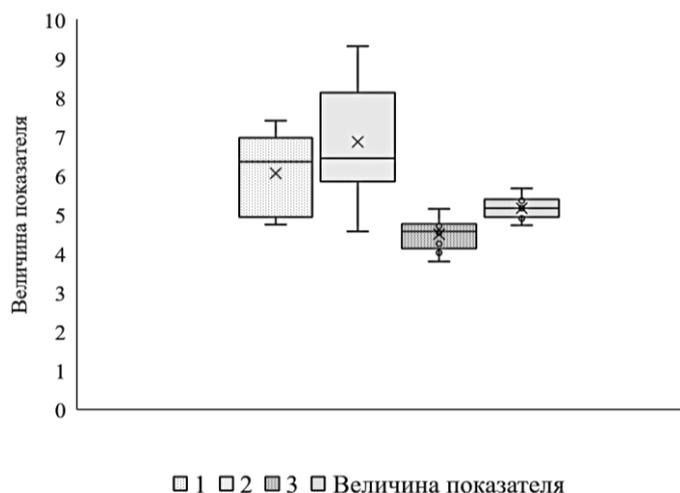


Рис. 2. Содержание гумуса, %, и численность бактерий, млрд/г, в буроземах: 1 – гумус в почвах леса; 2 – гумус в почвах «окон»; 3 – бактерии в почвах леса; 4 – бактерии в почвах «окон» / Fig. 2. Humus content, %, and number of bacteria, billion/g, in burozems: 1 - humus in forest soils; 2 - humus in soils of “windows”; 3 - bacteria in forest soils; 4 - bacteria in soils of “windows”

значительна только в поверхностных горизонтах, обогащенных органическим веществом. Для профильного распределения активности ферментов характерно типичное резко убывающее поведение [34]. Значения активности разных ферментов в большинстве случаев находятся на среднем уровне обогащенности. Выявлено высокое пространственное варьирование значений активности ферментов в исследуемых почвах, что существенно затрудняет установление достоверности различий (рис. 3). Изменения ферментативной активности в первые годы формирования «окон» не имеют однозначной реакции. Различные ферменты, отражающие те или иные биологические процессы в

агрегатов в буроземах отличное в лесу и хорошее в почвах «окон». Водопрочность почвенных агрегатов была тоже на очень высоком уровне, независимо от мест отбора образцов. Произрастание травянистой растительности в «окнах» положительно сказалось на степени насыщенности почв основаниями, которая возросла на 34 %. Обменная и гидролитическая кислотности при этом практически не изменились, рН_{KCl} составлял 4,1. Улучшение степени насыщенности почв произошло за счет увеличения значений поглощенных кальция и магния.

Содержание гумуса в почвах «окон» существенно превышает показатели фоновых участков леса. В поверхностном слое почвы в «окнах» содержание гумуса в среднем составляет 6,9 %, что в 1,13 раза превышает фоновые значения (рис. 2). Практически аналогично изменяется содержание активного углерода, которое в «окнах» повышено на 10 %, что свидетельствует о более существенной доступности источников питания для почвенных микроорганизмов. Об увеличении на 20 % содержания гумуса в почвах на начальных этапах рубочной сукцессии по сравнению с лесными почвами сообщали и другие исследователи [4]. Для дерново-карбонатных почв района исследований увеличение биоразнообразия, биологической активности и гумусности на периферийных участках вырубок в результате опушечного эффекта также известно [11–14].

Изменение эдафических свойств приводит к изменению численности микроорганизмов и биологической активности буроземов. Общая численность бактерий в среднем на 15 %, а микробная биомасса на 71 % выше в поверхностном слое буроземов «окон».

Ферментативная активность исследуемых фоновых буроземов весьма

почвах, имеют разную специфику поведения. Активность каталазы и фосфатазы (10 %) незначительно увеличивается на 10–13 %. Активность дегидрогеназы и инвертазы не имеет достоверных различий в почвах исследуемых участков. В поверхностных слоях молодых «окон» существенно уменьшилась активность уреазы (35 %), менее значительно – активность пероксидазы (10 %).

Интегрированная оценка биологической активности буроземов способна оценить совокупность параметров, выраженных в разных величинах. Ранее подобный способ был успешно использован для выявления закономерностей влияния климатических параметров на биологические свойства почв [27, 28, 34]. Использование интегрированного показателя биологических свойств (ИПБС), объединившего 10 разных показателей, дало близкие значения параметра при высоком варьировании показателя в целом (рис. 4). Это связано с недостаточным размером образующихся «окон», которые в хвойно-широколиственных лесах Северо-Западного Кавказа с большой высотой верхнего древесного яруса имеют сильное боковое затенение [4, 5].

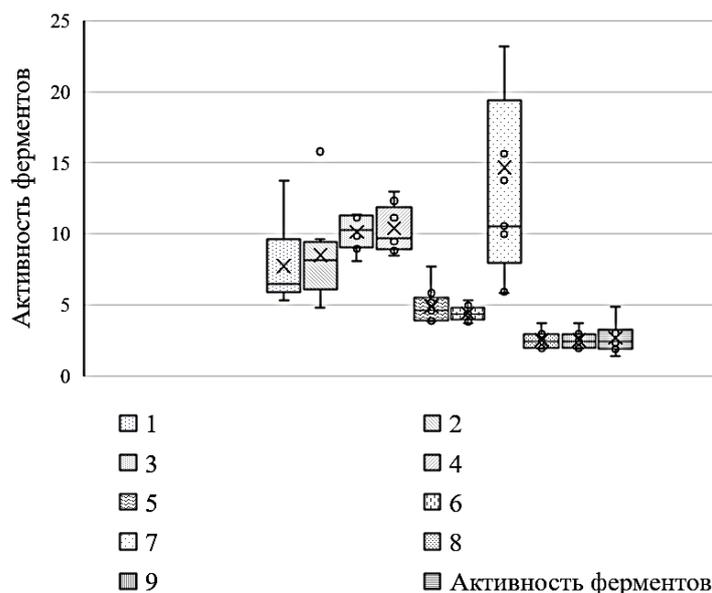


Рис. 3. Активность ферментов в буроземах: 1, 2 – каталаза в почвах леса и «окон», мл O₂ г/мин; 3, 4 – дегидрогеназа, мг ТФФ 10 г/24 ч; 5, 6 – пероксидаза, мг бензохинона г/30 мин; 7, 8 – уреазы, мг N-NH₄ 10г/24 ч; 9, 10 – инвертаза, мг глюкозы г/24 ч / Fig. 3. Activity of enzymes in burozems: 1, 2 - catalase in forest soils and "windows", ml O₂ g/min; 3, 4 - dehydrogenase, mg TPP 10 g/24 h; 5, 6 - peroxidase, mg benzoquinone g/30 min; 7, 8 - urease, mg N-NH₄ 10 g/24 h; 9, 10 - invertase, mg glucose g/24 h

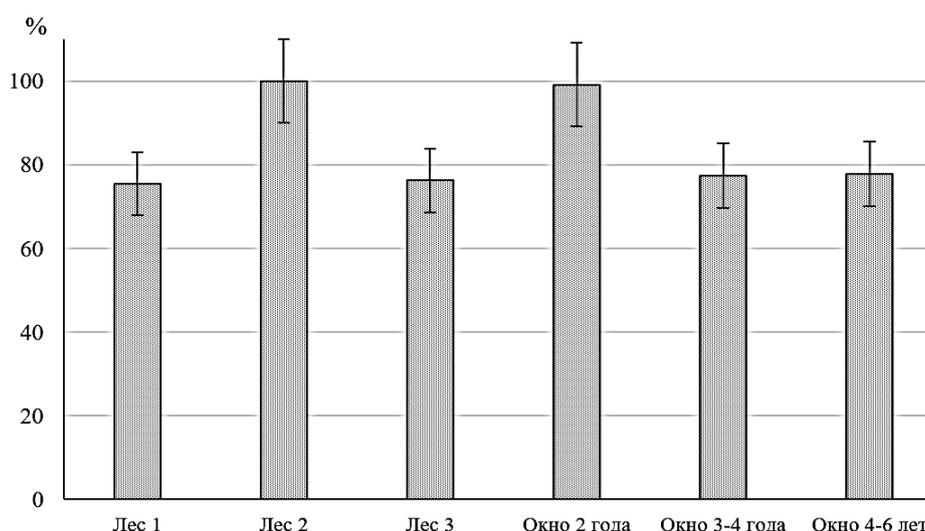


Рис. 4. ИПБС буроземов / Fig. 4. Integrated index of biological properties of burozems

Максимальные значения ИПБС отмечены в буроземе участка леса с доминированием бука по сравнению с лесными участками с доминированием пихты. Ранее было отмечено, что опад пихты менее благоприятен для биологических процессов в почвах вследствие большей устойчивости к биологическому разложению [5].

Наряду с факторами, способствующими появлению густой травянистой растительности и развитию дернового процесса, что благоприятствует активизации биологических процессов в почвах, существуют и факторы, их ограничивающие. Например, выявлено [4], что поступление органического углерода в лесах под кронами в 3 раза выше, чем в «окнах». В связи с этим изменяется локализация поступления органического вещества преимущественно на поверхность почвы, как в климаксных лесных экосистемах или с поступлением значительной доли в верхние слои почвы с корневым опадом растений начальных стадий сукцессий в «окнах».

Таким образом, установлено, что свойства буроземов Западного Кавказа могут быстро трансформироваться в образовавшихся «окнах». Биологическая активность исследуемых почв определяется многими факторами, включая степень нарушения почвенно-растительного покрова, время восстановления, содержание органического вещества, вид показателя. Интегрированная оценка показала относительную однородность биологической активности буроземов молодых «окон» при существенном варьировании отдельных показателей.

Список источников

1. Bibin A.R., Trepet S.A., Akatova T.V., Grabenko E.A. Caucasian state nature biosphere reserve // The Republic of Adygea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry. Switzerland, 2020. P. 603–631.
2. Акатов В.В., Голгофская К.Ю., Горчарук Л.Г., Дуров В.В., Кипиани В.В., Кудактин А.Н., Немцов А.С., Придня М.В., Тильба П.А., Топилина В.Г. Кавказский заповедник // Заповедники СССР: Заповедники Кавказа. М.: Мысль, 1990. С. 69–100.
3. Попадюк Р.В., Чистякова А.А., Чумаченко С.И., Евстигнеев О.И., Заугольнова Л.Б., Истомина И.И., Киселева Л.Л., Костяев С.А., Смирнова О.В., Торопова Н.А., Французов А.В., Ханина Л.Г., Чернов Н.И., Яницкая Т.О. Восточноевропейские широколиственные леса / под ред. О.В. Смирновой. М.: Наука, 1994. 364 с.
4. Лукина Н.В., Тихонова Е.В., Шевченко Н.Е., Горнов А.В., Кузнецова А.И., Гераськина А.П., Смирнов В.Э., Горнова М.В., Ручинская Е.В., Анищенко Л.Н., Тебенькова Д.Н., Данилова М.А., Бахмет О.Н., Крышень А.М., Князева С.В., Шашков М.П. [и др.]. Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. 232 с.
5. Шевченко Н.Е., Кузнецова А.И., Тебенькова Д.Н., Смирнов В.Э., Гераськина А.П., Горнов А.В., Грабенко Е.А., Тихонова Е.В., Лукина Н.В. Сукцессионная динамика растительности и запасы почвенного углерода в хвойно-широколиственных лесах Северо-Западного Кавказа // Лесоведение. 2019. № 3. С. 163–176.
6. Дьмов А.А. Влияние сплошных рубок в бореальных лесах России на почвы (обзор) // Почвоведение. 2017. № 7. С. 787–798.
7. Kazeev K.Sh., Poltoratskaya T.A., Yakimova A.S., Odobashyan M.Yu., Shkhatpatsev A.K., Kolesnikov S.I. Post-fire changes in the biological properties of the brown soils in the Utrish State Nature Reserve (Russia) // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2019. № 4 (Suppl. 1). С. 93–104.
8. Mayer M., Prescott C.E., Abaker W.E.A., Augusto L., Cécillon L., Ferreira G.W.D., James J., Jandl R., Katzensteiner K., Laclau J.P., Laganière J., Nouvellon Y., Paré D., Stanturf J.A., Vanguelova E.I., Vesterdal L. Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis // Forest Ecology and Management. 2020. Vol. 466. P. 118–127.
9. Ивонин В.М., Тертерян А.В. Эрозия почвы во время ливней в производных лесах Северо-Западного Кавказа // Изв. высших учебных заведений. Лесной журнал. 2015. № 1 (343). С. 54–61.
10. Казеев К.Ш., Тер-Мисакянц Т.А., Кузнецова Ю.С., Поляков А.И., Кутузова И.В., Мазанко М.С., Прудникова М.В., Колесников С.И. Влияние вырубки леса на биологические свойства горных почв Западного Кавказа // Политематич. сетевой электр. науч. журн. Кубанского гос. аграрного ун-та (Научный журнал КубГАУ). 2012. № 08(82). С. 1059–1069.
11. Казеев К.Ш., Солдатов В.П., Шханацев А.К., Шевченко Н.Е., Грабенко Е.А., Ермолаева О.Ю., Колесников С.И. Изменение свойств дерново-карбонатных почв после сплошной рубки в хвойно-широколиственных лесах Северо-Западного Кавказа // Лесоведение. 2021. № 4. С. 426–436.
12. Солдатов В.П., Шханацев А.К., Казеев К.Ш., Азаренко М.А., Колесников С.И. Ферментативная активность и содержание гумуса в послелесных почвах Адыгеи // АгроЭкоИнфо. 2020. № 3. С. 1–20.
13. Солдатов В.П., Шханацев А.К., Казеев К.Ш., Харитонова Т.Д., Казеев Д.К., Колесников С.И. Динамика изменения активности ферментов в почвах Адыгеи с разной степенью нарушения после сведения леса // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2020. № 4. С. 105–111.
14. Shkhatpatsev A.K., Soldatov V.P., Kazeev K.Sh., Grabenko E.A., Kolesnikov S.I. Biological Activity of Soils of Low-Mountain Reliefs in Adygeya after Forest Felling // Indian J. of Ecology. 2021. Vol. 48(5). P. 1383–1388.
15. Creamer R.E., Hannula S.E., Van Leeuwen J.P., Stone D., Rutgers M., Schmelz R.M., De Ruiter P.C., Hendriksen N.B., Bolger T., Bouffaud M.L., Buee M., Carvalho F., Costa D., Dirilgen T., Francisco R., Griffiths B.S., Griffiths R., Martin F., Da Silva M.P., Mendes S., Morais P.V., Pereira C., Philippot L., Plassart P., Redecker D., Römbke J., Sousa J.P., Wouterse M., Lemaire P. Ecological network analysis reveals the inter-connection between soil biodiversity and ecosystem function as affected by land use across Europe // Applied Soil Ecology. 2016. Vol. 97. P. 112–124.

16. Никитин Д.А., Семенов М.В., Чернов Т.И., Ксенофонтова Н.А., Железова А.Д., Иванова Е.А., Хитров Н.Б., Степанов А.Л. Микробиологические индикаторы экологических функций почв (обзор) // Почвоведение. 2022. № 2. С. 228–243.
17. Thiele-Bruhn S., Schloter M., Wilke B.-M., Beaudette L. A., Martin-Laurent F., Cheviron N., Mougin C., Römbke J. Identification of new microbial functional standards for soil quality assessment // Soil. 2020. Vol. 6. P. 17–34.
18. Sinsabaugh R.L., Lauber C.L., Weintraub M.N., Ahmed B., Allison S.D., Crenshaw C., Contosta A.R., Cusack D., Frey S., Gallo M.E., Gartner T.B., Hobbie S.E., Holland K., Keeler B.L., Powers J.S., Stursova M., Takacs-Vesbach C., Waldrop M.P., Wallenstein M.D., Zak D.R., Zeglin L.H. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale // Ecology Letters. 2008. Vol. 11. P. 1252–1264.
19. Фаузова В.И. Ферментативная активность черноземов Центрального Предкавказья // Вестн. АПК Ставрополя. 2014. № 3 (15). С. 154–157.
20. Горобцова О.Н., Улигова Т.С., Гедгафова Ф.В., Темботов Р.Х., Хакунова Е.М. Биологическая активность почв в поясе широколиственных лесов Центрального Кавказа // Лесоведение. 2021. № 1. С. 78–92.
21. Trasar-Cepeda C., Leiro M.C., Gil-Sotres F. Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality // Soil Biology & Biochemistry. 2008. Vol. 40. P. 2146–2155.
22. Казеев К.Ш., Трушков А.В., Одабашиян М.Ю., Колесников С.И. Постагрогенное изменение ферментативной активности и содержания органического углерода чернозема в первые 3 года залежного режима // Почвоведение. 2020. № 7. С. 901–910.
23. Kolesnikov S., Timoshenko A., Minnikova T., Tsepina N., Kazeev K., Akimenko Y., Zhadobin A., Shuvaeva V., Rajput V.D., Mandzhieva S., Sushkova S., Minkina T., Dudnikova T., Mazarji M., Alamri S., Siddiqui M.H., Singh R.K. Impact of Metal-Based Nanoparticles on Cambisol Microbial Functionality, Enzyme Activity, and Plant Growth // Plants. 2021. Vol. 10. P. 2080.
24. Kolesnikov S., Minnikova T., Kazeev K., Akimenko Y., Evstegneeva N. Assessment of the Ecotoxicity of Pollution by Potentially Toxic Elements by Biological Indicators of Haplic Chernozem of Southern Russia (Rostov region) // Water, Air, & Soil Pollution. 2022. Vol. 233. P. 18.
25. Hugh H.A.L. Soil extracellular enzyme dynamics in a changing climate // Soil Biology and Biochemistry. 2012. Vol. 47. P. 53–59.
26. Kivlin S.N., Treseder K.K. Soil extracellular enzyme activities correspond with abiotic factors more than fungal community composition // Biogeochemistry. 2014. Vol. 117. P. 23–37.
27. Казеев К.Ш., Козунь Ю.С., Колесников С.И. Использование интегрального показателя для оценки пространственной дифференциации биологических свойств почв Юга России в градиенте аридности климата // Сиб. экол. журн. 2015. Т. 22, № 1. С. 112–120.
28. Kozun Y.S., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Climatic gradients of biological properties of zonal soils of natural lands // Geoderma. 2022. Vol. 425. P. 116031.
29. Kazeev K., Vilkova V., Shkhatpatsev A., Bykhalova O., Rudenok Y., Nizhelskiy M., Kolesnikov S., Minkina T., Sushkova S., Mandzhieva S., Rajput V.D. Consequences of the catastrophic wildfire in 2020 for the soil cover of the Utrish State Nature Reserve // Sains Tanah J. of Soil Science and Agroclimatology. 2022. Vol. 19(1). P. 52–59.
30. Raiesi F., Pejman M. Assessment of post-wildfire soil quality and its recovery in semi-arid upland rangelands in Central Iran through selecting the minimum data set and quantitative soil quality index // Catena. 2021. Vol. 201. P. 105202.
31. Вилкова В.В., Казеев К.Ш., Шхатацев А.К., Колесников С.И. Реакция ферментативной активности почв ксерофитных лесов Черноморского побережья Кавказа на пирогенное воздействие // Аридные экосистемы. 2022. Т. 28, № 1 (90). С. 107–114.
32. Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Почвы Юга России. Ростов н/Д.: Эверест, 2008. 276 с.
33. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2016. 356 с.
34. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биология почв Юга России. Ростов н/Д.: ЦВВР, 2004. 350 с.

References

1. Bibin A.R., Trepet S.A., Akatova T.V., Grabenko E.A. Caucasian state nature biosphere reserve. *The Republic of Adygea Environment. The Handbook of Environmental Chemistry*. Switzerland, 2020:603-631.
2. Akatov V.V., Golgofskaya K.Yu., Gorcharuk L.G., Durov V.V., Kipiani V.V., Kudaktin A.N., Nemtsov A.S., Pridnya M.V., Til'ba P.A., Topilina V.G. Caucasian Reserve. *Reserves of the USSR: Reserves of the Caucasus*. Moscow: Mysl' Publ.; 1990:69-100. (In Russ.).
3. Popadyuk R.V., Chistyakova A.A., Chumachenko S.I., Evstigneev O.I., Zaugol'nova L.B., Istomina I.I., Kiseleva L.L., Kostyaev S.A., Smirnova O.V., Toropova N.A., Frantsuzov A.V., Khanina L.G., Chernov N.I.,

Yanitskaya T.O. *Eastern European broad-leaved forests*. Ed. by O.V. Smirnova. Moscow: Nauka Publ.; 1994. 364 p. (In Russ.).

4. Lukina N.V., Tikhonova E.V., Shevchenko N.E., Gornov A.V., Kuznetsova A.I., Geras'kina A.P., Smirnov V.E., Gornova M.V., Ruchinskaya E.V., Anishchenko L.N., Teben'kova D.N., Danilova M.A., Bakhmet O.N., Kryshen' A.M., Knyazeva S.V., Shashkov M.P. [et al.]. *Carbon accumulation in forest soils and successional status of forests*. Moscow: Association of Scientific Publications KMK Press; 2018. 232 p. (In Russ.).

5. Shevchenko N.E., Kuznetsova A.I., Teben'kova D.N., Smirnov V.E., Geras'kina A.P., Gornov A.V., Grabenko E.A., Tikhonova E.V., Lukina N.V. Succession dynamics of vegetation and soil carbon stocks in coniferous-broad-leaved forests of the Northwestern Caucasus. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*. 2019;(3):163-176. (In Russ.).

6. Dymov A.A. The impact of clearcutting in boreal forests of Russia on soils: a review. *Eurasian Soil Science*. 2017;50(7):780-790.

7. Kazeev K.Sh., Poltoratskaya T.A., Yakimova A.S., Odobashyan M.Yu., Shkhatpatsev A.K., Kolesnikov S.I. Post-fire changes in the biological properties of the brown soils in the Utrish state nature reserve (Russia). *Nature Conservation Research*. 2019;(4(S1)):93-104.

8. Mayer M., Prescott C.E., Abaker W.E.A., Augusto L., Cécillon L., Ferreira G.W.D., James J., Jandl R., Katzensteiner K., Laclau J.P., Laganière J., Nouvellon Y., Paré D., Stanturf J.A., Vanguelova E.I., Vesterdal L. Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. *Forest Ecology and Management*. 2020;466:118-127.

9. Ivonin V.M., Terteryan A.V. Soil Erosion During Rainstorms in the Second Growth of the Northwest Caucasus. *Izv. vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurn. = Bulletin of Higher Educational Institutions. Russian Forestry Journal*. 2015;(1):54-61. (In Russ.).

10. Kazeev K.Sh., Ter-Misakyants T.A., Kuznetsova Yu.S., Polyakov A.I., Kutuzova I.V., Mazanko M.S., Prudnikova M.V., Kolesnikov S.I. Effect of deforestation on the biological properties of mountain soil of Western Caucasus. *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauch. zhurn. Kubanskogo gos. agrarnogo un-ta (Nauchnyi zhurnal KubGAU) = Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2012;(8):1059-1069. (In Russ.).

11. Kazeev K.Sh., Soldatov V.P., Shkhatpatsev A.K., Shevchenko N.E., Grabenko E.A., Ermolaeva O.Yu., Kolesnikov S.I. Changes in the Properties of Calcareous Soils after Clearcutting in the Coniferous-Deciduous Forests of the Northwestern Caucasus. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*. 2021;(4):426-436. (In Russ.).

12. Soldatov V.P., Shkhatpatsev A.K., Kazeev K.Sh., Azarenko M.A., Kolesnikov S.I. Enzyme activity and humus content in post-forest soils of Adygea. *AgroEcoInfo*. 2020;(3):1-20. (In Russ.).

13. Soldatov V.P., Shkhatpatsev A.K., Kazeev K.Sh., Kharitonova T.D., Kazeev D.K., Kolesnikov S.I. Dynamics of enzyme activity change in soils of Adygea with various degrees of disturbance after forest reduction. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2020;(4):105-111. (In Russ.).

14. Shkhatpatsev A.K., Soldatov V.P., Kazeev K.Sh., Grabenko E.A., Kolesnikov S.I. Biological Activity of Soils of Low-Mountain Reliefs in Adygeya after Forest Felling. *Indian Journal of Ecology*. 2021;48(5):1383-1388.

15. Creamer R.E., Hannula S.E., Van Leeuwen J.P., Stone D., Rutgers M., Schmelz R.M., De Ruiter P.C., Hendriksen N.B., Bolger T., Bouffaud M.L., Buee M., Carvalho F., Costa D., Dirilgen T., Francisco R., Griffiths B.S., Griffiths R., Martin F., Da Silva M.P., Mendes S., Morais P.V., Pereira C., Philippot L., Plassart P., Redecker D., Römbke J., Sousa J.P., Wouterse M., Lemanceau P. Ecological network analysis reveals the inter-connection between soil biodiversity and ecosystem function as affected by land use across Europe. *Applied Soil Ecology*. 2016;97:112-124.

16. Nikitin D.A., Semenov M.V., Chernov T.I., Ksenofontova N.A., Zhelezova A.D., Ivanova E.A., Khitrov N.B., Stepanov A.L. Microbiological Indicators of Soil Ecological Functions: A Review. *Eurasian Soil Science*. 2022;55(2):221-234.

17. Thiele-Bruhn S., Schloter M., Wilke B.-M., Beaudette L. A., Martin-Laurent F., Cheviron N., Mougin C., Römbke J. Identification of new microbial functional standards for soil quality assessment. *Soil*. 2020;6:17-34.

18. Sinsabaugh R.L., Lauber C.L., Weintraub M.N., Ahmed B., Allison S.D., Crenshaw C., Contosta A.R., Cusack D., Frey S., Gallo M.E., Gartner T.B., Hobbie S.E., Holland K., Keeler B.L., Powers J.S., Stursova M., Takacs-Vesbach C., Waldrop M.P., Wallenstein M.D., Zak D.R., Zeglin L.H. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. *Ecology Letters*. 2008;11:1252-1264.

19. Faizova V.I. Enzymatic activity of chernozems of the Central Ciscaucasia. *Vestn. APK Stavropol'ya = Bulletin of the APK of Stavropol*. 2014;(3):154-157. (In Russ.).

20. Gorobtsova O.N., Uligova T.S., Gedgafova F.V., Tembotov R.Kh., Khakunova E.M. Biological Activity of Soils of the Deciduous Forests Belt in Central Caucasus. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*. 2021;(1):78-92.

21. Trasar-Cepeda C., Leiro M.C., Gil-Sotres F. Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality. *Soil Biology & Biochemistry*. 2008;40:2146-2155.

22. Kazeev K.Sh., Trushkov A.V., Odabashian M.Yu., Kolesnikov S.I. Postagrogenic Changes in the Enzyme Activity and Organic Carbon Content in Chernozem during the First Three Years of Fallow Regime. *Eurasian Soil Science*. 2020;53(7):995-1003.
23. Kolesnikov S., Timoshenko A., Minnikova T., Tsepina N., Kazeev K., Akimenko Y., Zhadobin A., Shuvaeva V., Rajput V.D., Mandzhieva S., Sushkova S., Minkina T., Dudnikova T., Mazarji M., Alamri S., Siddiqui M.H., Singh R.K. Impact of Metal-Based Nanoparticles on Cambisol Microbial Functionality, Enzyme Activity, and Plant Growth. *Plants*. 2021;10:2080.
24. Kolesnikov S., Minnikova T., Kazeev K., Akimenko Y., Evstegneeva N. Assessment of the Ecotoxicity of Pollution by Potentially Toxic Elements by Biological Indicators of Haplic Chernozem of Southern Russia (Rostov region). *Water, Air, & Soil Pollution*. 2022;233:18.
25. Hugh H.A.L. Soil extracellular enzyme dynamics in a changing climate. *Soil Biology and Biochemistry*. 2012;47:53-59.
26. Kivlin S.N., Treseder K.K. Soil extracellular enzyme activities correspond with abiotic factors more than fungal community composition. *Biogeochemistry*. 2014;117:23-37.
27. Kazeev K.S., Kozun' Y.S., Kolesnikov S.I. Applying an integral index to evaluate the spatial differentiation of biological properties of soils along an aridity gradient in the south of Russia. *Contemporary Problems of Ecology*. 2015;8(1):91-98.
28. Kozun Y.S., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Climatic gradients of biological properties of zonal soils of natural lands. *Geoderma*. 2022;425:116031.
29. Kazeev K., Vil'kova V., Shkhatpatsev A., Bykhalova O., Rudenok Y., Nizhelskiy M., Kolesnikov S., Minkina T., Sushkova S., Mandzhieva S., Rajput V.D. Consequences of the catastrophic wildfire in 2020 for the soil cover of the Utrish State Nature Reserve. *Sains Tanah Journal of Soil Science and Agroclimatology*. 2022;19(1):52-59.
30. Raiesi F., Pejman M. Assessment of post-wildfire soil quality and its recovery in semi-arid upland rangelands in Central Iran through selecting the minimum data set and quantitative soil quality index. *Catena*. 2021;201:105202.
31. Vil'kova V.V., Kazeev K.S., Kolesnikov S.I., Shkhatpatsev A.K. Reaction of the Enzymatic Activity of Soils of Xerophytic Forests on the Black Sea Coast in the Caucasus to the Pyrogenic Impact. *Arid Ecosystems*. 2022;12(1):93-98.
32. Val'kov V.F., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. *Soils of the South of Russia*. Rostov-on-Don: Everest Publ.; 2008. 276 p. (In Russ.).
33. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Akimenko Yu.V., Dadenko E.V. *Methods of biodiagnostics of terrestrial ecosystems*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2016. 356 p. (In Russ.).
34. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Valkov V.F. *Soil biology of the South of Russia*. Rostov-on-Don: TsVVR Publ.; 2004. 350 p. (In Russ.).

Информация об авторах

*А.К. Шхатапцев – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, декан факультета аграрных технологий.
Е.А. Грабенко – кандидат географических наук, научный сотрудник.
К.Ш. Казеев – доктор биологических наук, профессор, кафедра экологии и природопользования, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.*

Information about the authors

*A.K. Shkhatpatsev - Candidate of Science (Agricultural Sciences), Associate Professor, Dean of the Faculty of Agricultural Technologies.
E.A. Grabenko - Candidate of Science (Geography), Researcher.
K.Sh. Kazeev - Doctor of Science (Biology), Professor, Department of Ecology and Nature Management, Academy of Biology and Biotechnology.*

*Статья поступила в редакцию 05.08.2022; одобрена после рецензирования 30.08.2022; принята к публикации 15.11.2022.
The article was submitted 05.08.2022; approved after reviewing 30.08.2022; accepted for publication 15.11.2022.*

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

OUR PERSONS

Персоналии

doi: 10.18522/1026-2237-2022-4-2-148-150

ВЫДАЮЩИЙСЯ ГЕОГРАФ, ИССЛЕДОВАТЕЛЬ, ПЕДАГОГ (к 85-летию Виктора Трофимовича Богучарскова)

Personalities

OUTSTANDING GEOGRAPHER, RESEARCHER, TEACHER (to the 85th Anniversary of Viktor Trofimovich Bogucharskov)



24 октября 2022 г. исполнилось 85 лет Виктору Трофимовичу Богучарскову, доктору географических наук, профессору кафедры физической географии, экологии и охраны природы Института наук о Земле Южного федерального университета (РГУ).

Виктор Трофимович – выпускник геолого-географического факультета РГУ. Вся его многолетняя профессиональная деятельность связана с решением важнейших теоретических и научно-прикладных задач в сфере физической географии в разных уголках нашей родины – на севере европейской части страны, Дальнем Востоке, Кавказе и Закавказье, в Средней Азии.

Виктор Трофимович занимался изучением и научным обоснованием условий формирования рыбопродуктивности Азовского бассейна в рамках работы в Азовском НИИ рыбного хозяйства (АзНИИРХ), участвовал в комплексных исследованиях дельты реки Кубань, где им были установлены особенности гидрологического и гидрохимического режимов и определены тенденции в эволюции и антропогенном ее преобразовании. По результатам этих исследований он в 1967 г. защитил кандидатскую диссертацию

«Гидрология кубанских лиманов в связи с их мелиорацией» и опубликовал монографию «Дельта Кубани».

В 1970 г. Виктор Трофимович пришел на кафедру физической географии РГУ, на которой проработал более 50 лет, пройдя путь от преподавателя до профессора. В 1972–1975 гг. В.Т. Богучарсков был заместителем декана геолого-географического факультета. С 1985 по 2003 г. исполнял обязанности заместителя заведующего кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, председателя секции географии и геоэкологии методической комиссии факультета, состоял членом научно-методического совета университета, экспертного совета Комитета по охране природы Ростовской области.

Педагогическая деятельность Виктора Трофимовича была связана не только с преподаванием профильных физико-географических дисциплин на родине. В 1981–1984 гг. он преподавал в Национальной инженерной школе в Республике Мали, а свои впечатления об этой трехлетней зарубежной командировке он изложил в книге «Моя Африка».

Исследования Виктора Трофимовича легли в основу учебных курсов историко-географической и методологической направленности в обучении географов и геоэкологов Института наук о Земле ЮФУ (ранее – геолого-географического факультета РГУ). Лекции по истории и методологии географии послужили базой для фундаментального учебника «История географии», выдержавшего несколько изданий. В 2004 г. В.Т. Богучарскову Министерством образования РФ присвоено ученое звание профессора. В 2006 г. в виде научного доклада «История географии и ее преподавания в вузах России» была защищена диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук по специальности 07.00.10 «История науки и техники».

Научные интересы проф. В.Т. Богучарскова связаны с историей и теорией географической науки, проблемами географического образования, исследованиями региональных эколого-географических проблем. В его активе – свыше 120 опубликованных научных и научно-методических работ, 12 из которых монографического содержания. Наиболее важные из них: История географии (учебное пособие с грифом Минобробразования РФ). М.; Ростов н/Д.: Март, 2004. 448 с.; Очерки по истории экологического учения (географический аспект). Ростов н/Д.: Изд-во РГУ, 2005. 189 с.; История географии (учебное пособие с грифом Минобробразования РФ). М.: Академический проект, 2006. 560 с.; История географии и современность. М.: Академический проект, 2006. 560 с.



В горах Тянь-Шаня



В Африке

«История географии» В.Т. Богучарскова решением ВАК утверждена одним из основных пособий для подготовки к экзамену кандидатского минимума «История и философия науки» по географическим специальностям.

В.Т. Богучарсков многие годы был членом двух диссертационных советов по присуждению ученых степеней кандидата и доктора географических наук (на базе Южного федерального университета и Северо-Кавказского федерального университета (г. Ставрополь)), на протяжении 35 лет – научным консультантом, экспертом и председателем жюри секции географии и геоэкологии в Донской академии наук юных исследователей (ДАНЮИ), многолетним председателем жюри областных и городских географических олимпиад школьников, был в жюри телевизионного конкурса «Эрудит Дона», регулярно выступал с докладами перед учителями по современным проблемам географической науки и образования.

Под руководством В.Т. Богучарскова подготовлены три кандидата географических наук и большое число специалистов: географов и геоэкологов.

Научная, педагогическая и просветительская деятельность Виктора Трофимовича высоко оценена на уровне профильных министерств РФ и правительства. Он награжден почетной грамотой Министерства образования РФ, почетными грамотами и благодарственным письмом министра образования Ростовской области, почетной грамотой объединенного профкома при Посольстве СССР в Республике Мали, дипломом Русского географического общества за выдающиеся научные работы в области географии. От имени президента Русского географического общества – памятными медалями П.П. Семёнова-Тян-Шанского и Н.М. Пржевальского за пропаганду географических знаний. За успехи в учебно-научной деятельности награждён грамотами Министерств образования России и Ростовской области, отдела образования администрации г. Ростова-на-Дону, а также юбилейной медалью «За заслуги перед Южным федеральным университетом» в связи со 100-летием университета в г. Ростове-на-Дону.

В.Т. Богучарсков пользуется заслуженным авторитетом у студентов и преподавателей. Он щедро делится своим опытом с коллегами и вносит большой вклад в достижение ключевых стратегических целей развития университета.

Сотрудники, студенты и аспиранты кафедры физической географии, экологии и охраны природы Института наук о Земле ЮФУ сердечно поздравляют Виктора Трофимовича с юбилеем и желают ему доброго здоровья, творческого долголетия, семейного благополучия!

И.В. Доценко, О.В. Назаренко, Ю.А. Федоров, А.Г. Положенцев

Персоналии

doi: 10.18522/1026-2237-2022-4-2-151-153

ЗАЩИТНИК ПРИРОДЫ СТЕПЕЙ (к 85-летию Виктора Аркадьевича Миноранского)

Personalities

STEPPE NATURE PROTECTOR (to the 85th Anniversary of Viktor Arkadyevich Minoransky)



В деятельности заслуженного работника высшей школы РФ, доктора с/х наук, профессора кафедры зоологии Ростовского (ныне Южного федерального) университета Виктора Аркадьевича Миноранского проблемы сохранения природных ресурсов, включая биоразнообразие степей, являются основными в течении всей его активной жизни. Многие десятилетия он занимается изучением животного мира Дона и Северного Кавказа, вопросами сохранения, восстановления и рационального использования живой природы.

Виктор Аркадьевич родился 01.02.1938 г. в Ростове-на-Дону и с Доном связал всю свою жизнь. В 1961 г. он закончил обучение на кафедре зоологии РГУ, где впоследствии состоялась вся его служебная карьера – от аспиранта до профессора и заведующего кафедрой. Аспирантуру прошел под руководством члена-корреспондента ВАСХНИЛ Н.Н. Архангельского. Кандидатскую (1965 г.) и докторскую (1974 г.) диссертации защитил по энтомокомплексам и вредителям свеклы на Дону и Северном Кавказе. Читал лекции, вел лабораторные и практические занятия со студентами и аспирантами почти по всем кафедральным и многим межкафедральным курсам, с 1964 по 2016 г. руководил учебной и производственной практикой студентов, разработал многие новые курсы («Биоресурсы и их рациональное использование», «Охрана и рациональное использование биоразнообразия», «Интегрированная защита растений» и т.д.). Более 10 тыс. учащихся прослушали его лекции, 130 – подготовили под его руководством выпускные и дипломные работы, 16 – магистерские и 18 – кандидатские, 3 – докторские диссертации из различных регионов СССР, Египта, Польши, Нигарагуа и других стран.

Преподавательскую деятельность Виктора Аркадьевича отличала неформальность в общении со студентами и аспирантами, что было характерно для Ростовского университета, наиболее демократичного среди вузов региона. Он тесно общался с молодежью на занятиях, во время полевых практик, проходивших более 40 дней в наиболее интересных в природном отношении местах Ростовской области и Кавказа. Совместные с молодежью регулярные экскурсии для ознакомления с замечательной донской природой проходили не только в окрестностях Ростова, но и на побережье Азовского моря, Маныче, по берегам Северского Донца, в местах жизни и творческой деятельности М.А. Шолохова, многих других. Общение с учениками проходило и в домашних условиях, а его квартира с большой библиотекой являлась для них постоянным местом встреч. Он любил говорить, что, общаясь со студентами и аспирантами, учится у них, пополняет свои знания. Виктор Аркадьевич постоянно следил за развитием биологических направлений, хорошо знал наиболее успешные из них в различных странах, делился этими знаниями с молодежью.

Преподавательскую деятельность Виктора Аркадьевича отличала неформальность в общении со студентами и аспирантами, что было характерно для Ростовского университета, наиболее демократичного среди вузов региона. Он тесно общался с молодежью на занятиях, во время полевых практик, проходивших более 40 дней в наиболее интересных в природном отношении местах Ростовской области и Кавказа. Совместные с молодежью регулярные экскурсии для ознакомления с замечательной донской природой проходили не только в окрестностях Ростова, но и на побережье Азовского моря, Маныче, по берегам Северского Донца, в местах жизни и творческой деятельности М.А. Шолохова, многих других. Общение с учениками проходило и в домашних условиях, а его квартира с большой библиотекой являлась для них постоянным местом встреч. Он любил говорить, что, общаясь со студентами и аспирантами, учится у них, пополняет свои знания. Виктор Аркадьевич постоянно следил за развитием биологических направлений, хорошо знал наиболее успешные из них в различных странах, делился этими знаниями с молодежью.



В.А. Миноранский – активный участник становления экологического образования на юге страны. В 1975 г. он организовал при РГУ и по 1985 г. был деканом факультетов повышения квалификации преподавателей и сотрудников вузов, НИИ, руководителей различных структур Северного Кавказа по специальностям «биология» и «охрана природы». В 70–80-е гг. Виктор Аркадьевич возглавлял комиссии РГУ и Северо-Кавказского научного центра высшей школы по экологическому образованию и воспитанию студентов.

По заданию председателя СКНЦ ВШ Ю.А. Жданова он посетил все вузы Северного Кавказа и Дона с целью обсуждения вопросов развития экологического направления, что способствовало созданию в них экологической специализации, экологических кафедр, лабораторий, факультетов. Ежегодно с 1977 по 2000 г. он встречался с ректорами и проректорами вузов, выступал на ученых советах, читал лекции, консультировал студентов, соискателей кандидатских и докторских диссертаций, был председателем ГЭК и ГАК во всех университетах Северного Кавказа, а также в Киеве, Казани, Саранске, Ижевске, Катовицах (Польша) и других вузовских и научных центрах. В.А. Миноранский по указанию Минобразования СССР организовал в 1977 г. при РГУ специальный факультет – экологии и повышения эффективности использования природных ресурсов – по переподготовке специалистов народного хозяйства с высшим образованием и по 1985 г. являлся его деканом.

В РГУ Виктор Аркадьевич сформировал школу по изучению биоразнообразия и биоресурсов донских степей, рациональному их использованию. Под его руководством были выявлены и описаны многие группы животных (мизиды, бокоплавы, сухопутные ракообразные, наземные моллюски, пауки и др.), составлена первая полная сводка животного мира Ростовской области, разработаны мероприятия по использованию, охране и разумному регулированию биоресурсов. Возглавляемые В.А. Миноранским постоянные экспедиции преподавателей, аспирантов и студентов позволили хорошо изучить природу Ростовской области, выявить влияние на нее деятельности людей и сформулировать меры по сохранению, восстановлению и разумному управлению биоразнообразия. Им разработаны Стратегии развития особо охраняемых природных территорий и экологических сетей Донской земли. На их основе профессор с коллегами создал первый на Дону степной заповедник «Ростовский», 3 заказника, 11 памятников природы, музей «Дельта Дона» и «ООПТ степей». Он – инициатор появления первых сводок по редким и исчезающим видам растений и животных Ростовской области, автор, составитель и ответственный редактор первой Красной книги Ростовской области. Виктор Аркадьевич



природу Ростовской области, выявить влияние на нее деятельности людей и сформулировать меры по сохранению, восстановлению и разумному управлению биоразнообразия. Им разработаны Стратегии развития особо охраняемых природных территорий и экологических сетей Донской земли. На их основе профессор с коллегами создал первый на Дону степной заповедник «Ростовский», 3 заказника, 11 памятников природы, музей «Дельта Дона» и «ООПТ степей». Он – инициатор появления первых сводок по редким и исчезающим видам растений и животных Ростовской области, автор, составитель и ответственный редактор первой Красной книги Ростовской области. Виктор Аркадьевич

был руководителем коллектива по разработке биологических разделов Программы неотложных мер по оздоровлению окружающей среды Ростовской области на 1994–1996 гг., Программы действий по охране окружающей природной среды для Ростовской области до 2000 года и принимал участие в подготовке подобных программ в дальнейшем.

В.А. Миноранский – один из инициаторов создания в 2004 г. и председатель ассоциации «Живая природа степи». Им разработана программа и стратегия деятельности этой ассоциации, совместно с Ростоблкомприродой – План мероприятий по устойчивому развитию природного комплекса «Маньч», включая водно-болотные угодья международного значения «Веселовское водохранилище» и «Озеро Маньч-Гудило», Государственный природный заповедник «Ростовский» и его охранную зону. В последние десятилетия эта ассоциация занимает на Дону ведущее место по природоохранной деятельности.

Виктор Аркадьевич активно продолжает научную и практическую деятельность по сохранению и восстановлению донского биоразнообразия, разумному использованию природных ресурсов, экологическому образованию и воспитанию населения. Он участвует в учебном процессе (много лет председатель ГАК в КГМУ), постоянно общается и консультирует студентов и соискателей научных степеней ЮФУ и других структур, регулярно выступает в СМИ, на различных научных, практических экологических конференциях и форумах, участвует в экспедициях по Ростовской области, готовит научные и популярные статьи. Им опубликовано около 1100 печатных работ, включающих учебники, учебные пособия, монографии, научные статьи и другие разработки. Профессор является членом различных советов: ЮФУ по защите диссертации по специальности «экология», заповедника «Ростовский», Минприроды и др., входит в различные федеральные и региональные комиссии по охране природы и природопользованию. Он – член редакционных коллегий журналов «Известия вузов. Северо-Кавказский регион», «Юг России – экология, развитие», «Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН», др.

Деятельность В.А. Миноранского регулярно отмечалась федеральными и региональными структурами. Он удостоен почетных званий «Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации» и «Лучший эколог Дона», награжден большой памятной медалью Всероссийского общества охраны природы, медалью ВДНХ СССР, медалью «75 лет Победы в Великой Отечественной войне» и другими дипломами, грамотами, благодарственными письмами.

Поздравляя Виктора Аркадьевича Миноранского с 85-летним юбилеем, искренне желаем ему здоровья, благополучия и творчества в научной, педагогической и общественной деятельности на благо донской природы, российской науки, образования и населения.

С.И. Колесников, А.В. Тихонов

Редакция и редколлегия журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» серии «Естественные науки» присоединяются ко всем поздравлениям нашим юбилярам, желают им крепкого здоровья, благодарных учеников и покорения новых творческих вершин!

Правила оформления статьи

1. Материалы, предназначенные для публикации, могут быть представлены в редакцию одним из следующих способов:

- присланы по электронной почте: izvestiya@sfedu.ru;
- принесены в редакцию лично, по адресу: г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 2, к. 110.

2. К статье прилагаются на русском и английском языках:

- название статьи и фамилии авторов;
- сведения о каждом из авторов (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, учёная степень, звание, домашний, служебный и электронный адреса, телефоны). Если авторов несколько, указать, с кем вести переписку;
- аннотация (1500–2000 знаков/150–200 слов);
- ключевые слова (8–10);
- индекс УДК.

Единицы измерения следует давать в соответствии с Международной системой единиц (СИ).

3. Объем статьи – не менее 10 страниц машинописного текста, включая таблицы, список литературы (желательно не менее 10 источников) и рисунки (не более 5).

4. 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.

5. Статья должна содержать лишь необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться. Большие формулы надо разбить на несколько строк. Векторные величины и матрицы выделяются прямым полужирным шрифтом. Нумеруются только те формулы, на которые имеются ссылки. Нумерация формул – сквозная по всей статье.

Таблицы должны иметь заголовки на русском и английском языках; в них допускаются только общепринятые сокращения. Желательно, чтобы таблица не превышала одной страницы текста. Количество таблиц не может превышать количество страниц.

Рисунки, графики и схемы располагаются в папке «Рисунки». Каждый рисунок должен иметь подрисуючную подпись на русском и английском языках. Цветные рисунки могут быть размещены за дополнительную плату.

6. **Литература** приводится в порядке упоминания в конце статьи, ссылки в тексте в квадратных скобках. Допускаются ссылки только на опубликованные материалы. Иностранные источники даются на языке оригинала. При ссылке на электронный ресурс указывается дата обращения.

Библиография оформляется согласно ГОСТу 7.0.5-2008.

Список литературы должен быть продублирован на английском языке.

Финансовые условия и оплата

Статья, оформленная по нашим правилам, после поступления в редакцию в обязательном порядке рассматривается рецензентами и утверждается на редколлегии. Рецензирование обычно длится 2-4 недели. Если положительная рецензия получена, статья включается в очередной номер. Если есть замечания - отправляется автору на доработку. В случае положительного решения необходимо будет заполнить авторский договор и оплатить публикацию.

Стоимость 1 страницы (1800 знаков, включая пробелы) – 770 рублей. Оплата может быть произведена организацией (в этом случае надо указать её реквизиты для оформления платёжных документов) или авторами (мы вышлем квитанцию для оплаты через банк). Для аспирантов очной формы предусмотрена 50%-я скидка, если аспирант – единственный автор.

Бесплатный авторский экземпляр журнала высылается на указанный автором адрес.

Над номером работали: Т.А. Ватульян, Л.С. Ворович, Е.М. Колосова, В.И. Литвиненко, О.В. Назаренко, М.С. Шипитко

Подписано в печать 26.12.2022. Выход в свет 28.12.2022. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 18,13. Уч.-изд. л. 20,19. Тираж 250 экз. Заказ № 8826.

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, адрес в Интернете: 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, V.I. Litvinenko, O.V. Nazarenko, M.S. Shipitko

Signed print December 26, 2022. The publication December 28, 2022. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 18.13. Publ. sign. 20.19. Edition 250 copies. Order number 8826.

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, Web Address: 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. 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). В неподписной период отдельные номера журнала за нынешний и прошлые годы можно приобрести в редакции.

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.

E-mail: izvestiya@sfedu.ru

Адрес в Интернете: www.izvestiya.sfedu.ru

ISSN 1026-2237. Doi 10.18522/1026-2237-2022-4-2. Известия высших учебных заведений.

Северо-Кавказский регион. Естественные науки.

2022. № 4-2