

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2022

3

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 10.18522/1026-2237-2022-3

*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
№ 3 (215) 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. 3 (215) 2022*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

NATURAL SCIENCE

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

- Авсянкин О.Г., Ашихмин С.С.* Об ограниченности и компактности одного класса операторов типа свертки в пространствах Морри 4
- Бибик Ю.В.* Особенности применения методов статистической механики при исследовании обобщений классической цепочки Вольтерра..... 11
- Рустанов А.Р., Полькина Е.А.* Некоторые вопросы геометрии локально конформно-келеровых многообразий. 23
- Сумбатян М.А., Пискунов А.С.* Быстрый алгоритм мультиполя в бессеточном методе дискретных вихрей для течений идеальной жидкости..... 29
- Avsyankin O.G., Ashikhmin S.S.* On the Boundedness and Compactness of a Class of Convolution-Type Operators in Morrey Spaces 4
- Bibik Yu. V.* Features of Application of the Methods Statistical Mechanics in Research of Generalizations of the Classical Volterra Chain..... 11
- Rustanov A.R., Polkina E.A.* Some Questions of Geometry of Locally Conformal Kahler Manifolds..... 23
- Sumbatyan M.A., Piskunov A.S.* Fast Multipole Algorithm in the Meshless Discrete Vortex Method for Flows of Non-Viscous Fluid 29

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

SCIENCES OF EARTH

- Бураева Е.А., Маломыжева Н.В., Швецова Д.А., Безуглова О.С.* Радионуклиды в верхнем слое почв особо охраняемых природных территорий Ростовской области..... 38
- Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А.* Метан и сероводород в донных отложениях водохранилищ и прудов бассейна Азовского моря 45
- Овчаренко Л.А., Короткова Е.А.* Роль климатических факторов в формировании стока реки Белой в современный период 62
- Плотников И.В.* Особенности накопления тяжелых металлов в зеленой массе кустарников вида *Betula nana* (береза карликовая) в условиях повышенной антропогенной нагрузки..... 70
- Buraeva E.A., Malomyzheva N.V., Shvetsova D.A., Bezuglova O.S.* Radionuclides in the Upper Soil Layer of Specially Protected Natural Territories of the Rostov Region..... 38
- Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A.* Methane and Hydrogen Sulfide in Bottom Sediments of Reservoirs and Ponds of the Azov Sea Basin..... 45
- Ovcharenko L.A., Korotkova E.A.* The Role of Climatic Factors in the Formation of the Flow of the Belaya River in the Modern Period..... 62
- Plotnikov I.V.* Features of Accumulation of Heavy Metals in the Green Mass of *Betula nana* Shrubs under Conditions of Increased Anthropogenic Impact..... 70

Радионов А.А. Математическая модель равновесия столба сжимаемой атмосферы. Часть 1: Стационарные решения для температуры.....	79	Radionoff A.A. Mathematical Model of Equilibrium of the Column of Compressible Atmosphere. Part 1: Stationary Solution for Temperature	79
Решетняк В.Н., Закруткин В.Е. Взаимосвязь химического состава и уровня загрязненности речных вод и донных отложений рек бассейна Северского Донца (в пределах Ростовской области).....	91	Reshetnyak V.N., Zakrutkin V.E. Interrelation Between the Chemical Composition and Pollution Level of River Waters and Sediments in the Seversky Donets River Basin (within the Rostov Region).....	91
Соловьёва О.В., Дорошенко Ю.В., Тихонова Е.А., Бурдиян Н.В., Витер Т.В. Физико-химические условия в водорослевых матах и их влияние на некоторые группы гидробионтов в гиперсолёных водоёмах (на примере залива Сиваш, Крым)	103	Soloveva O.V., Doroshenko Yu.V., Tikhonova E.A., Burdiyan N.V., Viter T.V. Physical and Chemical Conditions in Algae Mats and Their Influence on Some Groups of Hydrobionts in Hypersalt Water Bodies (a Case of Sivash Bay, Crimea).....	103
Хлопкова М.В., Тулышева Е.В. Комплексный подход в палеореконструкциях хазарских трансгрессий Каспия	114	Khlopkova M.V., Tulyshева E.V. An Integrated Approach to the Paleoreconstructions of the Khazar Transgressions of the Caspian Sea	114

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Евстегнеева Н.А., Колесников С.И., Минникова Т.В., Тимошенко А.Н., Цепина Н.И., Казеев К.Ш. Сравнительная оценка токсичности химических элементов по численности бактерий в серопесках.....	120	Evstegneeva N.A., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Timoshenko A.N., Tsepina N.I., Kazeev K.Sh. Comparative Assessment of the Toxicity of Chemical Elements by the Number of Bacteria in Sierosands	120
Исламмагомедова Э.А., Халилова Э.А., Абакарова А.А. Некоторые биохимические и морфологические свойства дрожжей <i>Saccharomyces cerevisiae</i> в условиях стресса (обзор).....	129	Islammagomedova E.A., Khalilova E.A., Abakarova A.A. Some Biochemical and Morphological Properties of Yeast <i>Saccharomyces Cerevisiae</i> under Stress Conditions (Review).....	129
Пуртова Л.Н., Киселева И.В., Тимофеева Я.О., Емельянов А.Н., Тимошинов Р.В. Изменение содержания гумуса и биологической активности агротемногумусовых подбелов при различных агротехнических приемах обработки почв	139	Purtova L.N., Kiseleva I.V., Timofeeva Ya.O., Emelyanov A.N., Timoshinov R.V. Changes in the Humus Content and Biological Activity of Agro-Dark-Humus Podbel under Various Agrotechnical Methods of Tillage.....	139

BIOLOGICAL SCIENCES

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 517.9

doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-4-10

ОБ ОГРАНИЧЕННОСТИ И КОМПАКТНОСТИ ОДНОГО КЛАССА ОПЕРАТОРОВ ТИПА СВЕРТКИ В ПРОСТРАНСТВАХ МОРРИ

Олег Геннадиевич Авсянкин^{1✉}, Сергей Сергеевич Ашихмин²

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

¹ ogavsyankin@sfedu.ru ✉

² sashihmin@sfedu.ru

Аннотация. В пространстве Морри рассматривается интегральный оператор H_b , ядро которого имеет вид $b(x, y)h(x - y)$, где h – суммируемая функция. Функцию $b(x, y)$ будем называть характеристикой. Для такого оператора получено достаточное условие ограниченности, которое заведомо выполняется в случае существенно ограниченной функции $b(x, y)$. Показано, что если характеристика $b(x, y)$ существенно ограничена и имеет заданное поведение на бесконечности, то оператор H_b компактен в пространстве Морри. В качестве следствия получен критерий нетеровости оператора, являющегося суммой тождественного оператора и оператора H_b . А именно показано, что такой оператор является нетеровым тогда и только тогда, когда его символ не обращается в нуль, при этом индекс оператора равен нулю.

Ключевые слова: пространство Морри, оператор свертки, ограниченность, компактность, нетеровость, символ

Благодарности: участие первого автора поддержано Региональным научно-образовательным математическим центром ЮФУ, соглашение Минобрнауки России № 075-02-2022-893.

Для цитирования: Авсянкин О.Г., Ашихмин С.С. Об ограниченности и компактности одного класса операторов типа свертки в пространствах Морри // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 3. С. 4–10.

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

Original article

ON THE BOUNDEDNESS AND COMPACTNESS OF A CLASS OF CONVOLUTION-TYPE OPERATORS IN MORREY SPACES

Oleg G. Avsyankin^{1✉}, Sergey S. Ashikhmin²

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

¹ ogavsyankin@sfedu.ru ✉

² sashihmin@sfedu.ru

© Авсянкин О.Г., Ашихмин С.С., 2022

In a Morrey space, we study the integral operator H_b with the kernel $b(x, y)h(x - y)$, where h is the summable function. The function b will be referred to as a characteristic. For such operator, a sufficient condition of boundedness is obtained. This condition is obviously fulfilled in the case of the essentially bounded function $b(x, y)$. It is shown that if the characteristic $b(x, y)$ is essentially bounded and has a given behavior at infinity, then the operator H_b is compact in a Morrey space. As a consequence, we have obtained the criterion for the Fredholm property of the operator, which is the sum of the identity operator and the operator H_b . Namely, it is shown that such operator is Fredholm if and only if its symbol does not vanish, and the index of the operator is equal to zero.

Keywords: Morrey space, convolution operator, boundedness, compactness, Fredholmness, symbol

Acknowledgments: the research of O.G. Avsyankin was supported by the Regional Mathematical Center of the Southern Federal University with the Agreement No. 075-02-2022-893 of the Ministry of Science and Higher Education of Russia.

For citation: Avsyankin O.G., Ashikhmin S.S. On the Boundedness and Compactness of a Class of Convolution-Type Operators in Morrey Spaces. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(3):4-10. (In Russ.).

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

Введение

В настоящее время имеется немало работ, посвященных пространствам Морри и их обобщениям (статьи В.И. Буренкова [1, 2] и цитированные в них источники). Исследования этих пространств начаты знаменитой работой Ч. Морри [3] и с тех пор интенсивно продолжаются по нескольким направлениям. Одним из них являются классические операторы анализа в пространствах Морри [4–6]. В последнее десятилетие значительное внимание было уделено операторам свертки в пространствах Морри. В этой связи отметим работу [7], в которой рассмотрены операторы свертки в общих пространствах типа Морри и установлен аналог неравенства Юнга для сверток в этих пространствах. В статье [8] найдены достаточные условия компактности в пространствах Морри композиции оператора свертки и оператора умножения на существенно ограниченную функцию.

Данная работа продолжает исследования, начатые в работе [8]. В пространствах Морри рассматриваются операторы вида

$$(H_b\varphi)(x) = \int_{\mathbb{R}^n} b(x, y)h(x - y)\varphi(y)dy, \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad (1)$$

где $h \in L_1(\mathbb{R}^n)$. Функцию $b(x, y)$ будем называть характеристикой. Получены достаточные условия ограниченности оператора H_b в случае неограниченной функции $b(x, y)$. Кроме того, показано, что если функция $b(x, y)$ стремится к нулю на бесконечности, то оператор H_b компактен в пространстве Морри.

Ниже использованы следующие обозначения: \mathbb{R}^n – n -мерное евклидово пространство; $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$; $|x| = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_n^2}$; $\mathbb{B}(x, r)$ – открытый шар в \mathbb{R}^n радиусом r с центром в точке x ; $C\mathbb{B}(x, r) = \mathbb{R}^n \setminus \mathbb{B}(x, r)$; P_D – оператор умножения на характеристическую функцию измеримого множества $D \subset \mathbb{R}^n$.

Предварительные сведения

Пусть $1 \leq p \leq \infty$, $X \subseteq \mathbb{R}^n$ – измеримое множество. Тогда $L_p(X)$ – пространство (классов) измеримых комплекснозначных функций с нормой

$$\|f\|_{L_p(D)} = \left(\int_D |f(x)|^p dx \right)^{1/p}, \quad 1 \leq p < \infty; \quad \|f\|_{L_\infty(D)} = \operatorname{ess\,sup}_{x \in D} |f(x)|.$$

В случае $X = \mathbb{R}^n$ будем использовать обозначение $\|\cdot\|_p$ вместо $\|\cdot\|_{L_p(X)}$. Будем говорить, что $f \in L_p^{loc}(\mathbb{R}^n)$, если $f \in L_p(K)$ для любого компакта $K \subset \mathbb{R}^n$.

Определение 1. Пусть $1 \leq p \leq \infty$ и $\lambda \in \mathbb{R}$. Говорят, что функция $f \in L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$, если $f \in L_p^{loc}(\mathbb{R}^n)$ и

$$\|f\|_{L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)} \equiv \|f\|_{p,\lambda} = \sup_{x \in \mathbb{R}^n, r > 0} \frac{\|f\|_{L_p(\mathbb{B}(x,r))}}{r^\lambda} < \infty. \quad (2)$$

Относительно обычных линейных операций и нормы, определяемой формулой (2), множество $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$ образует банахово пространство, которое называют пространством Морри.

Пространства Морри $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$ являются нетривиальными, т.е. состоят не только из функций, эквивалентных нулю на \mathbb{R}^n , тогда и только тогда, когда $0 \leq \lambda \leq n/p$. При $\lambda = 0$ и $\lambda = n/p$ пространства Морри совпадают с L_p -пространствами, а именно

$$L_{p,0}(\mathbb{R}^n) = L_p(\mathbb{R}^n), \quad L_{p,n/p}(\mathbb{R}^n) = L_\infty(\mathbb{R}^n). \quad (3)$$

В пространстве $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$ рассмотрим оператор свертки

$$(H\varphi)(x) = \int_{\mathbb{R}^n} h(x-y)\varphi(y)dy, \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad (4)$$

где $h \in L_1(\mathbb{R}^n)$. В работе [7] было показано, что оператор H ограничен в пространстве $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$, где $1 \leq p \leq \infty$, причем $\|H\| \leq \|h\|_1$. Здесь и далее $\|\cdot\| = \|\cdot\|_{L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)}$.

Так как операторы свертки в L_p -пространствах хорошо изучены, то, учитывая равенства (3), случаи $\lambda = 0$ и $\lambda = n/p$ в дальнейшем исключены из рассмотрения.

Теорема об ограниченности

В пространстве $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$ рассмотрим оператор H_b вида (1). Установим одно достаточное условие ограниченности в пространстве Морри.

Теорема 1. Пусть $1 < p < \infty$, $0 < \lambda < n/p$, $h \in L_1(\mathbb{R}^n)$,

$$\beta = \text{ess sup}_{x \in \mathbb{R}^n} \int_{\mathbb{R}^n} |b(x, x-y)|^{p'} |h(y)| dy < \infty. \quad (5)$$

Тогда оператор H_b ограничен в пространстве $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$, причем для любой функции $\varphi \in L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$ справедливо неравенство

$$\|H_b \varphi\|_{p,\lambda} \leq \beta^{1/p'} \|h\|_1^{1/p} \|\varphi\|_{p,\lambda}. \quad (6)$$

Доказательство. Запишем оператор H_b в виде $(H_b \varphi)(x) = \int_{\mathbb{R}^n} b(x, x-y)h(y)\varphi(x-y)dy$.

Учитывая равенство $|b(x, x-y)h(y)\varphi(x-y)| = (|b(x, x-y)||h(y)|^{1/p'}) (|h(y)|^{1/p} |\varphi(x-y)|)$ и применяя неравенство Гёльдера, получим

$$|(H_b \varphi)(x)| \leq \int_{\mathbb{R}^n} |b(x, x-y)||h(y)||\varphi(x-y)| dy \leq \left(\int_{\mathbb{R}^n} |b(x, x-y)|^{p'} |h(y)| dy \right)^{1/p'} \times \\ \times \left(\int_{\mathbb{R}^n} |h(y)||\varphi(x-y)|^p dy \right)^{1/p} \leq \beta^{1/p'} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |h(y)||\varphi(x-y)|^p dy \right)^{1/p}.$$

Следовательно,

$$\|H_b \varphi\|_{L_p(\mathbb{B}(x,r))} \leq \beta^{1/p'} \left(\int_{\mathbb{B}(x,r)} dt \int_{\mathbb{R}^n} |h(y)||\varphi(t-y)|^p dy \right)^{1/p} = \\ = \beta^{1/p'} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |h(y)| dy \int_{\mathbb{B}(x,r)} |\varphi(t-y)|^p dt \right)^{1/p} = \\ = \beta^{1/p'} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |h(y)| dy \int_{\mathbb{B}(x-y,r)} |\varphi(z)|^p dz \right)^{1/p} = \beta^{1/p'} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |h(y)| \|\varphi\|_{L_p(\mathbb{B}(x-y,r))}^p dy \right)^{1/p}.$$

Используя определение нормы в пространстве Морри, получим

$$\|H_b \varphi\|_{p,\lambda} = \sup_{x \in \mathbb{R}^n, r > 0} r^{-\lambda} \|H_b \varphi\|_{L_p(\mathbb{B}(x,r))} \leq \beta^{1/p'} \sup_{x \in \mathbb{R}^n, r > 0} r^{-\lambda} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |h(y)| \|\varphi\|_{L_p(\mathbb{B}(x-y,r))}^p dy \right)^{1/p} \leq \\ \leq \beta^{1/p'} \sup_{x \in \mathbb{R}^n, r > 0} \left(\int_{\mathbb{R}^n} |h(y)| (r^{-\lambda} \|\varphi\|_{L_p(\mathbb{B}(x-y,r))})^p dy \right)^{1/p} \leq \beta^{1/p'} \|h\|_1^{1/p} \|\varphi\|_{p,\lambda}.$$

Теорема доказана.

Отметим, что для выполнения условия (5) функция $b(x, y)$ не обязана быть ограниченной. Приведем соответствующий пример. Определим на \mathbb{R}^2 функцию $b(x, y)$ формулой

$$b(x, y) = \begin{cases} 0, & |x| < 1, y \in \mathbb{R}, \\ \left(\frac{|y|}{x^2}\right)^{1/p'}, & |x| \geq 1, y \in \mathbb{R}, \end{cases} \text{ и пусть } h(y) = e^{-|y|}. \text{ Тогда}$$

$$\beta = \text{ess sup}_{x \in \mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} \frac{|x-y|}{x^2} e^{-|y|} dy = \text{ess sup}_{|x| \geq 1} \int_{\mathbb{R}} \left| \frac{1}{x} - \frac{y}{x^2} \right| e^{-|y|} dy \leq \\ \leq \text{ess sup}_{|x| \geq 1} \left(\frac{1}{|x|} \int_{\mathbb{R}} e^{-|y|} dy + \frac{1}{x^2} \int_{\mathbb{R}} |y| e^{-|y|} dy \right) < \infty.$$

Если $b \in L_\infty(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$, то условие (5) заведомо выполнено, причем $\beta \leq \|b\|_\infty^{p'} \|h\|_1$. Из неравенства (6) следует, что

$$\|H_b \varphi\|_{p,\lambda} \leq \|b\|_\infty \|h\|_1 \|\varphi\|_{p,\lambda}. \quad (7)$$

Теоремы о компактности

В этом разделе всюду предполагается, что $b \in L_\infty(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$. Как было отмечено выше, в этом случае оператор H_b ограничен в пространстве Морри и выполнено неравенство (7). Исследуем компактность оператора H_b .

Лемма 1. Пусть $1 < p < \infty$, $0 < \lambda < n/p$, $h \in L_1(\mathbb{R}^n)$, D – ограниченное измеримое множество в \mathbb{R}^n . Тогда операторы $P_D H_b$ и $H_b P_D$ компактны в пространстве $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$.

Доказательство. Докажем компактность оператора $P_D H_b$. Пусть вначале $b(x, y) = b_1(x) b_2(y)$. Тогда $H_b = M_{b_1} H M_{b_2}$, где H – оператор вида (3); M_{b_j} – оператор умножения на функцию b_j , $j = 1, 2$. Следовательно, $P_D H_b = P_D M_{b_1} H M_{b_2} = M_{b_1} P_D H M_{b_2}$.

Так как оператор $P_D H$ компактен в пространстве $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$ [8], то оператор $P_D H_b$ также компактен. Очевидно, что оператор $P_D H_b$ является компактным и в случае, когда

$$b(x, y) = \sum_{j=1}^m b_{1j}(x) b_{2j}(y), \quad (8)$$

где m – произвольное натуральное число.

Пусть теперь $b(x, y)$ – произвольная функция из $L_\infty(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$. Так как множество S , состоящее из всех функций вида (8), всюду плотно в пространстве $L_\infty(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$, то найдется такая последовательность $\{b_k(x, y)\} \subset S$, что $\|b - b_k\|_\infty \rightarrow 0$ при $k \rightarrow \infty$. В силу (7)

$$\|P_D H_b - P_D H_{b_k}\| \leq \|H_{b-b_k}\| \leq \|b - b_k\|_\infty \|h\|_1 \rightarrow 0.$$

Следовательно, оператор $P_D H_b$ является компактным, как равномерный предел последовательности компактных операторов $P_D H_{b_k}$.

Компактность оператора $H_b P_D$ доказывается аналогично.

Определение 2 [9, р. 41]. Будем говорить, что функция $b(x, y)$ из пространства $L_\infty(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$ принадлежит классу $B^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$, если существует такая постоянная b_∞ , что $\lim_{N \rightarrow \infty} \text{ess sup}_{|x| > N, |y| > N} |b(x, y) - b_\infty| = 0$.

Если $b_\infty = 0$, то будем говорить, что $b \in B_0^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$.

Заметим, что класс $B_0^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$ представляет собой замыкание по L_∞ -норме множества всех функций из $L_\infty(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$, имеющих компактный носитель.

Следующая теорема является основным результатом этого раздела.

Теорема 2. Пусть $1 < p < \infty$, $0 < \lambda < n/p$, $h \in L_1(\mathbb{R}^n)$. Тогда:

1. Если $b \in B_0^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$, то оператор H_b компактен в пространстве $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$.
2. Если $b \in B^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$ и оператор H_b является компактным, то $b_\infty = 0$.

Доказательство 1. Рассмотрим шар $\mathbb{B}(0, N)$, где N – произвольное натуральное число. Тогда

$$H_b = P_{\mathbb{B}(0,N)} H_b + P_{C\mathbb{B}(0,N)} H_b P_{\mathbb{B}(0,N)} + P_{C\mathbb{B}(0,N)} H_b P_{C\mathbb{B}(0,N)}.$$

В силу леммы 1 оператор $T_N = P_{\mathbb{B}(0,N)} H_b + P_{C\mathbb{B}(0,N)} H_b P_{\mathbb{B}(0,N)}$ является компактным. Оценим норму

$$\|H_b - T_N\| = \|P_{C\mathbb{B}(0,N)} H_b P_{C\mathbb{B}(0,N)}\|. \quad (9)$$

Заметим, что $(P_{C\mathbb{B}(0,N)} H_b P_{C\mathbb{B}(0,N)} \varphi)(x) = \int_{\mathbb{R}^n} \chi_N(x) b(x, y) \chi_N(y) h(x - y) \varphi(y) dy$, где χ_N – характеристическая функция множества $C\mathbb{B}(0, N)$. Из условия $b \in B_0^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$ с учетом неравенства (7) следует, что $\|P_{C\mathbb{B}(0,N)} H_b P_{C\mathbb{B}(0,N)}\| \leq \text{ess sup}_{|x| > N, |y| > N} |b(x, y)| \|h\|_1 \rightarrow 0$ при $N \rightarrow \infty$. Так как

$\|H_b - T_N\| \rightarrow 0$ и T_N – компактный оператор, то оператор H_b также является компактным.

2. Так как $b \in B^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$, то $(b - b_\infty) \in B_0^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$, потому оператор H_{b-b_∞} является компактным. Из равенства $b_\infty H = H_b - H_{b-b_\infty}$ следует компактность оператора H_{b_∞} . Так как оператор H не компактен, то $b_\infty = 0$.

Отметим, что теоремы о компактности произведения оператора свертки и оператора умножения на функцию, полученные в работе [8], являются частными случаями этой теоремы.

Теорема 2 позволяет получить критерий нетеровости оператора $A = cI + H_b$, где $c \in \mathbb{C}$. Считая, что $b \in B^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$, назовем символом оператора A функцию $\sigma(\xi) = c + b_\infty \hat{h}(\xi)$, $\xi \in \mathbb{R}^n$, где $\hat{h}(\xi) = \int_{\mathbb{R}^n} h(x) e^{i\xi \cdot x} dx$ – преобразование Фурье функции $h(x)$.

Следствие 1. Пусть $1 < p < \infty$, $0 < \lambda < n/p$, $h \in L_1(\mathbb{R}^n)$, $b \in B^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$. Для того чтобы оператор A был нетеровым в пространстве $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$, необходимо и достаточно, чтобы его символ удовлетворял условию

$$\sigma(\xi) \neq 0, \xi \in \mathbb{R}^n, \tag{10}$$

где \mathbb{R}^n – компактификация \mathbb{R}^n одной бесконечно удаленной точкой. Если условие (10) выполнено, то индекс оператора A равен нулю.

Доказательство. Справедливо равенство $A = cI + b_\infty H + H_{b-b_\infty}$.

Так как $(b - b_\infty) \in B_0^{\text{sup}}(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$, то по теореме 2 оператор H_{b-b_∞} является компактным. Следовательно, оператор A нетеров тогда и только тогда, когда нетеров оператор $cI + b_\infty H$, причем их индексы равны. Согласно результатам работы [10], условие (10) является необходимым и достаточным для нетеровости и обратимости оператора $cI + b_\infty H$. Отсюда вытекает справедливость следствия.

В заключение приведем еще одно достаточное условие компактности оператора H_b .

Теорема 3. Пусть $1 < p < \infty$, $0 < \lambda < n/p$, $h \in L_1(\mathbb{R}^n)$, функция $b \in L_\infty(\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n)$ и для любого $\varepsilon > 0$ удовлетворяет условию $\lim_{N \rightarrow \infty} \text{mes} \left\{ y: |y| > N, \text{ess sup}_{|x| > N} |b(x, y)| > \varepsilon \right\} = 0$.

Тогда оператор H_b компактен в пространстве $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$.

Доказательство разобьем на два этапа.

1. Пусть сначала $h \in C_0^\infty(\mathbb{R}^n)$. Повторяя доказательство теоремы 2, приходим к равенству (9), где T_N – компактный оператор. Докажем, что

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \|P_{C\mathbb{B}(0,N)} H_b P_{C\mathbb{B}(0,N)}\| = 0. \tag{11}$$

Возьмем произвольное $\varepsilon > 0$. Введем обозначения:

$$U_{N,\varepsilon} = \left\{ y: |y| > N, \text{ess sup}_{|x| > N} |b(x, y)| > \varepsilon \right\},$$

$$V_{N,\varepsilon} = \left\{ y: |y| > N, \text{ess sup}_{|x| > N} |b(x, y)| \leq \varepsilon \right\}.$$

Ясно, что $U_{N,\varepsilon} \cup V_{N,\varepsilon} = C\mathbb{B}(0, N)$ и $U_{N,\varepsilon} \cap V_{N,\varepsilon} = \emptyset$. Кроме того,

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \text{mes}(U_{N,\varepsilon}) = 0. \tag{12}$$

Запишем оператор $P_{C\mathbb{B}(0,N)} H_b P_{C\mathbb{B}(0,N)}$ в виде

$$(P_{C\mathbb{B}(0,N)} H_b P_{C\mathbb{B}(0,N)} \varphi)(x) = \int_{\mathbb{R}^n} b_N(x, y) h(x - y) \varphi(y) dy, \text{ где}$$

$$b_N(x, y) = \chi_N(x) b(x, y) \chi_N(y), \tag{13}$$

а χ_N – характеристическая функция множества $C\mathbb{B}(0, N)$. Согласно неравенству (6),

$$\|P_{C\mathbb{B}(0,N)} H_b P_{C\mathbb{B}(0,N)}\| \leq \beta_N^{1/p'} \|h\|_1^{1/p}, \tag{14}$$

где $\beta_N = \text{ess sup}_{x \in \mathbb{R}^n} \int_{\mathbb{R}^n} |b_N(x, x - t)|^{p'} |h(t)| dt$.

Полагая $y = x - t$ и учитывая (13), получаем

$$\beta_N = \text{ess sup}_{x \in \mathbb{R}^n} \int_{\mathbb{R}^n} |b_N(x, y)|^{p'} |h(x - y)| dy = \text{ess sup}_{|x| \geq N} \int_{|y| \geq N} |b(x, y)|^{p'} |h(x - y)| dy \leq$$

$$\leq \text{ess sup}_{|x| \geq N} \int_{U_{N,\varepsilon}} |b(x, y)|^{p'} |h(x - y)| dy + \text{ess sup}_{|x| \geq N} \int_{V_{N,\varepsilon}} |b(x, y)|^{p'} |h(x - y)| dy.$$

Обозначим слагаемые в этой сумме через β_N^1 и β_N^2 соответственно. Тогда $\beta_N \leq \beta_N^1 + \beta_N^2$.

Оценим β_N^1 . Пусть $\mu = \sup_{x \in \mathbb{R}^n} |h(x)|$. Тогда

$$\beta_N^1 \leq \mu \text{ess sup}_{|x| \geq N} \int_{U_{N,\varepsilon}} |b(x, y)|^{p'} dy \leq \mu \text{ess sup}_{|x| \geq N, y \in U_{N,\varepsilon}} |b(x, y)|^{p'} \text{mes}(U_{N,\varepsilon}) \leq \mu \|b\|_\infty^{p'} \text{mes}(U_{N,\varepsilon}).$$

В силу (12) $\beta_N^1 \rightarrow 0$ при $N \rightarrow \infty$. Таким образом, по выбранному $\varepsilon > 0$ найдется такой номер N_0 , что $\beta_N^1 < \varepsilon^{p'}$ для всех $N > N_0$.

Для второго слагаемого имеем оценку

$$\beta_N^2 \leq \operatorname{ess\,sup}_{|x| \geq N, y \in V_{N,\varepsilon}} |b(x, y)|^{p'} \int_{V_{N,\varepsilon}} |h(x - y)| dy \leq \varepsilon^{p'} \int_{\mathbb{R}^n} |h(y)| dy = \varepsilon^{p'} \|h\|_1.$$

Таким образом, для любого $N > N_0$ справедливо неравенство $\beta_N \leq \varepsilon^{p'} + \varepsilon^{p'} \|h\|_1$. В силу (14) имеет место неравенство $\|P_{C\mathbb{B}(0,N)} H_b P_{C\mathbb{B}(0,N)}\| \leq \varepsilon(1 + \|h\|_1)^{1/p'} \|h\|_1^{1/p}$, которое означает, что выполнено условие (11).

2. Пусть теперь $h(t)$ – произвольная функция из $L_1(\mathbb{R}^n)$. Так как класс $C_0^\infty(\mathbb{R}^n)$ всюду плотен в $L_1(\mathbb{R}^n)$, то найдется такая последовательность $\{h_k\} \subset C_0^\infty(\mathbb{R}^n)$, что $\|h - h_k\|_1 \rightarrow 0$ при $k \rightarrow \infty$. Рассмотрим оператор $(H_{k,b}\varphi)(x) = \int_{\mathbb{R}^n} b(x, y)h_k(x - y)\varphi(y)dy$, который по доказанному выше является компактным. Используя неравенство (7), получим $\|H_b - H_{k,b}\| \leq \|b\|_\infty \|h - h_k\|_1 \rightarrow 0$ при $k \rightarrow \infty$. Следовательно, оператор H_b компактен в пространстве $L_{p,\lambda}(\mathbb{R}^n)$. Теорема доказана.

Список источников

1. Burenkov V.I. Recent progress in studying the boundedness of classical operators of real analysis in general Morrey-type spaces. I // Eurasian Math. J. 2012. Vol. 3, № 3. P. 11–32.
2. Burenkov V.I. Recent progress in studying the boundedness of classical operators of real analysis in general Morrey-type spaces. II // Eurasian Math. J. 2013. Vol. 4, № 1. P. 21–45.
3. Morrey C.B. On the solutions of quasi-linear elliptic partial differential equations // Trans. Amer. Math. Soc. 1938. Vol. 43. P. 126–166.
4. Буренков В.И., Гулиев В.С., Тарарыкова Т.В., Шербетчи А. Необходимые и достаточные условия ограниченности истинных сингулярных интегралов в локальных пространствах типа Морри // Докл. РАН. 2008. Т. 422, № 1. С. 11–14.
5. Chen Y., Ding Y., Wang X. Compactness of commutators for singular integrals on Morrey spaces // Canad. J. Math. 2012. Vol. 64, № 2. P. 257–281.
6. Burenkov V.I., Senouci M.A. Boundedness of the generalized Riesz potential in local Morrey type spaces // Eurasian Math. J. 2021. Vol. 12, № 4. P. 92–98.
7. Буренков В. И., Тарарыкова Т. В. Аналог неравенства Юнга для сверток функций для общих пространств типа Морри // Функциональные пространства, теория приближений, смежные разделы математического анализа: сб. ст. к 110-летию со дня рождения академика С.М. Никольского. Труды МИАН. 2016. Т. 293. С. 113–132.
8. Авсянкин О.Г. О компактности операторов типа свертки в пространствах Морри // Мат. заметки. 2017. Т. 102, вып. 4. С. 483–489.
9. Karapetians N.K., Samko S.G. Equations with Involutive Operators. Boston; Basel; Berlin: Birkhauser, 2001.
10. Авсянкин О.Г. Об обратимости операторов типа свертки в пространствах Морри // Изв. вузов. Математика. 2019. № 6. С. 3–10.

References

1. Burenkov V. I. Recent progress in studying the boundedness of classical operators of real analysis in general Morrey-type spaces. I. *Eurasian Math. J.* 2012;3(3):11-32.
2. Burenkov V. I. Recent progress in studying the boundedness of classical operators of real analysis in general Morrey-type spaces. II. *Eurasian Math. J.* 2013;4(1):21-45.
3. Morrey C. B. On the solutions of quasi-linear elliptic partial differential equations. *Trans. Amer. Math. Soc.* 1938;43:126-166.
4. Burenkov V.I., Guliev V.S., Tararykova T.V., Sherbetchi A. Necessary and sufficient conditions for the boundedness of genuine singular integral operators in Morrey-type local spaces. *Dokl. Akad. Nauk.* 2008;422(1):11-14. (In Russ.).
5. Chen Y., Ding Y., Wang X. Compactness of commutators for singular integrals on Morrey spaces. *Canad. J. Math.* 2012;64(2):257-281.
6. Burenkov V. I., Senouci M. A. Boundedness of the generalized Riesz potential in local Morrey type spaces. *Eurasian Math. J.* 2021;12(4):92-98.
7. Burenkov V.I., Tararykova T.V. An analog of Young's inequality for convolutions of functions for general Morrey-type spaces. *Function Spaces, Approximation Theory, Related Sections of Mathematical Analysis. Proc. Steklov Inst. Math.* 2016;293:107-126.
8. Avsyankin O. G. On the Compactness of Convolution-Type Operators in Morrey Spaces. *Mathematical Notes.* 2017;102(4):437-443.

9. Karapetiants N. K., Samko S. G. *Equations with Involution Operators*. Boston; Basel; Berlin: Birkhauser Publ., 2001.

10. Avsyankin O. G. On Invertibility of Convolution Type Operators in Morrey Spaces. *Russian Mathematics*. 2019;63(6):1-7.

Информация об авторах

О.Г. Авсянкин – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой дифференциальных и интегральных уравнений, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Региональный научно-образовательный математический центр.

С.С. Ашихмин – аспирант, кафедра дифференциальных и интегральных уравнений, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Information about the authors

O.G. Avsyankin - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Department of Differential and Integral Equations, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Regional Scientific and Educational Mathematical Center.

S.S. Ashikhmin - Postgraduate, Department of Differential and Integral Equations, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

Статья поступила в редакцию 29.05.2022; одобрена после рецензирования 08.06.2022; принята к публикации 30.08.2022.
The article was submitted 29.05.2022; approved after reviewing 08.06.2022; accepted for publication 30.08.2022.

Научная статья
УДК 512.634
doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-11-22

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ОБОБЩЕНИЙ КЛАССИЧЕСКОЙ ЦЕПОЧКИ ВОЛЬТЕРРА

Юрий Викторович Бибик

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук,
Москва, Россия
yvbibik@ccas.ru

Аннотация. Выполнено аналитическое исследование одного из обобщений классической цепочки Вольтерра (связной цепочки Вольтерра). Применение при исследовании методов и подходов статистической механики позволило выявить ряд важных особенностей таких моделей, которые в настоящее время широко применяются при исследованиях в химии, экологии, биологии, экономике, гидродинамике, астрофизике, физике плазмы. Достоинством исследованной модели является то, что введение дополнительных переменных позволяет учесть большее количество факторов, влияющих на динамику системы, не изменяя при этом ее алгебраической структуры. Однако попытка статистического описания модели выявляет существенный недостаток – статистическая сумма системы становится расходящейся. В связи с этим исследована возможность адекватного статистического описания связной цепочки Вольтерра при расходимости ее статистической суммы. Для выбранной конкретной модели выявлены источники расходимости статистической суммы, предложен метод их устранения. Статистическая сумма вычислена в явном и конечном виде, что позволяет утверждать, что адекватное статистическое описание явлений, описываемых данной моделью, возможно. Учитывая широкий спектр применений связной цепочки Вольтерра, полученные результаты представляют интерес для теоретиков и практиков при анализе и прогнозировании результатов статистического исследования различных обобщений модели.

Ключевые слова: связная цепочка Вольтерра, статистическая сумма, расходимость, регуляризация

Для цитирования: Бибик Ю.В. Особенности применения методов статистической механики при исследовании обобщений классической цепочки Вольтерра // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 3. С. 11–22.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4/0).

Original article

FEATURES OF APPLICATION OF THE METHODS STATISTICAL MECHANICS IN RESEARCH OF GENERALIZATIONS OF THE CLASSICAL VOLTERRA CHAIN

Yuriy V. Bibik

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
yvbibik@ccas.ru

© Бибик Ю.В., 2022

Abstract. An analytical study of one of the generalizations of the classical Volterra chain (coupled Volterra chain) has been carried out. The use of methods and approaches of statistical mechanics in the study made it possible to identify a number of important features of such models, which are currently widely used in research in chemistry, ecology, biology, economics, hydrodynamics, astrophysics, plasma physics. The advantage of the studied model is that the introduction of additional variables makes it possible to take into account a greater number of factors influencing the dynamics of the system without changing its algebraic structure. However, an attempt at a statistical description of the model reveals a significant drawback - the partition function of the system becomes divergent. In this regard, the possibility of an adequate statistical description of the coupled Volterra chain in the case of divergence of its partition function is investigated. For the selected specific model, the sources of the divergence of the partition function are identified, and a method for their cancel out is proposed. The partition function is calculated in an explicit and finite form, which allows us to state that an adequate statistical description of the phenomena described by this model is possible. Given the wide range of applications of the coupled Volterra chain, the results obtained are of interest to theorists and practitioners when analyzing and predicting the results of a statistical study of various generalizations of the model.

Keywords: coupled Volterra chain, partition function, divergence, regularization

For citation: Bibik Yu.V. Features of Application of the Methods Statistical Mechanics in Research of Generalizations of the Classical Volterra Chain. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(3):11-22. (in Russ.).

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4/0).

1. Введение

В настоящее время современные подходы и принципы статистической механики широко и успешно применяются в различных направлениях исследований. В экономике – принципы максимизации энтропии для исследования вероятностного распределения финансов, прогнозирования статистического равновесия на рынке труда, использования моделей долга в форме отрицательных денег в банковском деле, моделирования цены активов на финансовом рынке [1–3].

Основоположителем использования методов статистической механики в экологии и биологии был Э. Кернер [4–7]. После ряда его успешных работ наступил длительный период отхода от статистического исследования экологических и биологических систем. Однако в последнее десятилетие отмечается новый всплеск интереса к методам статистической механики, но уже на другом, современном уровне. При этом все основные инструменты статистической механики адаптированы к условиям экологии и биологии [8, 9].

Инструменты статистической механики применяются для прогнозирования численности видов в экологических сообществах [10], изучения и прогнозирования таких процессов, как опустынивание [11], исследования необычных фазовых переходов, динамика которых похожа на динамику фазовых переходов физических систем [12], в качестве инструментария для изучения социальных процессов и явлений [13, 14].

В данной работе методы и подходы статистической механики использованы для аналитического исследования статистических свойств связанной цепочки Вольтерра. Исходная связанная цепочка Вольтерра является обобщением классической цепочки Вольтерра. Классическая цепочка Вольтерра хорошо изучена и имеет широкий спектр приложений [15–21]. Среди возможных вариантов ее обобщений особую роль играет комплексификация зависимых переменных как наиболее естественный способ введения дополнительных степеней свободы. Этот способ не нарушает алгебраическую структуру цепочки Вольтерра. Исследуемая в работе связанная цепочка Вольтерра также получена комплексификацией классической цепочки Вольтерра. Это позволяет учесть более сложные взаимосвязи между зависимыми переменными без изменения алгебраической структуры исследуемой модели.

Связанная цепочка Вольтерра является одним из современных обобщений классической цепочки Вольтерра [22–24], она представляет собой интегрируемую дискретизацию связанной системы уравнений Кортевега – де Фриза. Эти уравнения и их интегрируемые дискретизации широко используются для описания процессов в химии, биологии, экономике, гидродинамике, астрофизике, физике плазмы [25–27].

Однако обобщение классических моделей не всегда представляет собой безобидную и простую задачу. Добавление дополнительных переменных в уравнение динамики системы порождает ряд проблем и сложностей, которые часто незаметны сразу. Именно так обстоит дело со связанной цепочкой Вольтерра.

На первом этапе ее изучения исследователями были получены явные солитонные решения [28, 29]. Однако при попытке ввести статистическое описание исходной системы с дополнительно введенными переменными возникают сложности. Статистическое описание требует наличия в задаче гамильтоновой структуры. В ходе исследования выясняется, что гамильтониан связанной цепочки Вольтерра не ограничен снизу. Это приводит к расходимости статистической суммы и трудной задаче по ее устранению, требующей специального подхода.

Проблема устранения расходимости не нова, она появляется и решается во многих областях физики. Наиболее полно эта проблема исследована в квантовой теории поля [30–35]. Существуют подходы, используемые при выполнении исследований в других областях физики. В работе [36] применена методология размерной регуляризации к ряду задач статистической механики, содержащих расходимость.

Учитывая широкий спектр применения исследуемой модели, а также то, что любая модель представляет собой только упрощенное представление действительности, возникает вопрос надежности результатов аналогичных моделей с расходимостью. Приводит ли расходимость к невозможности статистического описания исследуемой модели? Есть ли способ устранить расходимость в данной задаче? Является ли связанная цепочка Вольтерра с расходимостью адекватной во всех областях применения? Ответам на эти вопросы посвящена данная статья.

Статья организована следующим образом:

- в разделе 2 дано описание исследуемой модели и приведено ее представление в гамильтоновом виде;
- в разделе 3 представлены основные особенности исследования связанной цепочки Вольтерра методами статистической механики, включая выявление расходимости статистической суммы, ее устранение методом перенормировки, вычисление статистической суммы в явном и конечном виде;
- в приложении А приведено исследование асимптотики расходящегося интеграла B_2 ;
- в заключении изложены основные проблемы, выявленные в процессе исследования, и даны общие рекомендации по исследованию и использованию аналогичных моделей

2. Описание исходной модели и ее представление в гамильтоновом виде

Как известно, классическая цепочка Вольтерра (обобщением которой является исследуемая модель) является интегрируемой дискретизацией уравнения Кортевега – де Фриза. Она имеет следующий вид:

$$\frac{da_i}{dt} = a_i(a_{i+1} - a_{i-1}), \quad (1)$$

где a_i – зависимая переменная; t – дискретная независимая переменная.

Исходная связанная цепочка Вольтерра представляет собой интегрируемую дискретизацию связанной системы уравнений Кортевега – де Фриза. Она представлена двумя следующими формулами:

$$\frac{db_i}{dt} = b_i(b_{i+1} - b_{i-1}) - c_i(c_{i+1} - c_{i-1}), \quad (2)$$

$$\frac{dc_i}{dt} = b_i(c_{i+1} - c_{i-1}) + c_i(b_{i+1} - b_{i-1}). \quad (3)$$

В отличие от классической цепочки Вольтерра связанная цепочка Вольтерра имеет в своем составе две действительные зависимые переменные b_i и c_i , что позволяет учесть более сложные связи между зависимыми переменными и использовать модель для исследования более сложных явлений.

Для того чтобы применить математический аппарат статистической механики для аналитического исследования исходной модели, преобразуем ее к гамильтоновому виду.

На первом этапе преобразования вместо двух действительных переменных b_i и c_i введем одну комплексную переменную \bar{a}_i : $\bar{a}_i = b_i + ic_i$.

Нетрудно убедиться, что формулы (2) и (3) связанной цепочки Вольтерра принимают вид

$$\frac{d\bar{a}_i}{dt} = \bar{a}_i(\bar{a}_{i+1} - \bar{a}_{i-1}). \quad (4)$$

Цепочка (4) отличается от классической цепочки Вольтерра (1) заменой действительной переменной на комплексную, и в этом смысле такая комплексификация не меняет алгебраической структуры цепочки. Комплексная (4) и связанная (2), (3) цепочки Вольтерра представляют собой две разные формы записи одного и того же уравнения. В статье используются оба наименования в зависимости от контекста.

В данной работе исследуется комплексная цепочка Вольтерра с периодическими граничными условиями $\bar{a}_{i+N} = \bar{a}_i$.

Далее выполним следующую замену переменных:

$$z_i = \ln \bar{a}_i. \quad (5)$$

Поскольку в формуле (5) переменная \bar{a}_i является комплексной, то и переменная z_i также является комплексной и имеет вид

$$z_i = x_i + iy_i.$$

После замены переменных (5) уравнение комплексной цепочки Вольтерра (4) принимает вид

$$\frac{dz_i}{dt} = e^{z_{i+1}} - e^{z_{i-1}}. \quad (6)$$

Представим систему (6) в терминах действительных переменных x_i и y_i

$$\frac{d(x_i + iy_i)}{dt} = e^{x_{i+1}} e^{iy_{i+1}} - e^{x_{i-1}} e^{iy_{i-1}}. \quad (7)$$

Уравнение (7) позволяет перейти от комплексной системы (6) к паре действительных уравнений (8), (9)

$$\frac{dx_i}{dt} = e^{x_{i+1}} \cos y_{i+1} - e^{x_{i-1}} \cos y_{i-1}, \quad (8)$$

$$\frac{dy_i}{dt} = e^{x_{i+1}} \sin y_{i+1} - e^{x_{i-1}} \sin y_{i-1}. \quad (9)$$

Для того чтобы представить уравнения связанной цепочки Вольтерра (8), (9) в гамильтоновом виде, используем следующие скобки Пуассона:

$$\{f, g\} = \sum_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial g}{\partial y_{i+1}} - \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial g}{\partial y_{i-1}} + \frac{\partial f}{\partial y_i} \frac{\partial g}{\partial x_{i+1}} - \frac{\partial f}{\partial y_i} \frac{\partial g}{\partial x_{i-1}}. \quad (10)$$

Формула (10) позволяет представить уравнения (8), (9) связанной цепочки Вольтерра в гамильтоновом виде

$$\frac{dx_i}{dt} = \{x_i, H\}, \quad (11)$$

$$\frac{dy_i}{dt} = \{y_i, H\}. \quad (12)$$

Гамильтониан связанной цепочки Вольтерра (11), (12) получен с использованием структуры скобок Пуассона (10) и имеет вид

$$H = \sum_i e^{x_i} \sin y_i - \lambda x_i. \quad (13)$$

Появление неопределенных множителей в виде слагаемых λx_i в гамильтониане (13) обусловлено структурой скобок Пуассона (10). Добавление этих слагаемых в гамильтониан не меняет динамики системы. Константа λ может быть выбрана произвольно. Ее определение, исходя из статистических свойств системы, представляет отдельную задачу и в данной работе не рассматривается. Комплексификация зависимой переменной a_i привела к появлению в гамильтониане множителя $\sin y_i$. Как показано ниже, его появление приводит к расходимости статистической суммы.

Построение гамильтониана (13) позволяет далее перейти к исследованию исходной модели с помощью методов и инструментов статистической механики.

3. Основные особенности исследования связной цепочки Вольтерра методами статистической механики

В качестве основного инструмента исследования исходной модели методами статистической механики будет использована статистическая сумма, поскольку она позволит получить наиболее полное представление о важнейших термодинамических характеристиках системы и сделать выводы о возможности ее адекватного использования.

Наличие гамильтониана связной цепочки Вольтерра (13) позволяет построить статистическую сумму исходной модели в виде

$$Z = \int \prod_i dx_i dy_i e^{-\beta H} = \int \prod_i dx_i dy_i e^{-\beta \sum_i (e^{x_i} \sin y_i - \lambda x_i)} = \prod_i Z_i = Z_i^N. \quad (14)$$

Аддитивность гамильтониана приводит к факторизации статистической суммы. Типичный множитель $Z_i = \bar{Z}$ имеет вид

$$Z_i = \bar{Z} = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} dy \int_{-\infty}^{\infty} dx e^{-\beta e^x \sin y + \beta \lambda x}.$$

Представим статистическую сумму \bar{Z} в виде двух слагаемых Z_1 и Z_2 : $\bar{Z} = Z_1 + Z_2$, где

$$Z_1 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} dy \int_{-\infty}^{\infty} dx e^{-\beta \sin y e^x + \beta \lambda x}; \quad Z_2 = \int_{-\frac{\pi}{2}}^0 dy \int_{-\infty}^{\infty} dx e^{-\beta \sin y e^x + \beta \lambda x}.$$

Эти слагаемые отличаются друг от друга знаком входящей в подынтегральное выражение функции $\sin y$. Для Z_1 выполняется условие $\sin y > 0$, для Z_2 : $\sin y < 0$.

Интегралы, входящие в определение слагаемых Z_1 и Z_2 , могут быть факторизованы с помощью двух аналогичных замен переменных.

Замена переменной для Z_1 : $\tau = \beta \sin y e^x$.

Замена переменной для Z_2 : $\tau = -\beta \sin y e^x$.

После этих замен получим следующие формулы:

$$Z_1 = A_1 B_1 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dy}{(\beta \sin y)^{\lambda \beta}} \int_0^{\infty} d\tau e^{-\tau} \tau^{\beta \lambda - 1}, \quad (15)$$

$$Z_2 = A_2 B_2 = \int_{-\frac{\pi}{2}}^0 \frac{dy}{(-\beta \sin y)^{\lambda \beta}} \int_0^{\infty} d\tau e^{\tau} \tau^{\beta \lambda - 1}. \quad (16)$$

Легко видеть, что интегралы A_1 и A_2 совпадают по величине

$$A_1 = A_2 = A = \frac{1}{\beta^{\lambda \beta}} \int_0^1 \frac{d\phi}{\sqrt{1 - \phi^2} \phi^{\lambda \beta}}. \quad (17)$$

Здесь переменная $\phi = \sin y$ – для интеграла A_1 и $\phi = -\sin y$ – для интеграла A_2 .

Интеграл B_1 из формулы (15) представляет собой интеграл Эйлера. Поэтому он может быть представлен в виде гамма-функции $B_1 = \Gamma(\lambda \beta)$.

Интеграл Эйлера сходится при $\lambda \beta > 0$ и расходится при $\lambda \beta \leq 0$. Поэтому для его сходимости параметр $\lambda \beta$ должен быть больше нуля. С другой стороны, требование сходимости интеграла

A также приводит к дополнительным ограничениям на параметр $\lambda\beta$. Он должен быть меньше единицы. В итоге получаем следующие условия для величины параметра $\lambda\beta$:

$$0 < \lambda\beta < 1. \tag{18}$$

При выполнении этих условий для интегралов A_1 и B_1 (входящих в слагаемое Z_1 статистической суммы \bar{Z}) слагаемое Z_1 сходится. Его вкладом в статистическую сумму \bar{Z} на фоне расходящегося слагаемого Z_2 можно пренебречь. Поэтому далее будет рассматриваться только приводящее к расходимости статистической суммы \bar{Z} расходящееся слагаемое Z_2 .

Как видно из формулы (16), расходимость слагаемого Z_2 вызвана расходимостью интеграла B_2 , который расходится из-за наличия экспоненты e^τ в подынтегральном выражении. Если бы этот интеграл не зависел от обратной температуры β , его расходимость можно было бы компенсировать мультипликативной перенормировкой ($\bar{Z} \rightarrow C\bar{Z}$) статистической суммы \bar{Z} , где C – произвольная константа. Однако, поскольку он зависит от β , необходимо искать другие пути компенсации его расходимости. Единственной оставшейся возможностью компенсации его расходимости является аддитивная перенормировка входящего в формулу (14) гамильтониана ($H \rightarrow H + K$). Такая перенормировка возможна потому, что она не меняет динамики системы. Она приводит к появлению у статистической суммы \bar{Z} множителя $e^{-K\beta}$

$$\bar{Z} = \int dx dy e^{-\beta H} \rightarrow \int dx dy e^{-\beta(H+K)} = e^{-K\beta} \bar{Z} = e^{-K\beta} A B_2. \tag{19}$$

Для того чтобы избежать некорректных операций с бесконечностями, интеграл B_2 из (16) будет регуляризован. Верхний предел интегрирования, равный бесконечности, будет заменен большим параметром R . В пределе при $R \rightarrow \infty$ интеграл $B_2(R)$ будет иметь вид

$$B_2(R) = e^R R^{\lambda\beta-1} (1 + O(\frac{1}{R})). \tag{20}$$

Полный вывод формулы (20) приведен в приложении А.

Формула (20) содержит два расходящихся множителя. Один из них $\frac{e^R}{R}$ не зависит от β .

Поэтому он может быть компенсирован мультипликативной перенормировкой статистической суммы $\bar{Z} \rightarrow C\bar{Z}$, так как такая перенормировка не меняет термодинамических характеристик системы с точностью до сдвига на константу.

Второй множитель $R^{\lambda\beta}$ интеграла B_2 имеет такую же зависимость от обратной температуры β , как и появившийся после перенормировки статистической суммы \bar{Z} дополнительный множитель $e^{-K\beta}$ в формуле (19). Из (19) и (20) видно, что расходящийся множитель $R^{\lambda\beta} = e^{(\lambda \ln R)\beta}$ интеграла B_2 может быть компенсирован дополнительным множителем статистической суммы $e^{-K\beta}$. При этом выражение для статистической суммы будет иметь вид

$$\bar{Z} = A \left(\frac{e^R}{R} C \right) (R^{\lambda\beta} e^{-K\beta}).$$

Здесь в скобках сгруппированы взаимно компенсирующиеся члены. Выражение в первой скобке равно конечной константе C_1 , во второй – единице. Эти условия выполняются, если $C = \frac{C_1 R}{e^R}$ и $K = -\lambda \ln R$. После компенсации расходимости статистическая сумма \bar{Z} исходной модели связанной цепочки Вольтерра может быть представлена в явном и конечном виде с точностью до произвольной конечной константы C_1

$$\bar{Z} = C_1 A(\beta). \tag{21}$$

Константа C_1 может быть определена, если какая-либо термодинамическая величина известна в одной точке β_1 . Пусть, например, в точке β_1 известна энтропия $S(\beta_1) = \ln \bar{Z} - \beta_1 \frac{d \ln \bar{Z}}{d\beta}$. Тогда константа C_1 определяется по следующей формуле:

$$\ln \bar{Z}(\beta_1) - \beta_1 \frac{d}{d\beta} \ln \bar{Z}(\beta_1) = \ln C_1 + \ln A(\beta_1) - \beta_1 \frac{d}{d\beta} \ln A(\beta_1) = S(\beta_1).$$

После проведенных преобразований расходимость статистической суммы \bar{Z} удалось устранить. Статистическая сумма (21) с учетом формулы (17) принимает окончательный вид

$$\bar{Z} = C_1 \frac{1}{\beta^{\lambda\beta}} \int_0^1 \frac{d\phi}{\sqrt{1 - \phi^2} \phi^{\lambda\beta}} = C_1 \frac{1}{\beta^{\lambda\beta}} \frac{1}{1 - \lambda\beta}. \quad (22)$$

В формуле (22) использовано простейшее приближение интеграла в виде $\int_0^1 \frac{d\phi}{\phi^{\lambda\beta}} = \frac{1}{1 - \lambda\beta}$. Таким образом, статистическая сумма модели вычислена в явном и конечном виде, что подтверждает возможность адекватного применения модели.

Заключение

Различные обобщения классической цепочки Вольтерра в последнее десятилетие широко используются в качестве моделей в химии, экологии, биологии, экономике, гидродинамике, астрофизике, физике плазмы. В данной работе одна из таких моделей исследована с помощью методов и подходов статистической механики. Нужно отметить, что такой подход довольно редко применяется. Отметим основные проблемы, выявленные в процессе исследования:

1. В результате исследования обозначены два следующих важных момента. Введение дополнительных переменных в уравнения динамики модели значительно усложняет статистическое описание системы и приводит к расходимости ее статистической суммы. При этом возникает вопрос, возможно ли в этих условиях адекватное статистическое описание модели?

Благодаря удачно подобранной модели для данного конкретного случая статистическая сумма вычислена в явном виде и предложен способ компенсации ее расходимости. Из результатов исследования очевидно, что в данном конкретном случае расходимость не является глубинным свойством рассмотренной системы и может быть устранена соответствующими преобразованиями. Таким образом, можно утверждать, что после устранения расходимости адекватное статистическое описание данной модели возможно.

2. Можно ли использовать результаты данного исследования для анализа и прогнозирования при решении других задач такого же типа?

Возможность положительного ответа зависит от конкретной ситуации. В общем случае использование результатов данной работы возможно в качестве инструментария для предварительной оценки надежности результатов. Но в любом случае нужно обратить дополнительное внимание на результаты данного исследования, чтобы сделать выводы аналогичных исследований более надежными.

3. Модель изученной в данной работе связанной цепочки Вольтерра допускает возможность отрицательных значений зависимых переменных. В применении к экономике это соответствует наличию отрицательных счетов, то есть задолженности или кредитов. Поэтому возможно дальнейшее рассмотрение модели в качестве одного из подходов статистической механики для оценки кредитных рисков и задолженности.

Приложение А

(исследование асимптотики расходящегося интеграла B_2)

Расходящийся интеграл B_2 из формулы (16) имеет вид

$$B_2 = \int_0^{\infty} d\tau e^{\tau} \tau^{\beta\lambda - 1}. \quad (A1)$$

Анализ асимптотики интеграла выполним в три этапа. На первом проведем регуляризацию интеграла, для того чтобы работать с конечными величинами. На втором избавимся от затрудняющей анализ сингулярности, на третьем вычислим поправку, позволяющую дать оценку интеграла.

Приступим к первому этапу – регуляризации интеграла. Заменяем верхний предел интегрирования в формуле A1, равный бесконечности, на большой параметр R : $B_2(R) = \int_0^R e^{\tau} \tau^{\lambda\beta-1} d\tau$.

Исследуем асимптотику интеграла $B_2(R)$ при $R \rightarrow \infty$. Представим интеграл $B_2(R)$ в виде $B_2(R) = e^R R^{\lambda\beta-1} \Lambda(R, \lambda\beta)$. № (A2)

Формула (A2) получается после следующего преобразования интеграла $B_2(R)$:

$$B_2(R) = \int_0^R e^{R-(R-\tau)} (R-(R-\tau))^{\lambda\beta-1} d\tau = e^R R^{\lambda\beta-1} \int_0^R e^{-z} \left(1 - \frac{z}{R}\right)^{\lambda\beta-1} dz. \quad (A3)$$

Здесь проведена замена переменных $z = R - \tau$.

Как видно из формулы (18), величина $\lambda\beta$ лежит в интервале от нуля до единицы, поэтому выражение $\left(1 - \frac{z}{R}\right)^{\lambda\beta-1}$ в формуле (A3) имеет сингулярность в точке R , которая затрудняет дальнейший анализ интеграла Λ из формулы (A2).

Поэтому далее, на втором этапе, для избавления от сингулярности выполним интегрирование по частям. Для этого перепишем величину Λ из формулы (A2) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Lambda &= \int_0^R dz e^{-z} \left(1 - \frac{z}{R}\right)^{\lambda\beta-1} = - \int_0^R e^{-z} R \frac{d\left(1 - \frac{z}{R}\right)^{\lambda\beta}}{\lambda\beta} = - \frac{R}{\lambda\beta} e^{-z} \left(1 - \frac{z}{R}\right)^{\lambda\beta} \Big|_0^R + \\ &+ \frac{R}{\lambda\beta} \int_0^R d\left(e^{-z}\right) \left(1 - \frac{z}{R}\right)^{\lambda\beta} = \frac{R}{\lambda\beta} - \frac{R}{\lambda\beta} \int_0^R dz e^{-z} \left(1 - \frac{z}{R}\right)^{\lambda\beta} = \frac{R}{\lambda\beta} (1 - \Lambda_0). \end{aligned}$$

Здесь интеграл Λ_0 имеет вид

$$\Lambda_0 = \int_0^R dz e^{-z} \left(1 - \frac{z}{R}\right)^{\lambda\beta} = \int_0^R dz e^{-z} \left[\left(1 - \frac{z}{R}\right)^{\lambda\beta} \right]^R.$$

Выражение $\left(1 - \frac{z}{R}\right)^R$, входящее в интеграл Λ_0 , преобразуем с использованием известной формулы для экспоненты $e^x = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{x}{N}\right)^N$.

$$\text{Получим } \left[\left(1 - \frac{z}{R}\right)^R \right]^R = e^{-\lambda\beta \frac{z}{R}} + \Delta\left(\frac{z}{R}\right).$$

Здесь

$$\Delta\left(\frac{z}{R}\right) = \left(1 - \frac{z}{R}\right)^{\lambda\beta} - e^{-\lambda\beta \frac{z}{R}}. \quad (A4)$$

Интеграл Λ_0 примет вид

$$\Lambda_0 = \int_0^R dz e^{-z} e^{-\lambda\beta \frac{z}{R}} + \int_0^R dz e^{-z} \Delta\left(\frac{z}{R}\right) = \Lambda_{01} + \Lambda_{02}. \quad (A5)$$

Интеграл Λ_{01} легко вычисляется

$$\Lambda_{01} = \int_0^R dz e^{-z} e^{-\left(1 + \frac{\lambda\beta}{R}\right)z} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda\beta}{R}}.$$

Интеграл Λ_{02} может быть представлен в виде

$$\Lambda_{02} = R \int_0^1 dx e^{-Rx} \Delta(x). \quad (A6)$$

Как видно из формулы (A6), аналитическое выражение для интеграла Λ_{02} получить затруднительно.

Поэтому на третьем этапе анализа получим оценку порядка его величины, для определения которого используем следующие формулы: $\Delta(0) = \Delta'(0) = 0$; $\Delta''(0) = -\lambda\beta$; $\Delta'''(0) = 3(\lambda\beta)^2 - 2\lambda\beta$.

Представим далее функцию $\Delta(x)$ из формулы (A4) в виде ряда Тейлора (здесь введена переменная $x = \frac{z}{R}$)

$$\Delta(x) = -\frac{\lambda\beta}{2}x^2 + \frac{[3(\lambda\beta)^2 - 2\lambda\beta]}{6}x^3 + \dots = -x^2\left[\frac{\lambda\beta}{2} - \frac{[3(\lambda\beta)^2 - 2\lambda\beta]}{6}x + \dots\right] = -x^2q(x). \quad (A7)$$

Из формулы (A7) видно, что функция $\Delta(x)$ удовлетворяет неравенству

$$0 \geq \Delta(x) \geq -x^2M. \quad (A8)$$

Здесь константа M определяется следующим образом:

$$M = \sup_{x \in [0,1]} -\frac{\Delta(x)}{x^2}.$$

Из неравенства (A8) следует оценка порядка величины интеграла Λ_{02}

$$0 > \Lambda_{02} > -R \int_0^1 e^{-Rx} x^2 M = -\frac{M}{R^2} + O\left(\frac{1}{R^3}\right). \quad (A9)$$

Теперь с использованием формул (A5) и (A9) можно получить окончательное выражение для интеграла Λ

$$\Lambda = \frac{R}{\lambda\beta} (1 - \Lambda_{02}) = \frac{R}{\lambda\beta} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{\lambda\beta}{R}} - \Lambda_{02}\right) = 1 + O\left(\frac{1}{R}\right). \quad (A10)$$

Из формул (A10) и (A2) следует окончательное выражение для интеграла $B_2(R)$:

$$B_2(R) = e^R R^{\lambda\beta-1} \left(1 + O\left(\frac{1}{R}\right)\right). \quad (A11)$$

Таким образом, получена асимптотика интеграла $B_2(R)$, стремящегося к бесконечности.

Формула (A11) использована в разделе 3 в виде формулы (20) при исследовании расходимости статистической суммы \bar{Z} исходной модели связанной цепочки Вольтерра.

Список источников

1. Yakovenko V.M., Barkley R.J. Jr. Colloquium: Statistical mechanics of money, wealth, and income // Rev. Mod. Phys. 2009. Vol. 81, № 4. P. 1703. Doi: 10.1103/RevModPhys.81.1703.
2. Etebong C.P., Uko J.S. Statistical mechanics in economics: An application of Brownian motion in modeling prices of assets // International J. of Statistics and Applied Mathematics. 2021. Vol. 6, № 1. Part A. P. 29–34.
3. Chakraborti A., Chakraborti B.K. Statistical mechanics of money: How saving propensity affects its distribution // Eur. Phys. J. B. 2000. Vol. 17. P. 167–170. Doi: 10.1007/s100510070173.
4. Kerner E.H. A statistical mechanics of interacting biological species // The Bulletin of Mathematical Biophysics. 1957. Vol. 19. P. 121–146. Doi: 10.1007/BF02477883.
5. Kerner E.H. Further considerations on the statistical mechanics of biological associations // The Bulletin of Mathematical Biophysics. 1959. Vol. 21. P. 217–255. Doi: 10.1007/BF02476361.
6. Kerner E.H. Gibbs Ensemble, Biological Ensemble. New York: Gordon and Breach, 1972. P. 167.
7. Kerner E.H. Comment on Hamiltonian structures for the n-dimensional Lotka-Volterra equations // J. Math. Phys. 1997. Vol. 38. P. 1218–1223. Doi: 10.1063/1.531875.
8. Rodriguez R.A., Herrera A.M., Otto R., Delgado J.D., Fernandez-Palacios J.M., Arevalo J.R. Ecological state equation // Ecological Modeling. 2012. Vol. 224, № 1. P. 18–24. Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2011.10.020.
9. Rodriguez R.A., Riera R., Herrera A.M., Duncan J.M., Vann M.J., Delgado J.D., Gonzales M.J. Degrees of freedom: Definitions and their minimum and most meaningful combination for the modelling of ecosystem dynamics with the help of physical principles // Ecological Modeling. 2019. Vol. 392. P. 226–235. Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2018.11.021.

10. Dewar R.C., Porte A. Statistical mechanics unifies different ecological patterns // J. Theor. Biol. 2008. Vol. 251, № 3. P. 389–403. Doi: 10.1016/j.jtbi.2007.12.007.
11. Fort H. Statistical mechanics ideas and techniques applied to selected problems in ecology // Entropy. 2013. Vol. 15, № 12. P. 5237–5276. Doi: 10.3390/e15125237.
12. Isaev A.S., Soukhovolsky V.G., Buzikin A.I., Ovchinnikova T.M. Succession in forest communities: the phase transitions // Theoretical and Applied Research J. Conifers of the Boreal Area. 2008. Vol. XXV, № 1–2. P. 9–15.
13. Durlauf S.N. How can statistical mechanics contribute to social science? // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1999. Vol. 96, № 19. P. 10582–10585.
14. Fortunato S., Macy M., Redner S. Editorial: Statistical mechanics and social sciences // J. Stat. Phys. 2013. Vol. 151. P. 1–8. Doi: 10.1007/s10955-013-0703-2.
15. Aratyn H., Ferreira L.A., Gomes J.F., Zimmerman A.H. Toda and Volterra Lattice equations from discrete symmetries of KP hierarchies // Phys. Lett. B. 1993. Vol. 316, № 1. P. 85–92. Doi: 10.1016/0370-2693(93)90662-2.
16. Rolania D.B., Heredero R.H. On the relation between the complex Toda and Volterra lattices // arXiv:nlin/0610010v1 [nlin.SI]. 2006. P. 7.
17. Svinin A.K. Reductions of the Volterra and Toda chains // Theor. Math. Phys. 2000. Vol. 124. P. 1211–1216. Doi: 10.1007/BF02550999.
18. Damianou P.A., Fernandes R.L. From the Toda lattice to the Volterra lattice and back // Rep. Math. Phys. 2002. Vol. 50, № 3. P. 361–378. Doi: 10.1016/S0034-4877(02)80066-0.
19. Bogoyavlenskii O.I. Algebraic constructions of integrable dynamical systems—extensions of the Volterra system // Russ. Math. Surv. 1991. Vol. 46, № 3. P. 1–64. Doi: 10.1070/RM1991v046n03ABEH002801.
20. Toda M. Theory of Nonlinear Lattices. Part of the Springer Series in Solid-State Sciences book series (SSSOL, volume 20). Berlin: Springer-Verlag, 1989. P. 225. Doi: 10.1007/978-3-642-83219-2.
21. Wadati M. Transformation theories for nonlinear discrete systems // Prog. Theor. Phys. Supp. 1976. Vol. 59. P. 36–63. Doi: 10.1143/PTPS.59.36.
22. Zhao Hai-qiong, Zhu Zuo-nong. Multi-soliton, multi-positon, multi-negaton, and multi-periodic solutions of the coupled Volterra lattice equation // arXiv:0911.3458v1 [nlin.SI]. 2009. P. 17.
23. Sahadevan R., Balakrishnan S. Similarity reduction, generalized symmetries, recursion operator, and integrability of coupled Volterra system // J. Math. Phys. 2008. Vol. 49. P. 113510. Doi: 10.1063/1.3020695.
24. Lou S.Y., Tong B., Jia M., Li J. A coupled Volterra system and its exact solutions // arXiv:0711.0420v1 [nlin.SI]. 2007. P. 22.
25. Abdelrahman Mahmoud A. E., Almatrafi M. B., Alharbi A. Fundamental solutions for the coupled KdV system and its stability // Symmetry. 2020. Vol. 12, № 3. P. 429. Doi: 10.3390/sym12030429.
26. Yang Xin, Zhang Bing-Yu. Local well-posedness of the coupled KdV-KdV systems on the whole line R // arXiv:1812.08261v2 [math.AP]. 2020. P. 52.
27. Jibrán M., Nawaz R., Khan A., Afzal S. Iterative solutions of Hirota Satsuma coupled KDV and modified coupled KDV systems // Math. Prob. Eng. Vol. 2018. Article ID 9042039. P. 18. Doi: 10.1155/2018/9042039.
28. Bibik Yu.V., Popov S.P. Soliton solutions of a generalization of the coupled Volterra system // Comput. Math. and Math. Phys. 2019. Vol. 59. P. 1806–1815. Doi: 10.1134/S0965542519110034.
29. Yu F., Li L., Feng S. Some novel soliton solution, breather solution and Darboux transformation for a generalized coupled Toda soliton hierarchy // Sci. Rep. 2018. Vol. 8. P.15281. Doi: 10.1038/s41598-018-33212-5.
30. Feynman R.P. A relativistic cut-off for classical electrodynamics // Phys. Rev. 1948. Vol. 74. P. 939. Doi: 10.1103/PhysRev.74.939.
31. Feynman R.P. Relativistic cut-off for quantum electrodynamics // Phys. Rev. 1948. Vol. 74. P. 1430. Doi: 10.1103/PhysRev.74.1430.
32. Schwinger J. On quantum-electrodynamics and the magnetic moment of the electron // Phys. Rev. 1948. Vol. 73. P. 416. Doi: 10.1103/PhysRev.73.416.
33. Schwinger J. On radiative corrections to electron scattering // Phys. Rev. 1949. Vol. 75. P. 898. Doi: 10.1103/PhysRev.75.898.
34. Tomonaga Sin-Itiro, Oppenheimer J.R. On infinite field reactions in quantum field theory // Phys. Rev. 1948. Vol. 74. P. 224. Doi: 10.1103/PhysRev.74.224.
35. Dyson F.J. The radiation theories of Tomonaga, Schwinger, and Feynman // Phys. Rev. 1949. Vol. 75. P. 486. Doi: 10.1103/PhysRev.75.486.
36. Rocca M.C., Plastino A., Ferri G.L. Dimensional regularization in non-extensive statistical mechanics // arXiv:1404.0418v1 [cond-mat.stat-mech]. 2014. P. 18.

References

1. Yakovenko V.M., Barkley R.J. Jr. Colloquium: Statistical mechanics of money, wealth, and income. *Rev. Mod. Phys.* 2009;81(4):1703. Doi: 10.1103/RevModPhys.81.1703.

2. Etebong C.P., Uko J.S. Statistical mechanics in economics: An application of Brownian motion in modeling prices of assets. *International J. of Statistics and Applied Mathematics*. 2021;6(1A):29-34.
3. Chakraborti A., Chakrabarti B.K. Statistical mechanics of money: How saving propensity affects its distribution. *Eur. Phys. J. B*. 2000;17:167-170. Doi: 10.1007/s100510070173.
4. Kerner E.H. A statistical mechanics of interacting biological species. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*. 1957;19:121-146. Doi: 10.1007/BF02477883.
5. Kerner E.H. Further considerations on the statistical mechanics of biological associations. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*. 1959;21:217-255. Doi: 10.1007/BF02476361.
6. Kerner E.H. *Gibbs Ensemble, Biological Ensemble*. New York: Gordon and Breach Publ.; 1972. P. 167.
7. Kerner E.H. Comment on Hamiltonian structures for the n-dimensional Lotka-Volterra equations. *J. Math. Phys.* 1997;38:1218-1223. Doi: 10.1063/1.531875.
8. Rodriguez R.A., Herrera A.M., Otto R., Delgado J.D., Fernandez-Palacios J.M., Arevalo J.R. Ecological state equation. *Ecological Modeling*. 2012;224(1):18-24. Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2011.10.020.
9. Rodriguez R.A., Riera R., Herrera A.M., Duncan J.M., Vann M.J., Delgado J.D., Gonzales M.J. Degrees of freedom: Definitions and their minimum and most meaningful combination for the modelling of ecosystem dynamics with the help of physical principles. *Ecological Modeling*. 2019;392:226-235. Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2018.11.021.
10. Dewar R.C., Porte A. Statistical mechanics unifies different ecological patterns. *J. Theor. Biol.* 2008;251(3):389-403. Doi: 10.1016/j.jtbi.2007.12.007.
11. Fort H. Statistical mechanics ideas and techniques applied to selected problems in ecology. *Entropy*. 2013;15(12):5237-5276. Doi: 10.3390/e15125237.
12. Isaev A.S., Soukhovolsky V.G., Buzikin A.I., Ovchinnikova T.M. Succession in forest communities: the phase transitions. *Theoretical and Applied Research J. Conifers of the Boreal Area*. 2008;XXV(1-2):9-15.
13. Durlauf S.N. How can statistical mechanics contribute to social science? *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1999;96(19):10582-10585.
14. Fortunato S., Macy M., Redner S. Editorial: Statistical mechanics and social sciences. *J. Stat. Phys.* 2013;151:1-8. Doi: 10.1007/s10955-013-0703-2.
15. Aratyn H., Ferreira L.A., Gomes J.F., Zimmerman A.H. Toda and Volterra Lattice equations from discrete symmetries of KP hierarchies. *Phys. Lett. B*. 1993;316(1):85-92. Doi: 10.1016/0370-2693(93)90662-2.
16. Rolania D.B., Heredero R.H. On the relation between the complex Toda and Volterra lattices. *arXiv:nlin/0610010v1 [nlin.SI]*. 2006. P. 7.
17. Svinin A.K. Reductions of the Volterra and Toda chains. *Theor. Math. Phys.* 2000;124:1211-1216. Doi: 10.1007/BF02550999.
18. Damianou P.A., Fernandes R.L. From the Toda lattice to the Volterra lattice and back. *Rep. Math. Phys.* 2002;50(3):361-378. Doi: 10.1016/S0034-4877(02)80066-0.
19. Bogoyavlenskii O.I. Algebraic constructions of integrable dynamical systems-extensions of the Volterra system. *Russ. Math. Surv.* 1991;46(3):1-64. Doi: 10.1070/RM1991v046n03ABEH002801.
20. Toda M. *Theory of Nonlinear Lattices. Part of the Springer Series in Solid-State Sciences book series (SSSOL, volume 20)*. Berlin: Springer-Verlag Publ.; 1989. P. 225. Doi: 10.1007/978-3-642-83219-2.
21. Wadati M. Transformation theories for nonlinear discrete systems. *Prog. Theor. Phys. Supp.* 1976;59:36-63. Doi: 10.1143/PTPS.59.36.
22. Zhao Hai-qiong, Zhu Zuo-nong. Multi-soliton, multi-positon, multi-negaton, and multi-periodic solutions of the coupled Volterra lattice equation. *arXiv:0911.3458v1 [nlin.SI]*. 2009. P. 17.
23. Sahadevan R., Balakrishnan S. Similarity reduction, generalized symmetries, recursion operator, and integrability of coupled Volterra system. *J. Math. Phys.* 2008;49:113510. Doi: 10.1063/1.3020695.
24. Lou S.Y., Tong B., Jia M., Li J. A coupled Volterra system and its exact solutions. *arXiv:0711.0420v1 [nlin.SI]*. 2007. P. 22.
25. Abdelrahman Mahmoud A. E., Almatrafi M. B., Alharbi A. Fundamental solutions for the coupled KdV system and its stability. *Symmetry*. 2020;12(3):429. Doi: 10.3390/sym12030429.
26. Yang Xin, Zhang Bing-Yu. Local well-posedness of the coupled KdV-KdV systems on the whole line R. *arXiv:1812.08261v2 [math.AP]*. 2020. P. 52.
27. Jibrán M., Nawaz R., Khan A., Afzal S. Iterative solutions of Hirota Satsuma coupled KDV and modified coupled KDV systems. *Math. Prob. Eng.* 2018;2018:18. Article ID 9042039. Doi: 10.1155/2018/9042039.
28. Bibik Yu.V., Popov S.P. Soliton solutions of a generalization of the coupled Volterra system. *Comput. Math. and Math. Phys.* 2019;59:1806-1815. Doi: 10.1134/S0965542519110034.
29. Yu F., Li L., Feng S. Some novel soliton solution, breather solution and Darboux transformation for a generalized coupled Toda soliton hierarchy. *Sci. Rep.* 2018;8:15281. Doi: 10.1038/s41598-018-33212-5.
30. Feynman R.P. A relativistic cut-off for classical electrodynamics. *Phys. Rev.* 1948;74:939. Doi: 10.1103/PhysRev.74.939.

31. Feynman R.P. Relativistic cut-off for quantum electrodynamics. *Phys. Rev.* 1948;74:1430. Doi: 10.1103/PhysRev.74.1430.
32. Schwinger J. On quantum-electrodynamics and the magnetic moment of the electron. *Phys. Rev.* 1948;73:416. Doi: 10.1103/PhysRev.73.416.
33. Schwinger J. On radiative corrections to electron scattering. *Phys. Rev.* 1949;75:898. Doi: 10.1103/PhysRev.75.898.
34. Tomonaga Sin-Itiro, Oppenheimer J.R. On infinite field reactions in quantum field theory. *Phys. Rev.* 1948;74:224. Doi: 10.1103/PhysRev.74.224.
35. Dyson F.J. The radiation theories of Tomonaga, Schwinger, and Feynman. *Phys. Rev.* 1949;75:486. Doi: 10.1103/PhysRev.75.486.
36. Rocca M.C., Plastino A., Ferri G.L. Dimensional regularization in non-extensive statistical mechanics. *arXiv:1404.0418v1 [cond-mat.stat-mech]*. 2014. P. 18.

Информация об авторе

Ю.В. Бибик – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела № 23 (механика сплошных сред) Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва, Россия.

Information about the author

Yu. V. Bibik - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Researcher of Department № 23 (Continuum Mechanics) of the Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Статья поступила в редакцию 15.06.2022; одобрена после рецензирования 26.06.2022; принята к публикации 30.08.2022.
The article was submitted 15.06.2022; approved after reviewing 26.06.2022; accepted for publication 30.08.2022.

Научная статья

УДК 517.763

doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-23-28

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ГЕОМЕТРИИ ЛОКАЛЬНО КОНФОРМНО-КЕЛЕРОВЫХ МНОГООБРАЗИЙ

Алигаджи Рабаданович Рустанов¹, Елена Александровна Полькина²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

² Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

¹ aligadzhi@yandex.ru

² Polkina.ea@mail.ru

Аннотация. Торсообразующие векторные поля, а также их частные случаи (конциркулярные, специоциркулярные и рекуррентные) используются во многих областях дифференциальной геометрии, например в конформных, геодезических, почти геодезических, голоморфно проективных и других отображениях и преобразованиях. Наличие торсообразующих векторных полей на рассматриваемом пространстве делает геометрию этого пространства более содержательной. Представляет интерес изучение геометрии пространств, допускающих рекуррентные векторные поля. В работе рассматриваются локально конформно-келеровы многообразия, вектор Ли которых рекуррентен. Такие многообразия называют рекуррентными локально конформно-келеровыми многообразиями. В представленной работе вычислены в явном виде форма Ли и вектор Ли. Доказано, что вектор Ли локально конформно-келерова многообразия постоянной кривизны является конциркулярным полем. Получен критерий рекуррентности конформно плоского локально конформно-келерова многообразия. Доказаны некоторые свойства конформно плоских локально конформно-келеровых многообразий. Доказано, что компактное многообразие постоянной кривизны не допускает собственной рекуррентной локально конформно-келеровой структуры.

Ключевые слова: локально конформно-келерова многообразия, форма Ли, конформное преобразование структуры, рекуррентное локально конформно-келерова многообразия

Для цитирования: Рустанов А.Р., Полькина Е.А. Некоторые вопросы геометрии локально конформно-келеровых многообразий // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 3. С. 23–28.

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

Original article

SOME QUESTIONS OF GEOMETRY OF LOCALLY CONFORMAL KÄHLER MANIFOLDS

Aligadzhi R. Rustanov¹, Elena A. Polkina²

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

² Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russia

¹ aligadzhi@yandex.ru

² Polkina.ea@mail.ru

Abstract. Torso-forming vector fields, as well as their special cases (concircular, special concircular and recurrent) are used in many areas of differential geometry, for example, in conformal, geodesic, almost geodesic,

holomorphically projective and other mappings and transformations. The presence of torso-forming vector fields on the space under consideration makes the geometry of this space more meaningful. It is of interest to study the geometry of spaces that admit recurrent vector fields. In this paper, the authors consider locally conformally Kahler manifolds with a recurrent Lie vector. Such manifolds are called recurrent locally conformally Kahler manifolds. The Lie form and the Lie vector are calculated explicitly. It is proved that the Lie vector of a locally conformally Kahler manifold of constant curvature is a concircular field. A recurrence criterion for a conformally flat locally conformally Kahler manifold is obtained. Some properties of conformally flat locally conformally Kahler manifolds are proved. It is proved that a compact manifold of constant curvature does not admit its own recurrent locally conformal Kahler structure.

Keywords: locally conformal Kahler manifold, Lee form, conformal structure transformation, recurrent locally conformal Kahler manifolds.

For citation: Rustanov A.R., Polkina E.A. Some Questions of Geometry of Locally Conformal Kahler Manifolds. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(3):23-28. (In Russ.).

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

Среди различных видов почти эрмитовых многообразий эрмитовы многообразия постоянной голоморфной секционной кривизны часто привлекают внимание исследователей. Это прежде всего объясняется важнейшей ролью, которую играют в дифференциальной геометрии келеровы многообразия постоянной голоморфной секционной кривизны (иначе называемые пространственными формами). Изучение этого класса многообразий тем более естественно и интересно в случае, когда они наделены локально конформно-келеровой (ЛКК) структурой.

ЛКК-многообразия впервые появились в работе П. Либермана [1] в 1955 г., затем долгое время не являлись объектом последовательных геометрических исследований. И только в конце 70-х гг. И. Вайсман обнаружил, что классическое многообразие Хопфа несет внутренним образом определенную ЛКК-структуру, и принялся за систематическое изучение ЛКК-многообразий. Благодаря усилиям Вайсмана теория ЛКК-многообразий ныне занимает достойное место в потоке геометрических исследований [2–7].

Хорошо известны два примера собственных (т.е. некелеровых) ЛКК-многообразий. Это классическое многообразие Хопфа и ЛКК-многообразие, построенное А. Греем и Л. Ванхекке на базе пространства постоянной кривизны [8].

В настоящей работе вводятся в рассмотрение рекуррентные ЛКК-многообразия.

Пусть M – риманово многообразие; $\mathcal{X}(M) = C^\infty(M)$ – модуль гладких векторных полей на M ; $\mathcal{X}^*(M)$ – дуальный модуль дифференциальных 1-форм на M ; d – оператор внешнего дифференцирования; $g = \langle \cdot, \cdot \rangle$ – риманова метрика на M ; ∇ – оператор ковариантного дифференцирования в римановой связности [9]. Все многообразия, тензорные поля и т.п. объекты предполагаются гладкими класса C^∞ .

Определение 1 [9]. Почти эрмитовой (короче, AH -) структурой на многообразии M называется пара (J, g) , где J – почти комплексная структура на M ; $g = \langle \cdot, \cdot \rangle$ – (псевдо) риманова метрика на M . При этом $\langle JX, JY \rangle = \langle X, Y \rangle$; $X, Y \in \mathcal{X}(M)$.

Эндоморфизм $J^2 = -id$ называется структурным эндоморфизмом. Многообразие, на котором фиксирована почти эрмитова структура, называется почти эрмитовым (короче, AH -) многообразием.

Пусть $S = \{g, J\}$ – $2n$ -мерная AH -структура на M .

Определение 2 [9]. Почти эрмитова структура (J, g) называется эрмитовой структурой, если почти комплексная структура J интегрируема. Эрмитова структура называется келеровой структурой, если ее фундаментальная форма $\Omega(X, Y) = \langle X, JY \rangle$ замкнута.

Хорошо известно [4], что почти эрмитова структура является келеровой тогда и только тогда, когда $\nabla J = 0$.

Определение 3. Эрмитова структура, заданная на многообразии M , называется ЛКК-структурой, если существуют открытое покрытие $\mathcal{U} = \{U_\alpha\}_{\alpha \in A}$ многообразия M и система $\Sigma = \{\sigma_\alpha: U_\alpha \rightarrow \mathbf{R}\}_{\alpha \in A}$ гладких функций таких, что $\{J|_{U_\alpha}, \tilde{g}_\alpha = e^{2\sigma_\alpha} g|_{U_\alpha}\}$ – келерова структура

для любого $\alpha \in A$. Гладкое многообразие, на котором фиксирована ЛКК-структура, называется ЛКК-многообразием. Переход от метрики $g|_{U_\alpha}$ к метрике $\tilde{g}_\alpha = e^{2\sigma_\alpha} g|_{U_\alpha}$ называется локально конформным преобразованием структуры. Функция σ называется определяющей функцией конформного преобразования.

Теорема 1 [4]. На всяком ЛКК-многообразии внутренним образом определена дифференциальная 1-форма ω , такая, что $\omega|_U = -2d\sigma$, где σ – определяющая функция соответствующего локально конформного преобразования.

Доказательство. Пусть U_1 и U_2 – две пересекающиеся окрестности, допускающие локально конформные преобразования в келерову структуру, с определяющими функциями σ_1 и σ_2 соответственно. Очевидно, фундаментальные формы преобразованных структур имеют вид

$$\tilde{\Omega}_1 = e^{2\sigma_1}\Omega; \tilde{\Omega}_2 = e^{2\sigma_2}\Omega, \quad (1)$$

где Ω – фундаментальная форма исходной структуры. Поскольку преобразованные структуры – келеровы, $d\tilde{\Omega}_i = 0, i = 1, 2$. Дифференцируя внешним образом соотношения (1), с учетом последних равенств получим, что на $U_1 \cap U_2$ справедливо тождество

$$d\Omega = -2d\sigma_i \wedge \Omega; \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

Обозначим $\tau = \sigma_1 - \sigma_2$. Тогда с учетом (2) получаем, что $d\tau \wedge \Omega = 0$. Запишем это тождество на пространстве присоединенной G -структуры [7], учитывая, что на этом пространстве

$$\pi^*\Omega = -2\sqrt{-1}\omega^a \wedge \omega_a,$$

где π – естественная проекция пространства присоединенной G -структуры на базу (т.е. на многообразии M); $\omega^a, \omega_a = \omega^{a+n}$ – компоненты формы смещения; $a, b, c = 1, \dots, n$. Положив $d\tau = \tau_i \omega^i$, перепишем соотношение $d\tau \wedge \Omega = 0$ в развернутом виде

$$\tau_{[a}\delta_{b]}^c \omega^a \wedge \omega^b \wedge \omega_c + \tau^{[a}\delta_c^{b]} \omega_a \wedge \omega_b \wedge \omega^c = 0.$$

Отсюда в силу линейной независимости базисных форм получаем $\tau_{[a}\delta_{b]}^c = 0; \tau^{[a}\delta_c^{b]} = 0$.

Рассмотрим соотношение $\tau_{[a}\delta_{b]}^c = 0$, т.е. $\tau_a \delta_b^c - \tau_b \delta_a^c = 0$. Свернем его по индексам a и b , тогда $\tau_a(n-1) = 0$, т.е. с учетом того, что $\dim M > 2$, $\tau_a = 0$. Аналогично $\tau^a = 0$.

Таким образом, $\tau_i = 0$, т.е. $d\tau = 0, d\tau = d(\sigma_1 - \sigma_2) = d\sigma_1 - d\sigma_2 = 0$, а значит,

$$d\sigma_1|_{U_1 \cap U_2} = d\sigma_2|_{U_1 \cap U_2}.$$

Ясно, что это соотношение корректно определяет глобальную дифференциальную 1-форму ω , такую, что $\forall \alpha \in A \Rightarrow \omega|_{U_\alpha} = -2d\sigma_\alpha$. При этом (2) принимает вид $d\Omega = \omega \wedge \Omega$.

Более того, будучи локально точной, форма ω замкнута.

Определение 4 [10]. Ненулевое векторное поле $\xi \in \mathcal{X}(M)$ называется торсообразующим, если $\nabla \xi = \rho id + a \otimes \xi$ (3)

для некоторых $\rho \in C^\infty(M)$ и $a \in \mathcal{X}^*(M)$. Дифференциальная 1-форма a и функция ρ называются характеристическими [11]. Торсообразующее векторное поле называется конциркулярным, если $da = 0$, спецконциркулярным, если $a = 0$, и рекуррентным, если $\rho = 0$.

Определение 5 [7]. Замкнутая дифференциальная 1-форма ω на многообразии M называется формой Ли. Векторное поле ξ , дуальное форме Ли, называется вектором Ли. ЛКК-многообразии, вектор Ли которого рекуррентен, назовем рекуррентным ЛКК-многообразием.

Вычислим форму Ли и вектор Ли в явном виде. Пусть $S = (J, g = \langle \cdot, \cdot \rangle)$ – ЛКК-структура на многообразии M ; (J, \tilde{g}) – соответствующая келерова структура, локально определенная на этом многообразии; ∇ и $\tilde{\nabla}$ – римановы связности метрик g и \tilde{g} соответственно. Хорошо известно [4], что тензор T аффинной деформации от связности ∇ к связности $\tilde{\nabla}$ имеет вид

$$T(X, Y) = \psi(X)Y + \psi(Y)X - \langle X, Y \rangle \zeta,$$

где $\psi|_U = d\sigma; \zeta$ – вектор, дуальный ковектору ψ . С учетом этого, прежде всего, $\tilde{\nabla}_X(J)Y = \tilde{\nabla}_X(JY) - J(\tilde{\nabla}_X Y) = \nabla_X(JY) + T(X, JY) - J(\nabla_X Y) + T(X, Y) = \nabla_X(J)Y + T(X, JY) - J(T(X, Y)) = \nabla_X(J)Y - \Omega(X, Y)\zeta + \langle X, Y \rangle J(\zeta) - \psi(Y)J(X) + \psi(JY)X$.

Учитывая, что эндоморфизм J параллелен в связности $\tilde{\nabla}$ ввиду келеровости преобразованной структуры, имеем $\nabla_X(J)Y = \Omega(X, Y)\zeta - \langle X, Y \rangle J(\zeta) + \psi(Y)J(X) - \psi(JY)X$.

Свернем это тождество по аргументам X и Y :

$$g^{ij} \nabla_{e_i}(J)e_j = g^{ij} (\Omega(e_i, e_j)\zeta - \langle e_i, e_j \rangle J(\zeta) + \psi(e_j)J(e_i) - \psi(Je_j)e_i),$$

где $\{e_1, \dots, e_{2n}\}$ – произвольный базис касательного пространства $T_p(M)$ в произвольной точке $p \in M$. Имеем:

- 1) $g^{ij} \nabla_{e_i}(J)e_j = (\delta\Omega)^\#$ по определению;
- 2) $g^{ij} \Omega(e_i, e_j) \zeta = 0$;
- 3) $g^{ij} \langle e_i, e_j \rangle J(\zeta) = g^{ij} g_{ij} J(\zeta) = 2nJ(\zeta)$;
- 4) $g^{ij} \psi(e_j) J(e_i) = \zeta^i J(e_i) = J(\zeta^i e_i) = J(\zeta)$;
- 5) $g^{ij} \psi(Je_j) e_i = g^{ij} (\psi \circ J)_j e_i = (\psi \circ J)^\#$,

где $\#$ – оператор дуальности [9]; $\langle \alpha^\#, X \rangle = \alpha(X)$; $X \in \mathcal{X}(M)$, $\alpha \in \mathcal{X}^\#(M)$.

Лемма 1. В принятых обозначениях $(\psi \circ J)^\# = -J(\zeta)$.

Доказательство. С одной стороны, $\langle (\psi \circ J)^\#, X \rangle = (\psi \circ J)(X)$.

С другой – $\langle J\zeta, X \rangle = -\langle \zeta, JX \rangle = -\langle \psi^\#, JX \rangle = -\psi(JX) = -(\psi \circ J)(X)$.

Сравнивая левые части этих равенств, с учетом невырожденности метрики получим утверждение леммы.

Далее из соотношений (3) с учетом леммы 1 находим, что $(\delta\Omega)^\# = 2(n-1)J\zeta$, откуда:

- 1) $\zeta = -\frac{1}{2(n-1)}(\delta\Omega \circ J)^\#$;
- 2) $\psi = -\frac{1}{2(n-1)}\delta\Omega \circ J$.

Согласно теореме 1, $\omega|_U = -2d\sigma$. Кроме того, мы приняли, что $\psi|_U = d\sigma$. С учетом этих обстоятельств получаем окончательно:

- 1) $\xi = \frac{1}{n-1}(\delta\Omega \circ J)^\#$;
- 2) $\omega = \frac{1}{n-1}\delta\Omega \circ J$.

Пусть M – конформно плоское $2n$ -мерное ЛКК-многообразие. Примером такого многообразия служит пространство постоянной кривизны, снабженное ЛКК-структурой Грея – Ванхекке [3]. Пусть Ω – фундаментальная форма структуры; δ – оператор кодифференцирования.

Теорема 2 [7]. Конформно плоское ЛКК-многообразие является ЛКК-многообразием постоянной кривизны тогда и только тогда, когда

$$\nabla \xi = -\frac{1}{2} \omega \otimes \xi + \frac{1}{4n} \{ \|\xi\|^2 + 2 \operatorname{div}(\xi) \} id. \quad (4)$$

Соотношение (4) показывает, что вектор Ли ЛКК-многообразия постоянной кривизны является торсообразующим векторным полем с характеристическими элементами $a = -\frac{1}{2}\omega$ и $\rho = \frac{1}{4n} \{ \|\xi\|^2 + 2 \operatorname{div}(\xi) \}$. Более того, поскольку форма Ли ω замкнута, характеристическая форма a также замкнута, а значит, справедлива

Теорема 3. Вектор Ли ЛКК-многообразия постоянной кривизны является конциркулярным векторным полем.

Далее, поскольку форма Ли дуальна вектору Ли, соотношение (4) можно записать в дуальной форме

$$\nabla_X(\omega)Y = -\frac{1}{2} \omega(X)\omega(Y) + \frac{1}{4n} \{ \|\omega\|^2 + 2\delta(\omega) \} \langle X, Y \rangle,$$

или, короче,

$$\nabla \omega = -\frac{1}{2} \omega \otimes \omega + \frac{1}{4n} \{ \|\omega\|^2 + 2\delta(\omega) \} g. \quad (5)$$

Теорема 4. Пусть M – конформно плоское ЛКК-многообразие. Тогда справедливы следующие импликации: 1) $\nabla \omega = -\frac{1}{2} \omega \otimes \omega \Rightarrow$ 2) $\delta \omega = -\frac{1}{2} \|\omega\|^2 \Rightarrow$ 3) M – многообразие постоянной кривизны. Если M рекуррентно, то справедливы и обратные импликации.

Доказательство. Соотношение 2 вытекает из соотношения 1 путем свертки. Из этих двух соотношений вытекает (5), а значит, и (4), равносильное постоянству кривизны многообразия. Обратно, если M – рекуррентное многообразие постоянной кривизны, то для него в силу теоремы 4 выполнены соотношения 1 и 2.

Теорема 5. Компактное многообразие M постоянной кривизны не допускает собственной рекуррентной ЛКК-структуры.

Доказательство. Рассмотрим интеграл $\int_M \operatorname{div} \xi \, dv$. С одной стороны, по теореме Грина он равен нулю. С другой – согласно теореме 4, выполняется соотношение $\int_M \operatorname{div} \xi \, dv = -\frac{1}{2} \int_M \|\xi\|^2 \, dv$.

В силу непрерывности и знакопостоянства подынтегральной функции второго интеграла эта функция тождественно равна нулю, т.е. $\|\xi\|^2 = 0$, а значит, $\xi = 0$ и $\omega = 0$.

Основные результаты данной работы сформулированы в теоремах 4, 5. Кроме этого, доказано, что вектор Ли ЛКК-многообразия постоянной кривизны является конциркулярным векторным полем [10].

Список источников

1. Libermann P. Sur les structures presque complexes et autres structures infinitesimales regulieres // Bull. Soc. Math. France. 1955. Vol. 83. P. 195–224.
2. Vaisman I. On locally and globally conformal Kahler manifolds // Trans. Amer. Math. Soc. 1980. Vol. 262. P. 533–541.
3. Кириченко В.Ф. Локально конформно-келеровы многообразия постоянной голоморфной секционной кривизны // Мат. сб. 1991. Т. 182, № 3. С. 354–363.
4. Кириченко В.Ф. Конформно плоские локально конформно-келеровы многообразия // Мат. заметки. 1992. Т. 51, вып. 5. С. 57–66.
5. Yoshinobu Kamishima, Liviu Ornea. Geometric flow on compact locally conformally Kähler manifolds // Tohoku Math. J. 2005. Vol. 57, № 2. P. 201–221. <https://doi.org/10.2748/tmj/1119888335>.
6. Ornea L., Verbitsky M. Locally conformally Kähler manifolds admitting a holomorphic conformal flow // Mathematische Zeitschrift. 2013. Vol. 273. P. 605–611. <https://doi.org/10.1007/s00209-012-1022-z>.
7. Кириченко В.Ф., Арсеньева О.Е., Рустанов А.Р. Пример конциркулярного векторного поля на локально конформно-келеровом многообразии // Мат. заметки. 2022. Т. 111, вып. 4. С. 519–524.
8. Gray A., Vanhecke L. Almost Hermitian manifolds with constant holomorphic sectional curvature // Cas. Pestov. Mat. 1979. Vol. 104, № 2. P. 170–179.
9. Кириченко В.Ф. Дифференциально-геометрические структуры на многообразиях. М.: МПГУ, 2003. 495 с.
10. Аминова А.В. Проективные преобразования псевдоримановых многообразий. М.: Янус-К, 2003. 619 с.
11. Кириченко В.Ф., Кузакон В.М. О геометрии голоморфных торсообразующих векторных полей на почти эрмитовых многообразиях // Укр. мат. журн. 2013. Т. 65, № 7. С. 1005–1008.

References

1. Libermann P. Sur les structures presque complexes et autres structures infinitesimales regulieres. *Bull. Soc. Math. France*. 1955;83:195-224.
2. Vaisman I. On locally and globally conformal Kahler manifolds. *Trans. Amer. Math. Soc.* 1980;262:533-541.
3. Kirichenko V.F. Locally conformally Kahlerian manifolds of constant holomorphic sectional curvature. *Math. Sb. = Sbornik: Mathematics*. 1991;182(3):354-363. (In Russ.).
4. Kirichenko V.F. Conformally flat locally conformally Kahler manifolds. *Mat. zametki = Mathematical Notes*. 1992;51(4):57-66. (In Russ.).
5. Yoshinobu Kamishima, Liviu Ornea. Geometric flow on compact locally conformally Kähler manifolds. *Tohoku Math. J.* 2005;57(2):201-221, <https://doi.org/10.2748/tmj/1119888335>.
6. Ornea L., Verbitsky M. Locally conformally Kähler manifolds admitting a holomorphic conformal flow. *Mathematische Zeitschrift*. 2013;273:605-611, <https://doi.org/10.1007/s00209-012-1022-z>.
7. Kirichenko V.F., Arsenyeva O.E., Rustanov A.R. An example of a concircular vector field on a locally conformally Kahler manifold. *Mat. zametki = Mathematical Notes*. 2022;111(4):519-524. (In Russ.).
8. Gray A., Vanhecke L. Almost Hermitian manifolds with constant holomorphic sectional curvature. *Cas. Pestov. Mat.* 1979;104(2):170-179.
9. Kirichenko V.F. *Differential geometric structures on manifolds*. Moscow: Moscow Pedagogical State University Press; 2003. 495 p. (In Russ.).
10. Aminova A.V. *Projective transformations of pseudo-Riemannian manifolds*. Moscow: Yanus-K Publ.; 2003. 619 p. (In Russ.).
11. Kirichenko V.F., Kuzakon V.M. On the geometry of holomorphic torso-forming vector fields on almost Hermitian manifolds. *Ukr. mat. zhurn. = Ukrainian Mathematical Journal*. 2013;65(7):1005-1008. (In Russ.).

Информация об авторах

А.Р. Рустанов – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры прикладной математики, Институт фундаментального образования.

Е.А. Полькина – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики имени Э.В. Шпольского, Институт физики, технологии и информационных систем.

Information about the authors

A.R. Rustanov - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Senior Lecturer, Department of Applied Mathematics, Institute of Fundamental Education.

E.A. Polkina - Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Shpolsky Department of Theoretical Physics, Institute of Physics, of Technology and Information Systems.

*Статья поступила в редакцию 25.05.2022; одобрена после рецензирования 28.06.2022; принята к публикации 30.08.2022.
The article was submitted 25.05.2022; approved after reviewing 28.06.2022; accepted for publication 30.08.2022.*

Научная статья

УДК 532.5.031

doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-29-37

БЫСТРЫЙ АЛГОРИТМ МУЛЬТИПОЛЯ В БЕССЕТОЧНОМ МЕТОДЕ ДИСКРЕТНЫХ ВИХРЕЙ ДЛЯ ТЕЧЕНИЙ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

Межлум Альбертович Сумбатян^{1✉}, Андрей Сергеевич Пискунов²

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

¹ masumbatyan@sfedu.ru✉

² andrey91y@yandex.ru

Аннотация. Излагается метод расчета потоков идеальной жидкости с использованием быстрого метода мультиполя. Метод основан на том, что вычислительная сложность может быть снижена до уровня $O(N \log N)$. Описывается двумерная задача течения идеальной несжимаемой жидкости в терминах завихренности и скорости. Далее авторы подробно излагают схему, принципы, а также положительные и отрицательные стороны применения быстрого метода мультиполя в задачах гидродинамики. В качестве тестирования алгоритма авторы рассматривают пример диполя Чаплыгина – Лэмба. Приведены результаты численного моделирования движения диполя в вычислительных средах C++ и Python. Сделаны выводы о перемещении вихревой структуры на основе вычисленных результатов.

Ключевые слова: завихренность, быстрый метод мультиполя, метод дискретных вихрей, диполь Чаплыгина – Лэмба

Благодарности: авторы благодарны Российскому Фонду Фундаментальных Исследований (РФФИ) за поддержку грантом № 19-29-06013.

Для цитирования: Сумбатян М.А., Пискунов А.С. Быстрый алгоритм мультиполя в бессеточном методе дискретных вихрей для течений идеальной жидкости // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 3. С. 29–37.

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

Original article

FAST MULTIPOLE ALGORITHM IN THE MESHLESS DISCRETE VORTEX METHOD FOR FLOWS OF NON-VISCOUS FLUID

Mezhlum A. Sumbatyan^{1✉}, Andrei S. Piskunov²

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

¹ masumbatyan@sfedu.ru✉

² andrey91y@yandex.ru

Abstract. In this paper, we present a method for calculating the flows of a non-viscous fluid using the fast multipole method. The method is based on the fact that the computational complexity can be reduced to the level of $O(N \log N)$. A two-dimensional problem of the flow of a non-viscous incompressible fluid is formulated in terms of vorticity and velocity. Further, the authors describe in detail the scheme, principles, as well as the positive and negative aspects of using the fast multipole method in the hydrodynamic problems. As a test of the

algorithm, the authors consider an example of the Chaplygin-Lamb dipole. The results of numerical simulation of the dipole motion are presented, being implemented on C++ and Python platforms. Some conclusions are drawn about the motion of the vortex structure on the basis of the calculated results.

Keywords: vorticity, fast multipole method, method of discrete vortices, Chaplygin-Lamb dipole

Acknowledgments: the authors are grateful to the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) for its support with grant No. 19-29-06013.

For citation: Sumbatyan M.A., Piskunov A.S. Fast Multipole Algorithm in the Meshless Discrete Vortex Method for Flows of Non-Viscous Fluid. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(3):29-37. (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

Основные известные численные методы решения задач гидродинамики (метод конечных разностей [1, 2], конечных элементов [3], конечных объемов [4] и др.) основаны на дискретизации рассматриваемых областей и по сути являются сеточными. С их помощью решено большое число задач, не требующих использования сеток сверхбольшой размерности. Длительный опыт исследования в этой области показывает, что во многих задачах расчеты подобными методами как раз требуют настолько плотных сеток, что численное решение вообще не может быть построено за разумное время, даже на самых быстрых современных компьютерах. Подобная ситуация имеет место, например, при расчете турбулентных потоков прямыми численными сеточными методами (DNS – Direct Numerical Simulation), где практически реальные расчеты на сегодня удается довести лишь до значений числа Рейнольдса порядка $Re = 20 - 30 \cdot 10^3$. Для более высоких значений необходимые компьютерные расчеты требуют нескольких месяцев или даже лет.

Между тем в последние десятилетия активно развивается альтернативный метод дискретных вихрей (МДВ), который по своей сути является бессеточным [5, 6]. Он основан на трактовке уравнений движения не в системе Эйлера, а в системе Лагранжа. Уравнения Эйлера для движения идеальной несжимаемой жидкости, записанные в системе Лагранжа в виде полной производной по времени от кинематических характеристик, фактически означают теорему Кельвина (Томсона) о сохранении интенсивности вихрей. Поэтому движение жидкости можно свести к движению дискретной системы вихрей, каждый из которых сохраняет свою интенсивность и движется в жидкости за счет взаимодействия с другими вихрями [7]. При этом точность моделирования течения тем выше, чем большее число N дискретных вихрей берется в вихревой системе.

С ростом числа N вычислительная сложность МДВ возрастает как $O(N^2)$, что достаточно затратно. В связи с этим главной целью данной работы является привлечение быстрого метода мультиполя для ускорения бессеточного МДВ. Теоретически вычислительная сложность при этом может быть снижена до уровня $O(N \log N)$ с достаточно сложной алгоритмической реализацией. Вместо этого мы рассматриваем более простую реализацию, при которой число арифметических операций может быть уменьшено в произвольное число раз по сравнению со стандартной трактовкой.

Основные соотношения

Уравнения движения идеальной несжимаемой жидкости можно записать в терминах «скорость» – «завихренность». Для простоты ограничимся случаем двумерной задачи, где полная система

уравнений может быть записана в виде одного уравнения движения Эйлера и одного уравнения неразрывности:

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{\partial\omega}{\partial t} + v_x \frac{\partial\omega}{\partial x} + v_y \frac{\partial\omega}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Рассматриваемый МДВ состоит в том, что область ненулевой завихренности аппроксимируется конечным набором дискретных точечных вихрей интенсивностью ω_j , сконцентрированных в узлах с координатами (x_j, y_j) , $j = 1, 2, \dots, N$. Первое уравнение (1) фактически означает известный закон Кельвина (Томсона) сохранения интенсивности вихрей при их движении. При этом каждый вихрь с номером j в процессе взаимодействия с другими вихрями находится в постоянном движении, сохраняя свою интенсивность ω_j . Соответственно, изменяется и точка расположения (x_j, y_j) j -го вихря.

Известно [8], что при рассмотрении одиночного дискретного вихря ω_j с центром в точке (x_j, y_j) соотношения (1) могут быть обращены относительно скорости по формулам Био – Савара

$$\begin{cases} v_x(x, y) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\omega_j(y - y_j)}{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2}, \\ v_y(x, y) = \frac{1}{2\pi} \frac{\omega_j(x - x_j)}{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2}, \end{cases} \quad (2)$$

что позволяет вычислить компоненты скорости (v_x, v_y) в произвольной точке жидкости (x, y) . Применение формулы (2) в точках расположения вихрей $(x, y) = (x_i, y_i)$ приводит к следующей системе обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} v_{xi} = \frac{dx_i}{dt} = -\frac{1}{2\pi} \sum_{j \neq i}^N \frac{\omega_j(y_i - y_j)}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \\ v_{yi} = \frac{dy_i}{dt} = \frac{1}{2\pi} \sum_{j \neq i}^N \frac{\omega_j(x_i - x_j)}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \end{cases} \quad (3)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$; N – число дискретных вихрей. Система (3) относительно неизвестных функций $x_i(t), y_i(t)$ после добавления к ней начальных условий с заданием исходной конфигурации расположения дискретных вихрей $x_i(0), y_i(0)$ и их интенсивностей ω_i (последние сохраняют свои значения при движении вихрей в потоке) является задачей Коши для функций $x_i(t), y_i(t)$. Для решения данной задачи Коши можно воспользоваться различными методами типа методов Рунге – Кутты, которые обеспечивают устойчивый алгоритм на временном интервале произвольной длины. В случае исследования течения на небольшом конечном отрезке времени достаточно использовать простейший метод Эйлера, который обеспечивает требуемую точность и устойчивость при достаточно малом временном шаге Δt . В итоге схема Эйлера для системы (3) определяет на каждом шаге координаты центров всех дискретных вихрей в следующем виде:

$$\begin{cases} x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + v_{xi} \Delta t, \\ y_i(t + \Delta t) = y_i(t) + v_{yi} \Delta t, i = 1, \dots, N, \end{cases} \quad (4)$$

где компоненты вектора скорости (v_{xi}, v_{yi}) определены по формулам (3).

Будем условно называть вихри с номерами j , по которым происходит суммирование в формуле (3), источниками, а вихрь с номером i , в котором вычисляются компоненты скорости в формуле (3), – приемником.

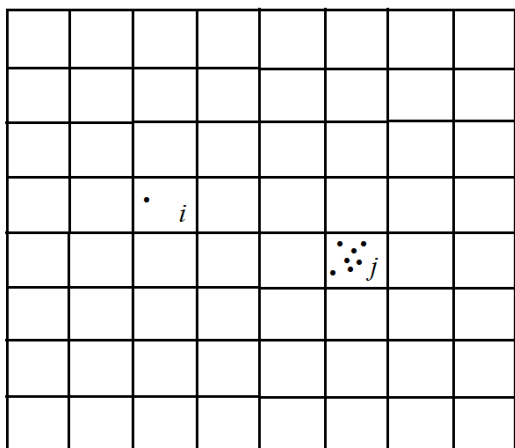


Рис. 1. Стандартный метод мультиполя. Разбиение области течения на элементарные ячейки. Дискретные вихри – источники с номерами j расположены в ячейке, удаленной от ячейки, содержащей дискретный вихрь – приемник с номером i / Fig. 1. A standard multipole method. Splitting the flow region into elementary cells. Discrete vortices - sources with numbers j are located in a cell at a distance from the cell containing a discrete vortex - receiver with number i

Далее вся область потока разбивается на мелкие подобласти, например на мелкие квадраты. Пусть i -я точка лежит в одном квадрате, а какое-то число точек с номерами j – в другом квадрате, удаленном от первого, как показано на рис. 1. Тогда каждый член суммы в формуле (5) допускает следующее разложение с разделением переменных.

$$\frac{1}{z_i - z_j} = \frac{1}{z_i - c} \cdot \frac{1}{1 - \frac{z_j - c}{z_i - c}} = \frac{1}{z_i - c} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{z_j - c}{z_i - c} \right)^k, \quad (6)$$

где в качестве комплексного числа c можно взять, например, центр ячейки, содержащей вихри с номерами j .

Поскольку общий член геометрической прогрессии (6) по модулю намного меньше единицы: $|(z_j - c)/(z_i - c)| < 1$, то в бесконечном ряде (6) можно оставить несколько первых членов, допуская при этом экспоненциально малую погрешность:

$$\frac{1}{z_i - z_j} = \frac{1}{z_i - c} \sum_{k=0}^K \left(\frac{z_j - c}{z_i - c} \right)^k. \quad (7)$$

Подстановка соотношения (7) в формулу (5) дает

$$\begin{cases} v_{xi} = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Im} \sum_{k=0}^K \frac{1}{(z_i - c)^{k+1}} \left[\sum_j \omega_j (z_j - c)^k \right], \\ v_{yi} = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Re} \sum_{k=0}^K \frac{1}{(z_i - c)^{k+1}} \left[\sum_j \omega_j (z_j - c)^k \right]. \end{cases} \quad (8)$$

При этом для каждого k из небольшого числа $k=1, \dots, K$ внутреннее суммирование в (8) может быть произведено один раз для всех значений i на стадии предпроцессинга. Поскольку вихрей с номером i имеется N штук, то общая сложность алгоритма равна $O(KN)$, т.е. линейна по N . Однако при этом нужно пройти все элементарные ячейки по индексу j , а не только внутри квадрата, показанного на рис. 1. Дальнейший ход алгоритма основан на том, что в каждой ячейке вихрей стало меньше, чем в исходной системе. Устраивая иерархию ячеек с постепен-

Поскольку для каждого $i = 1, \dots, N$ в формуле (3) нужно производить суммирование по $j = 1, \dots, N (j \neq i)$, то очевидно, что вычислительная сложность МДВ равна $O(N^2)$, что требует довольно серьезных компьютерных ресурсов. Для преодоления этой сложности предлагается использовать быстрый метод мультиполя.

Метод мультиполя

Применительно к рассматриваемым математическим соотношениям метод мультиполя можно интерпретировать следующим образом [9, 10]. Прежде всего, математические выражения сильно упрощаются, если в формулах суммирования (3) перейти к комплексным координатам $z_j = x_j + iy_j$. Тогда (3) можно записать в виде

$$\begin{cases} v_{xi} = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Im} \sum_{j \neq i}^N \frac{\omega_j}{z_i - z_j}, \\ v_{yi} = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Re} \sum_{j \neq i}^N \frac{\omega_j}{z_i - z_j}. \end{cases} \quad (5)$$

ным уменьшением их размеров и основываясь на идее, родственной той, которая используется при вычислении быстрого преобразования Фурье [11], удастся свести полный алгоритм вычислений для выражений (5) к форме, вычислительная сложность которой равна $O(N \cdot \log N)$. При этом представление (8) неэффективно для суммирования по всем ячейкам по индексу j либо совпадающих с ячейкой, содержащей вихрь номер i , либо соседних с последней. Однако суммирование по подобным ячейкам осуществляется напрямую и с уменьшением размера ячеек требует линейного по параметру N числа операций.

Авторам данной работы неизвестны публикации, в которых классический метод мультиполя был бы представлен алгоритмом в виде блок-схем или псевдокода, допускающего прямое применение при написании программного кода в той или иной среде программирования. В связи с этим алгоритмическая реализация метода остается скорее делом искусства, чем готовым к использованию руководством к действию. По этой причине ниже излагается более простой алгоритм, вычислительная сложность которого меньше, чем сложность прямого суммирования по формулам (5), в произвольное число раз. Таким образом, сложность предлагаемого алгоритма равна C/M , где $C=O(N^2)$ – сложность прямых вычислений непосредственно по формулам (5); M – произвольное натуральное число.

Заклучим всю область течения в некоторый круг, который разобьем на конечное число M колец радиусом $R_m (m=1, \dots, M)$. Для простоты шаг по радиусу должен обеспечивать равные площади всех колец, как изображено на рис. 2. При этом самое внутреннее кольцо является кругом некоторого радиуса. Если набор дискретных вихрей выбран достаточно плотно в рассматриваемой области течения, то асимптотически в каждом секторе расположено N/M дискретных вихрей. При этом вычисление суммы в (5) возможно в виде

$$S = \sum_{j \neq i} \frac{\omega_j}{z_i - z_j} = S_0 + S_1 + S_2. \quad (9)$$

Здесь сумма S_0 относится к суммированию по всем элементам j , расположенным в том же кольце, что и приемник i . Сумма S_1 относится ко всем элементам j , расположенным в кольцах, внутренних по отношению к кольцу i -го вихря. Наконец, сумма S_2 относится ко всем элементам j , расположенным в кольцах, внешних по отношению к кольцу i -го вихря. На рис. 2 показан лишь вариант взаимного расположения вихрей с номерами i и j , соответствующий сумме S_1 .

Если прямое вычисление суммы S в (9) для всех i и j требует $A \cdot N^2$ арифметических операций, где A – некоторая положительная константа, то при выполнении прямого суммирования S_0 для всех i и j из одного кольца требуется $A \cdot (N/M)^2$ арифметических операций. Следовательно, для всех колец при вычислении S_0 потребуется $A \cdot M \cdot (N/M)^2 = A \cdot N^2/M$ операций. При вычислении суммы S_1 применим представление, основанное на разделении переменных:

$$S_1 = \sum_j \frac{\omega_j}{z_i - z_j} = \sum_j \frac{\omega_j}{z_i} \left(1 - \frac{z_j}{z_i}\right)^{-1} = \sum_j \frac{\omega_j}{z_i} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{z_j}{z_i}\right)^k \approx \sum_j \frac{\omega_j}{z_i} \sum_{k=0}^K \left(\frac{z_j}{z_i}\right)^k = \sum_{k=0}^K \frac{1}{z_i^{k+1}} \sum_j \omega_j z_j^k. \quad (10)$$

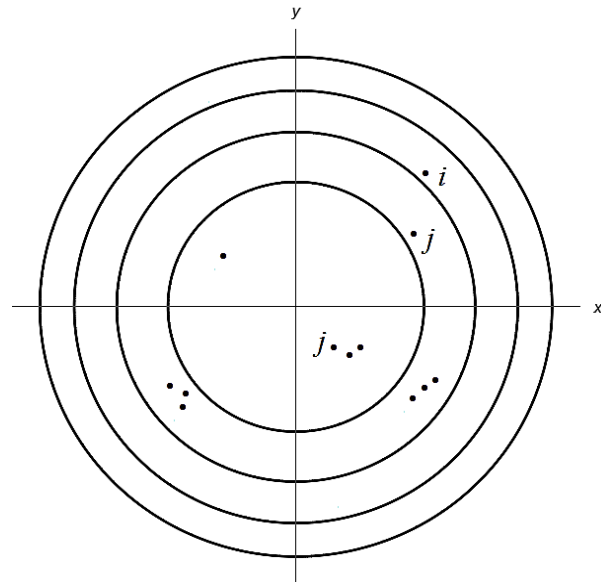


Рис. 2. Упрощенный метод мультиполя. Течение заключено в круг, разбитый на элементарные кольца равной площади. При вычислении суммы S_1 приемник с номером i расположен в кольце снаружи от всех источников с номерами j /
 Fig. 2. Simplified multipole method. The flow is enclosed in a circle, divided into elementary rings of equal area. When calculating the sum S_1 , the receiver with number i is located in the ring outside of all sources with numbers j

В (10) бесконечный ряд по параметру k сходится, поскольку $|z_j/z_i| < 1$. Более того, верхний бесконечный предел в этом ряде можно заменить на конечное значение K , допустив при этом экспоненциально малую погрешность. После перестановки порядка суммирования замечаем, что суммирование по j может быть выполнено один раз для всех значений i , поэтому вычислительная сложность последнего выражения в (10) равна $O(KN)$, т.е. линейна по N .

К аналогичному выводу приходим и при вычислении суммы S_2 , если к ней применить следующее преобразование:

$$S_2 = \sum_j \frac{\omega_j}{z_i - z_j} = -\sum_j \frac{\omega_j}{z_j} \left(1 - \frac{z_i}{z_j}\right)^{-1} = -\sum_j \frac{\omega_j}{z_j} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{z_i}{z_j}\right)^k \approx -\sum_{k=0}^K z_i^k \sum_j \frac{\omega_j}{z_j^{k+1}}. \quad (11)$$

Бесконечный ряд здесь сходится, поскольку $|z_i/z_j| < 1$.

Подводя итог, приходим к выводу, что суммарная вычислительная сложность предлагаемого алгоритма равна $A \cdot N^2/M + O(KN)$. Если пренебречь линейной по N частью этой оценки, то окончательная сложность оказывается равной $A \cdot N^2/M$, что в M раз меньше, чем суммирование напрямую по исходной формуле. Таким образом, несмотря на то что оценка по-прежнему остается квадратичной, тем не менее вычисления по предложенному алгоритму могут быть устроены в произвольное число раз быстрее, чем прямые расчеты в исходном виде (5).

Тестовый пример

В качестве тестового примера для проверки эффективности алгоритма рассмотрим диполь Чаплыгина – Лэмба [12]. Его модель представляет собой математическое описание конкретного невязкого устойчивого вихревого потока в виде структуры круглой формы радиусом R , которая движется вправо вдоль горизонтальной оси со скоростью U , сохраняя свою круглую форму, и представляет собой точное решение двумерных уравнений Эйлера. Известно, что между завихренностью и функцией тока в диполе Чаплыгина – Лэмба существует линейная зависимость [12]: $\omega = k^2 \psi$. При этом функция тока связана с завихренностью формулой

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial^2 y} = -\omega. \quad (12)$$

Для диполя Чаплыгина – Лэмба решением уравнения Пуассона (12) является функция тока, записанная в полярной системе координат (r, θ) :

$$\psi = -\frac{2UJ_1(kr)}{kJ_0(kR)} \sin \theta. \quad (13)$$

Здесь J_0, J_1 – функции Бесселя нулевого и первого порядка. Кроме того, значение $kR = 3,83171$ является первым положительным нулем функции Бесселя первого порядка $J_1(kR)$.

Разработанный алгоритм реализован в среде C++. Визуализация осуществлялась в библиотеке Matplotlib на языке программирования Python. Входные параметры задачи: $R=1$ – радиус диполя; $U=1$ – скорость движения диполя вдоль оси x ; $I=100$ – число итераций; $\Delta t=0,01$ – шаг итерационного процесса по времени; L – число колец на рис. 2; $R_L=2,5$ – радиус области, заключающей в себя течение жидкости на рис. 2 (совпадает с радиусом внешнего кольца); $K=20$ – верхний предел суммирования в формулах (10) и (11); N – полное число дискретных вихрей.

На рис. 3 слева показан вихрь Чаплыгина – Лэмба в исходном состоянии, а также представлены результаты расчета для небольшого числа вихрей в момент $t=1$, после 100 итераций с шагом по времени $\Delta t=0,01$. Хорошо видно, что система вихрей сдвинулась как еди-

ный круглый объект вправо на расстояние, равное $UI\Delta t = 1$. В результате этого диполь Чаплыгина – Лэмба, который располагался в исходный момент времени на интервале $(-1,1)$ как по горизонтальной, так и по вертикальной координате, в конце рассматриваемого временного интервала стал располагаться вдоль горизонтальной координаты на интервале $(0,2)$, а вдоль вертикальной координаты – по-прежнему на интервале $(-1,1)$. То есть он сдвинулся вправо как единый круглый объект на расстояние, равное единице, как и предсказывает теория. При этом внутри круглой области вихри могут перемещаться, перемешиваться, вообще совершать довольно сложные движения, но вся вихревая система в целом сохраняет форму круга, перемещающегося вправо со скоростью $U = 1$.

Дальнейшее увеличение числа вихрей приводит к более корректной численной реализации, как показано на рис. 4. При этом существенное увеличение числа дискретных вихрей соответствует представлению о диполе Чаплыгина – Лэмба как сплошной структуре.

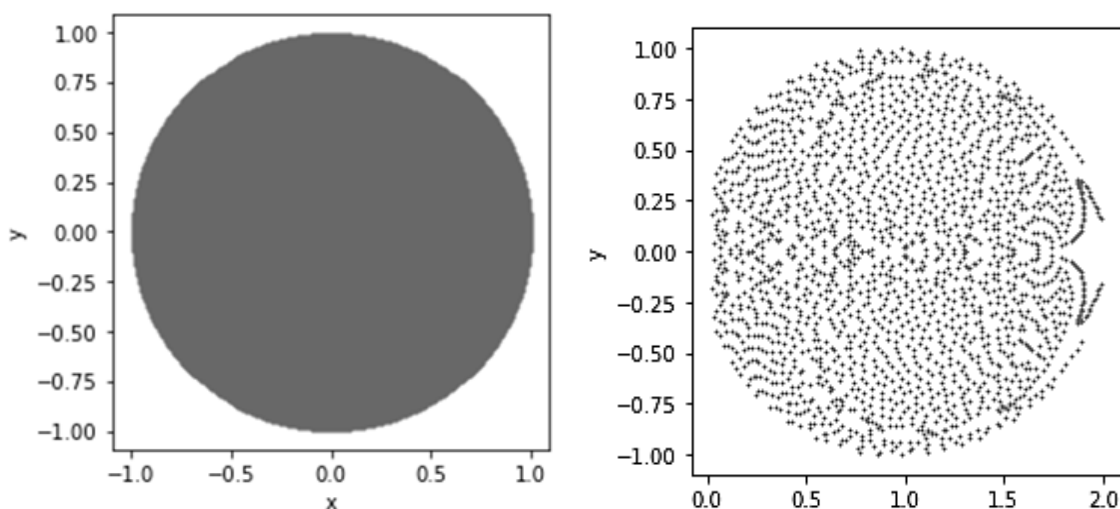


Рис. 3. Расположение дискретных вихрей в диполе Чаплыгина – Лэмба: слева – в начальный момент $t=0$; справа – в момент $t=1$: $L=16$, $N=1976$ / Fig. 3. Location of discrete vortices in the Chaplygin-Lamb dipole: on the left – at the initial moment $t=0$; on the right – at the moment $t=1$: $L=16$, $N=1976$

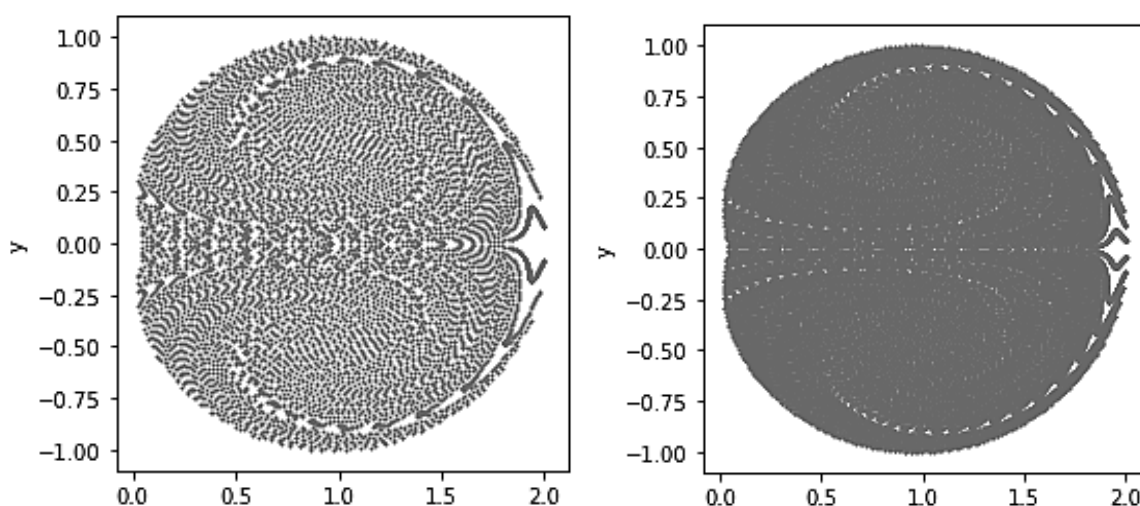


Рис. 4. Расположение дискретных вихрей в диполе Чаплыгина – Лэмба в момент $t=1$: слева – $L=16$, $N=7860$; справа – $L=16$, $N=31428$ / Fig. 4. Location of discrete vortices in the Chaplygin-Lamb dipole at the moment $t=1$: on the left – $L=16$, $N=7860$; on the right – $L=16$, $N=31428$

Заключение

Предложенная модификация стандартного метода мультиполя существенно снижает вычислительные затраты при реализации алгоритма. Например, для случая $N=31428$, представленного на правом рис. 4, при прямой реализации по формулам (3) действительно требуется примерно в $L=16$ раз больше времени, чем по методу, описанному в данной работе, в одной и той же среде на одном ядре процессора Intel Core i5 персонального компьютера.

Список источников

1. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. 616 с.
2. Марчук Г.И., Агошков В.И. Введение в проекционно-сеточные методы. М.: Наука, 1981. 416 с.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
4. Moukalled F., Mangani L., Darwish M. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*. N.Y.: Springer, 2016.
5. Cottet G.-H., Koumoutsakos P.D. *Vortex Methods: Theory and Practice*. N.Y.: Cambridge University Press, 2000.
6. Majda A.J., Bertozzi A.L. *Vorticity and Incompressible Flow*. N.Y.: Cambridge University Press, 2002.
7. Говорухин В.Н. Численный анализ динамики распределенных вихревых конфигураций // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2016. Т. 56, № 8. С. 1491–1505.
8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. 847 с.
9. Greengard L., Rokhlin V. A fast algorithm for particle simulations // *J. Comp. Phys.* 1987. Vol. 73. P. 325–348.
10. Ying L., Biros G., Zorin D. A kernel-independent adaptive fast multipole algorithm in two and three dimensions // *J. Comp. Phys.* 2004. Vol. 196. P. 591–626.
11. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. 608 с.
12. Meleshko V.V., van Heijst G.J.F. On Chaplygin's investigations of two-dimensional vortex structures in an inviscid fluid // *J. Fluid Mech.* 1994. Vol. 272. P. 157–182.

References

1. Samarskiy A.A. *Theory of difference schemes*. Moscow: Nauka Publ.; 1983. 616 p. (In Russ.).
2. Marchuk G.I., Agoshkov V.I. *Introduction to projection-grid methods*. Moscow: Nauka Publ.; 1981. 416 p. (In Russ.).
3. Zenkevich O. *Finite element method in engineering*. Moscow: Mir Publ.; 1975. 541 p. (In Russ.).
4. Moukalled F., Mangani L., Darwish M. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*. New York: Springer Publ.; 2016.
5. Cottet G.-H., Koumoutsakos P.D. *Vortex Methods: Theory and Practice*. New York: Cambridge University Press; 2000.
6. Majda A.J., Bertozzi A.L. *Vorticity and Incompressible Flow*. New York: Cambridge University Press; 2002.
7. Govorukhin V.N. Numerical analysis of dynamics of distributed vortex configurations. *Zhurn. vychisl. matematiki i mat. fiziki*. 2016;56(8):1491-1505. (In Russ.).
8. Loitsyansky L.G. *Mechanics of liquid and gas*. Moscow: Nauka Publ.; 1973. 847 p. (In Russ.).
9. Greengard L., Rokhlin V. A fast algorithm for particle simulations. *J. Comp. Phys.* 1987; 73: 325-348.
10. Ying L., Biros G., Zorin D. A kernel-independent adaptive fast multipole algorithm in two and three dimensions. *J. Comp. Phys.* 2004;196:591-626.
11. Sergienko A.B. *Digital signal processing*. St. Petersburg: Piter Publ.; 2002. 608 p. (In Russ.).
12. Meleshko V.V., van Heijst G.J.F. On Chaplygin's investigations of two-dimensional vortex structures in an inviscid fluid. *J. Fluid Mech.* 1994;272:157-182.

Информация об авторах

М.А. Сумбатян – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра теоретической и компьютерной гидроаэродинамики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.
А.С. Пискунов – младший научный сотрудник, кафедра теоретической и компьютерной гидроаэродинамики, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича.

Information about the authors

M.A. Sumbatyan - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Department of Theoretical and Computational Hydroaerodynamics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

A.S. Piskunov - Junior Researcher, Department of Theoretical and Computational Hydroaerodynamics, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science.

Статья поступила в редакцию 18.04.2022; одобрена после рецензирования 29.04.2022; принята к публикации 30.08.2022.

The article was submitted 18.04.2022; approved after reviewing 29.04.2022; accepted for publication 30.08.2022.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ SCIENCES OF EARTH

Научная статья
УДК 57.014:58.051
doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-38-44

РАДИОНУКЛИДЫ В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ПОЧВ ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Елена Анатольевна Бураева^{1✉}, *Наталья Владимировна Маломыжева*²,
*Дарья Алексеевна Швецова*³, *Ольга Степановна Безуглова*⁴

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

¹ buraeva@sfedu.ru ✉

² llia.2013@yandex.ru

³ dshvecova@sfedu.ru

⁴ osbesuglova@sfedu.ru

Аннотация. Работа посвящена оценке особенностей распределения естественных радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) и искусственного ^{137}Cs в верхнем слое почв особо охраняемых природных территорий (ООПТ) Ростовской области. Удельную активность (концентрацию) радионуклидов в почве измеряли гамма-спектрометрическим методом. Распределение искусственного радионуклида ^{137}Cs в почвах Ростовской области неравномерно. Минимальные удельные активности радиоцезия фиксируются в заповеднике «Ростовский». Показано, что среднее арифметическое, медианное и модальное значения удельной активности ^{137}Cs составляют 21,7, 14,2 и 7,5 Бк/кг соответственно, а средняя удельная активность естественных радионуклидов в почвах ООПТ Ростовской области – 26,9 Бк/кг для ^{226}Ra и 27,0 Бк/кг для ^{232}Th . Данные значения можно использовать в качестве фоновых (эталонных) при оценке влияния промышленности и урбанизации на радиоактивность почвы.

Ключевые слова: естественные радионуклиды, радиоцезий (^{137}Cs), загрязнение, распределение, почва, особо охраняемые природные территории

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание в сфере научной деятельности, научный проект № 0852-2020-0032) / (БАЗ0110/20-3-07ИФ).

Для цитирования: Бураева Е.А., Маломыжева Н.В., Швецова Д.А., Безуглова О.С. Радионуклиды в верхнем слое почв особо охраняемых природных территорий Ростовской области // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 3. С. 38–44.

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

Original article

RADIONUCLIDES IN THE UPPER SOIL LAYER OF SPECIALLY PROTECTED NATURAL TERRITORIES OF THE ROSTOV REGION

Elena A. Buraeva^{1✉}, *Natalya V. Malomyzheva*², *Daria A. Shvetsova*³, *Olga S. Bezuglova*⁴

^{1, 2, 3, 4} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹ buraeva@sfedu.ru ✉

² llia.2013@yandex.ru

³ dshvecova@sfedu.ru

⁴ osbesuglova@sfedu.ru

© Бураева Е.А., Маломыжева Н.В., Швецова Д.А., Безуглова О.С., 2022

Abstract. The paper is devoted to the assessment of the features of the distribution of natural radionuclides (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) and artificial ^{137}Cs in the upper soil layer of specially protected areas of the Rostov region. The activity concentration of radionuclides in the soil was measured by the gamma spectrometric method. The distribution of the artificial radionuclide ^{137}Cs in the soils of the Rostov region is uneven. The minimum activity concentration of radiocesium is recorded in the Rostov nature reserve. It is shown that the arithmetic mean, median and modal values of the activity concentration of ^{137}Cs are 21.7, 14.2 and 7.5 Bq/kg, respectively, and the arithmetic mean activity concentration of natural radionuclides in the soils of the protected areas of the Rostov region are 26, 9 Bq/kg for ^{226}Ra , 27.0 Bq/kg for ^{232}Th . These values can be used as background (reference) values in assessing the degree of influence of industry and urbanization on soil radioactivity.

Keywords: natural radionuclides, radiocesium (^{137}Cs), pollution, distribution, soil, specially protected natural areas

Acknowledgments: the study was carried out with the financial support on the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (the state assignment in the field of scientific activity No. 0852-2020-0032) / (BAZ30110/20-3-07IF).

For citation: Buraeva E.A., Malomyzheva N.V., Shvetsova D.A., Bezuglova O.S. Radionuclides in the Upper Soil Layer of Specially Protected Natural Territories of the Rostov Region. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(3):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).

Введение

Особо охраняемые природные территории (ООПТ) играют важнейшую роль в сохранении и восстановлении ресурсов живой природы. Они являются наиболее эффективным механизмом поддержания экологического баланса регионов, сохранения их естественного биоразнообразия [1].

В данной работе представлены результаты определения удельной активности радионуклидов в верхнем (0–10 см) слое почвы на ООПТ Ростовской области. Верхний слой почвы наиболее подвержен влиянию как различных климатических (природных) факторов, так и антропогенному влиянию. В этом почвенном слое сосредоточена большая часть корневой массы растений (мощность дернового горизонта в степях Ростовской области чаще всего составляет 8–12 см) [2–4].

Многолетние сведения об активности радионуклидов в верхнем слое почвы (в том числе о плотности выпадений радионуклидов после аварий, что особо актуально для искусственного радиоцезия), о запасах радионуклидов в дерновом горизонте, о поверхностном распределении радионуклидов в рамках как объекта в целом, так и конкретной мониторинговой площадки в частности позволяют не только оценивать фоновые концентрации радионуклидов в почве, но и изучать влияние человеческой деятельности на наземные экосистемы.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились на территориях заповедника «Ростовский», Ботанического сада Южного федерального университета, в урочищах Черная балка и Каменная балка, на территориях Персиановской заповедной степи и Приазовской степи Ростовской области. Заповедник «Ростовский» расположен в каштановой почвенной зоне, на остальных ООПТ распространены черноземные почвы [2, 3].

Образцы почв на контрольных площадках (КУ) были отобраны методом конверта (со стороной квадрата 10 м) глубиной 0–10 см. Все почвенные пробы высушивали при температуре $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, измельчали, просеивали через сито с размером ячейки 1,0 мм и герметично упаковывали в счетные геометрии Маринелли 1 л, Маринелли 0,5 л, чашку Петри, «Дента» 0,02 л (диск высотой 7 мм и диаметром 70 мм) в зависимости от количества отобранной пробы [5].

Удельную активность ^{137}Cs и естественных радионуклидов (ЕРН) в почвах определяли инструментальным гамма-спектрометрическим методом радионуклидного анализа. Использовали низкофоновую спектрометрическую установку [6] на основе полупроводникового коаксиального детектора из особо чистого германия (GeHP) и гамма-спектрометр сцинтилляционный «Прогресс-гамма» на основе NaI(Tl) детектора. Время набора гамма-спектров составляло от 1 до 24 ч в зависимости от геометрий счетного образца. Погрешность измерения удельной активности радионуклидов не превышала 30 % (в основном 10–15 %) [5–7].

Статистическую обработку результатов определения удельной активности радионуклидов в почвах ООПТ Ростовской области проводили при помощи программного обеспечения Statistica.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлены результаты статистической обработки удельной активности ЕРН (^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K), а также искусственного ^{137}Cs в верхнем слое почв ООПТ Ростовской области.

Распределение радионуклидов в верхнем (0–10 см) слое почвы ООПТ строго не подчиняется нормальному закону. При этом средние, модальные и медианные значения удельной активности ЕРН совпадают в пределах достаточно высокого стандартного отклонения (неопределенности измерений – порядка 30 %). Для оценки распределения искусственного радионуклида в почвах ООПТ целесообразно использовать медианное или среднее геометрическое значения.

Таблица 1 / Table 1

Результаты статистической обработки данных по удельной активности радионуклидов в почвах ООПТ Ростовской области / Results of statistical processing of data on the activity concentration of radionuclides in soils of protected areas of the Rostov region

Параметр	Радионуклид			
	^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Минимум, Бк/кг	1,0	7,2	10,9	140,7
Максимум, Бк/кг	106,7	58,2	43,4	731,0
Среднее арифметическое, Бк/кг	21,7	26,9	27,0	403,7
Среднее геометрическое, Бк/кг	13,0	25,3	25,8	382,3
Медиана, Бк/кг	14,2	24,4	26,0	414,0
Мода, Бк/кг	7,5	20,9	33,1	448,0
Стандартное отклонение, Бк/кг	21,5	9,8	7,8	127,8
Коэффициент вариации, %	99	36	29	32
Количество проб, шт.	111			

В целом данный радионуклид распределен в почвах ООПТ Ростовской области неравномерно. Это обусловлено особенностями выпадения данного радионуклида после аварии на Чернобыльской АЭС [8]. Несмотря на то что на территории Ростовской области данный радионуклид выпадал пятнами и полосами, выпадение ^{137}Cs в среднем составило 0,1–0,5 Ки/км² (1–18 кБк/м²) и не превышает даже в шлейфах загрязнения 0,9 Ки/км² (менее 33 кБк/м²) [8].

В табл. 2 приведены результаты распределения ЕРН и искусственного цезия в верхнем слое почвы в каждой из исследуемых ООПТ. Значимые различия (коэффициенты вариации 38–79 %) в удельной активности искусственного радионуклида ^{137}Cs в почвах ООПТ, как уже говорилось выше, обусловлены его неравномерным выпадением после аварии на Чернобыльской АЭС. Минимальные концентрации его фиксируются в заповеднике «Ростовский».

Таблица 2 / Table 2

**Результаты статистической обработки данных по удельной активности радионуклидов
в почвах различных ООПТ / Results of statistical processing of data on the activity concentration
of radionuclides in soils of various protected areas**

Параметр	ПСС	ЗР	БС	АС	КБ	ЧБ
^{137}Cs						
Минимум, Бк/кг	1,7	0,5	4,2	1,1	2,7	12,2
Максимум, Бк/кг	106,7	20,0	59,1	70,6	32,3	56,0
Среднее арифметическое, Бк/кг	58,6	6,3	17,6	15,9	17,6	34,2
Среднее геометрическое, Бк/кг	43,1	5,0	15,1	11,3	12,7	31,7
Стандартное отклонение, Бк/кг	31,9	4,2	10,2	12,6	12,1	12,9
Коэффициент вариации, %	54	67	58	79	69	38
^{226}Ra						
Минимум, Бк/кг	19,3	20,0	13,6	7,2	20,2	32,1
Максимум, Бк/кг	28,0	34,3	31,7	33,1	37,5	63,9
Среднее арифметическое, Бк/кг	23,7	26,8	25,1	22,0	28,5	44,7
Среднее геометрическое, Бк/кг	23,6	26,5	24,8	21,3	27,8	44,2
Стандартное отклонение, Бк/кг	3,1	3,9	3,7	5,4	6,9	7,4
Коэффициент вариации, %	13	15	15	25	24	17
^{232}Th						
Минимум, Бк/кг	19,1	20,2	20,0	10,9	19,2	11,6
Максимум, Бк/кг	40,7	43,4	39,2	37,6	27,2	33,8
Среднее арифметическое, Бк/кг	31,4	32,0	31,8	25,4	22,6	21,8
Среднее геометрическое, Бк/кг	30,8	31,5	31,4	24,5	22,4	20,9
Стандартное отклонение, Бк/кг	5,7	5,8	4,7	6,7	3,4	6,6
Коэффициент вариации, %	18	18	15	26	15	30
^{40}K						
Минимум, Бк/кг	446	282	260	141	125	142
Максимум, Бк/кг	535	731	775	486	345	469
Среднее арифметическое, Бк/кг	491	538	438	349	247	295
Среднее геометрическое, Бк/кг	490	524	431	338	236	275
Стандартное отклонение, Бк/кг	29,7	119,4	75,7	81,8	72,2	115,8
Коэффициент вариации, %	6	22	17	23	29	39
Количество проб, шт	12	27	75	57	6	12

Примечание. ПСС – Персиановская степь; ЗР – заповедник «Ростовский»; БС – Ботанический сад Южного федерального университета; АС – Приазовская степь; КБ – Каменная балка; ЧБ – Черная балка

Согласно различным оценкам плотности выпадения радиоцезия на территории Европы, включая Российскую Федерацию, Белоруссию и Украину [8], в Ростовской области основные пятна загрязнения радиоцезием пришлись на северную и западную части. Юго-восток Ростовской области оказался наименее загрязненным радиоцезием.

Искусственные радионуклиды, такие как ^{137}Cs , попадают на поверхность почвы с радиоактивным выпадением и мигрируют по почвенному профилю в виде солей и с тонкими илистыми частицами. Возможна и миграция радиоцезия по профилю в виде комплексных соединений с гуминовыми веществами [9]. Тем не менее особенности водного режима в степных регионах Ростовской области способствуют тому, что большая часть радиоцезия сосредотачивается в поверхностных горизонтах как за счет необменной сорбции глинистыми минералами, так и путем образования малоподвижных комплексных соединений с гуминовыми кислотами и сорбции его гумином.

Удельная активность ЕРН в почвах ООПТ Ростовской области сопоставима в пределах стандартного отклонения, при этом максимальные значения ^{40}K фиксируются в заповеднике «Ростовский», а ^{226}Ra – в урочище Черная балка. Источниками ^{40}K и ^{226}Ra (а также и ^{232}Th) в почвах являются почвообразующие породы, поэтому эти изотопы относительно равномерно распределены в пределах контрольных участков.

При этом, по некоторым данным [10], ^{40}K , будучи биогенным элементом, накапливается в поверхностных слоях с относительно высокой биологической активностью. Также в заповеднике «Ростовский» часто встречаются солонцеватые почвы и солонцы [2]. И несмотря на то что составе солей в основном соли натрия, кальция и магния, не стоит исключать в условиях полусухих и сухих степей при чередовании обильных осадков и длительных засух поднятие по почвенным капиллярам и солей калия, в том числе и ^{40}K . Все это может объяснять значительные коэффициенты вариации калия в почвах ООПТ даже в пределах КУ (табл. 2).

Урочище Черная балка, расположенное в пределах Восточного Донбасса (Донецкий каменноугольный бассейн), отличается сложным рельефом и разнообразным почвенным покровом. Наиболее распространены почвы на плотных породах, отличающихся щебнистостью, и ^{226}Ra может быть привнесен в почву с обломками плотных пород (сланцы, известняки). В окрестностях данной ООПТ находятся угольные шахты, в углеотвалах (терриконах) которых содержатся породы с повышенной активностью ЕРН. При выветривании таких пород радионуклиды с пылью могут распространяться на значительные расстояния и оседать при сухом и мокром выпадениях на почвы [11].

Значимые (выше погрешности определения) вариации в пределах КУ (табл. 2) характерны для искусственного радионуклида ^{137}Cs , что исследователи объясняют влиянием микрорельефа территории [12, 13]. Степные блюдца, потяжины, западины, бугорки могут даже в пределах небольшого участка создавать значительные градиенты влаги и температуры, что приводит к значимым перераспределениям данного активного щелочного металла [12, 13].

Для ЕРН вариации радионуклидов в пределах КУ нивелируются ощутимо высокой инструментальной погрешностью. При этом в почвах, сформированных на аллювиальных отложениях или в аллювиальных почвах (аллювиально-луговых почвах), вариации ЕРН в пределах квадрата 10×10 м могут достигать в отдельных случаях до двух и более раз. Это можно объяснить неоднородностью почвенного покрова, наличием песчаных прослоек, линз в почвенных горизонтах, различием в гранулометрическом составе и содержании гумуса. Не стоит исключать и влияние биотурбации как на перераспределение искусственных радионуклидов (в особенности радиоцезия), так и на вариации ЕРН в почвах [14, 15].

В табл. 3 приведен анализ удельной активности радионуклидов в разных типах почвы ООПТ Ростовской области.

Таблица 3 / Table 3

**Средняя арифметическая удельная активность ЕРН в почвах ООПТ Ростовской области, Бк/кг /
Arithmetic means activities concentrations of natural radionuclides in soils of protected areas
in the Rostov Region, Bq/kg**

Тип почвы	Ауд, Бк/кг		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Темно-каштановая карбонатная мощная среднесуглинистая	29,1	33,5	585,2
Солонец каштановый корковый тяжелосуглинистый	27,8	38,0	647,5
Каштановая солонцеватая среднемощная тяжелосуглинистая почва	25,7	32,7	531,0
Чернозем южный карбонатный среднемощный среднесуглинистый щебнистый на элювии плотных пород	27,4	38,1	669,2
Чернозем обыкновенный карбонатный мощный	24,7	32,4	500,3
Чернозем обыкновенный карбонатный среднемощный тяжелосуглинистый	24,6	32,6	426,9
Чернозем обыкновенный карбонатный неполноразвитый на элювии известняков	21,3	24,2	333,5
Лугово-болотная почва	25,2	32,5	461,9
Лугово-черноземная тяжелосуглинистая	24,7	31,5	451,8
Солончак луговой корковый глинистый	23,5	24,1	385,5
Солончак корковый тяжелосуглинистый	23,3	25,4	362,1
Аллювиально-луговая глеевая тяжелосуглинистая	14,3	15,2	240,8

Все исследуемые почвы преимущественно тяжело- и среднесуглинистого гранулометрического состава и сформированы в основном на лессовидных суглинках (и глинах) (табл. 3). Исключение составляют почвы пойменных участков (на различных аллювиальных отложениях) и почвы на плотных породах (известняках и песчаниках). Минимальная удельная активность ЕРН фиксируется в аллювиально-луговых почвах (с высоким содержанием песка, песок обладает низкой сорбционной способностью и слабо удерживает радионуклиды).

Интразональные почвы, сформированные на аллювиальных отложениях (преимущественно песчаных), в том числе и солончаки корковые, а также неполноразвитые черноземы на элювии плотных осадочных пород, несмотря на глинистый и тяжелосуглинистый гранулометрический состав, также обладают пониженной удельной активностью ЕРН.

При этом строго подтвердить зависимость удельной активности ЕРН от типа почвы ООПТ Ростовской области не удастся вследствие как достаточно широких вариаций концентрации ЕРН в пределах одного КУ (размером 10×10 м), так и одного из важных недостатков метода – высокой инструментальной погрешности измерения удельной активности радионуклидов (до 20–40 %) [5–7]. Хотя инструментальную погрешность можно уменьшать корректированием методики измерения: увеличением времени набора гамма-спектра (увеличение времени измерения одной пробы) [7]. Но при массовых измерениях большого количества проб увеличение времени набора спектра не позволяет набирать достаточное количество статистического материала.

Заключение

Средняя удельная активность ЕРН в почвах ООПТ Ростовской области составляет 26,9 и 27,0 Бк/кг для ^{226}Ra и ^{232}Th соответственно. Данные значения можно использовать в качестве фоновых (эталонных) при оценке степени влияния промышленности и урбанизации на радиоактивность почвы.

Среднее арифметическое, медианное и модальное значения удельной активности ^{137}Cs составляют 21,7, 14,2 и 7,5 Бк/кг соответственно. Полученные в работе результаты по загрязнению Ростовской области радиоцезием существенно расширяют, дополняют и не противоречат официальным сведениям.

Список источников

1. Официальный портал правительства Ростовской области. URL: <https://www.donland.ru/> (дата обращения: 20.04.2022).
2. Безуглова О.С., Хырхырова М.М. Почвы Ростовской области. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2008. 352 с.
3. Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Почвы Юга России. Ростов н/Д.: Эверест, 2008. 276 с.
4. Чернова О.В., Безуглова О.С. Принципы и особенности создания Красных книг почв степных регионов (на примере Ростовской области) // Аридные экосистемы. 2018. Т. 24, № 1 (74). С. 40–51.
5. МВК № 1.5.2(45)-11. Методика контроля удельной активности грунта (почвы) с применением пробоотбора. 2011. Свидетельство № 45090.1К196.
6. Buraeva E.A., Davydov M.G., Zorina L.V., Stasov V.V. Components of the background of Ge(Li) and Ge detectors in passive shielding // Atomic Energy. 2007. Vol. 103, № 5. P. 895–900.
7. Bodrov I.V., Buraeva E.A., Davydov M.G., Mareskin S.A. Instrumental determination of uranium and thorium in natural objects // Atomic Energy. 2004. Vol. 96, № 4. P. 246–249.
8. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АС ПА Россия-Беларусь) / под ред. Ю.А. Израэля и И.М. Богдевича. М.; Минск: Инфосфера, НИА-Природа, 2009. 140 с.
9. Хелаль А.А., Арида Х.А., Ризк Х.Е., Халифа С.М. Взаимодействие цезия с гумусовым веществом: исследование методами радиометрии и ионметрии // Радиохимия. 2007. Т. 49, № 5. С. 458–463.
10. El-Arabi A.M. ^{226}Ra , ^{232}Th , and ^{40}K concentrations in igneous rocks from eastern desert, Egypt and its radiological implications // Radiation Measurements. 2007. Vol. 42, iss. 1. P. 94–100.
11. Давыдов М.Г., Буреаева Е.А., Зорина Л.В., Мальшевский В.С., Стасов В.В. Радиоэкология. Ростов н/Д.: Феникс, 2013. 635 с.
12. Линник В.Г. Ландшафтная дифференциация техногенных радионуклидов: геоинформационные системы и модели: дис. ... д-ра геогр. наук. М., 2008. 305 с.
13. Линник В.Г., Мироненко И.В., Волкова Н.И., Соколов А.В. Ландшафтно-биогеохимические факторы трансформации поля загрязнения Cs-137 в Брянской области // Геохимия. 2017. № 10. С. 891–906.

14. Gastberger M., Steinhäusler F., Gerzabek M., Lettner H., Hubmer A. Soil-to-plant transfer of fallout caesium and strontium in Austrian lowland and Alpine pastures // *J. Environ. Radioact.* 2000. Vol. 49. P. 217–233.
15. Staunton S., Dumat C., Zsolnay A. Possible role of organic matter in radiocaesium adsorption in soils // *J. Environ. Radioact.* 2002. Vol. 58. P. 163–173.

References

1. *Official portal of the Government of the Rostov region*. Available from: <https://www.donland.ru/> [Accessed 20th April 2022]. (In Russ.).
2. Bezuglova O.S., Khirkhyrova M.M. *Soils of the Rostov region*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2008. 352 p. (In Russ.).
3. 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.).
4. Chernova O.V., Bezuglova O.S. Principles and features of the creation of the Red Book of soils of the steppe regions (on the example of the Rostov region). *Aridnye ekosistemy = Arid Ecosystems*. 2018;24(1):40-51. (In Russ.).
5. *MVK No. 1.5.2(45)-11. Method for monitoring the specific activity of soil (soil) using sampling*. 2011. Certificate No. 45090.1K196. (In Russ.).
6. Buraeva E. A., Davydov M. G., Zorina L. V., Stasov V. V. Components of the background of Ge(Li) and Ge detectors in passive shielding. *Atomic Energy*. 2007;103(5):895-900.
7. Bodrov I.V., Buraeva E.A., Davydov M.G., Mareskin S.A. Instrumentational Determination of uranium and thorium in natural objects. *Atomic Energy*. 2004;96(4):246-249.
8. Israel Yu.A., Bogdevich I.M., eds. *Atlas of Modern and Forecast Aspects of the Consequences of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant in the Affected Territories of Russia and Belarus (AS PA Russia-Belarus)*. Moscow; Minsk: Infosfera, NIA-Priroda Publ.; 2009. 140 p. (In Russ.).
9. Helal A.A., Arida H.A., Rizk H.E., Khalifa S.M. Interaction of cesium with humic matter: a study by radiometry and ionometry. *Radiokhimiya = Radiochemistry*. 2007;49(5):458-463. (In Russ.).
10. El Arabi A.M. ²²⁶Ra, ²³²Th, and ⁴⁰K concentrations in igneous rocks from eastern desert, Egypt and its radiological implications. *Radiation Measurements*. 2007;42(1):94-100.
11. Davydov M.G., Buraeva E.A., Zorina L.V., Malyshevsky V.S., Stasov V.V. *Radioecology: a textbook*. Rostov-on-Don: Feniks Publ.; 2013. 635 p. (In Russ.).
12. Linnik V.G. *Landscape differentiation of technogenic radionuclides: geoinformation systems and models*. Dissertation. Moscow, 2008. 305 p. (In Russ.).
13. Linnik V.G., Mironenko I.V., Volkova N.I., Sokolov A.V. Landscape-biogeochemical factors of transformation of the Cs-137 pollution field in the Bryansk region. *Geokhimiya = Geochemistry*. 2017;(10):891-906.
14. Gastberger M., Steinhäusler F., Gerzabek M., Lettner H., Hubmer A. Soil-to-plant transfer of fallout caesium and strontium in Austrian lowland and Alpine pastures. *J. Environ. Radioact.* 2000;49:217-233.
15. Staunton S., Dumat C., Zsolnay A. Possible role of organic matter in radiocaesium adsorption in soils. *J. Environ. Radioact.* 2002;58:163-173.

Информация об авторах

Е.А. Буреаева – кандидат химических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт физики.

Н.В. Маломыжева – магистрант, кафедра физики наносистем и спектроскопии, физический факультет.

Д.А. Швецова – магистрант, кафедра физики наносистем и спектроскопии, физический факультет.

О.С. Безуглова – доктор биологических наук, профессор, кафедра почвоведения и оценки земельных ресурсов, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Иванковского.

Information about the authors

E.A. Buraeva - Candidate of Science (Chemistry), Associate Professor, Leading Researcher, Scientific Research Institute of Physics.

N.V. Malomyzheva - Master Student, Department of Physics of Nanosystems and Spectroscopy, Faculty of Physics.

D.A. Shvetsova - Master Student, Department of Physics of Nanosystems and Spectroscopy, Faculty of Physics.

O.S. Bezuglova - Doctor of Science (Biology), Professor, Department of Soil Science and Evaluation of Land Resources, Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology.

Статья поступила в редакцию 11.05.2022; одобрена после рецензирования 25.05.2022; принята к публикации 30.08.2022.
The article was submitted 11.05.2022; approved after reviewing 25.05.2022; accepted for publication 30.08.2022.

Научная статья
УДК 504.064+543.31
doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-45-61

МЕТАН И СЕРОВОДОРОД В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДОХРАНИЛИЩ И ПРУДОВ БАСЕЙНА АЗОВСКОГО МОРЯ

Дмитрий Николаевич Гарькуша^{1✉}, Юрий Александрович Фёдоров²

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

¹ gardim1@yandex.ru✉

² fedorov@sfedu.ru

Аннотация. Проведены газогеохимические исследования донных отложений и воды Соколовского, Грушевского, Артемовского, Веселовского, Пролетарского, Цимлянского водохранилищ и других запруженных водоемов. Концентрации CH_4 и ΣH_2S в отложениях изменяются в пределах от 0,02 до 61,3 мкг/г и от <0,01 до 8,36 мг/г влажного осадка соответственно. Наиболее высокие концентрации CH_4 наблюдаются в отложениях Артемовского, Цимлянского и Веселовского водохранилищ, а ΣH_2S – в отложениях Пролетарского, Цимлянского и Грушевского водохранилищ. Распределение CH_4 и ΣH_2S по вертикальному профилю отложений характеризуется, как правило, увеличением концентраций от поверхностного слоя к подповерхностным горизонтам, в которых фиксируется максимальный их пик, после чего концентрации снижаются. Отличием распределения ΣH_2S от распределения CH_4 является более частая фиксация максимальных концентраций ΣH_2S в менее глубоких слоях отложений. Содержание CH_4 в сумме изученных восстановленных газов (коэффициент метанизации K_{CH_4}) в отложениях варьирует от 0,004 до 11,1 %, что свидетельствует о существенном доминировании процесса сульфатредукции над процессом метаногенеза. Проанализирована теснота связей концентраций CH_4 и ΣH_2S между собой и величинами K_{CH_4} , pH и Eh отложений.

Ключевые слова: бассейн Азовского моря, водохранилища и пруды, донные отложения, окислительно-восстановительные условия, кислотно-щелочная обстановка, метан, сероводород, сульфидная сера, распределение

Благодарности: авторы благодарят старшего научного сотрудника лаборатории методов и технических средств анализа вод Гидрохимического института Н.С. Тамбиеву за определение концентраций CH_4 и ΣH_2S .

Исследование выполнено по гранту Российского научного фонда № 22-27-00671, <https://rscf.ru/project/22-27-00671/> в Южном федеральном университете.

Для цитирования: Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А. Метан и сероводород в донных отложениях водохранилищ и прудов бассейна Азовского моря // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 3. С. 45–61.

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

Original article

METHANE AND HYDROGEN SULFIDE IN BOTTOM SEDIMENTS OF RESERVOIRS AND PONDS OF THE AZOV SEA BASIN

Dmitry N. Gar'kusha^{1✉}, Yury A. Fedorov²

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

¹ gardim1@yandex.ru✉

² fedorov@sfedu.ru

© Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., 2022

Abstract. Gas-geochemical studies of bottom sediments and water of Sokolovsky, Grushevsky, Artemovsky, Veselovsky, Proletarsky, Tsimlyansky reservoirs and other dammed reservoirs were carried out. Concentrations of CH_4 and ΣH_2S in sediments vary from 0.02 to 61.3 $\mu\text{g/g}$ and from <0.01 to 8.36 mg/g of wet sediment, respectively. The highest concentrations of CH_4 are observed in the deposits of the Artemovsky, Tsimlyansky and Veselovsky reservoirs, and ΣH_2S – in the deposits of the Proletarian, Tsimlyansky and Grushevsky reservoirs. The distribution of CH_4 and ΣH_2S along the vertical profile of sediments is characterized, as a rule, by an increase in concentrations from the surface layer to the subsurface horizons, in which their maximum peak is recorded, after which the concentrations decrease. The difference between the distribution of ΣH_2S and the distribution of CH_4 is the more frequent fixation of maximum concentrations of ΣH_2S in less deep layers of sediments. The percentage of CH_4 from the sum of the studied reduced gases (the coefficient of methanization of K_{CH_4}) in sediments varies from 0.004 to 11.1 %, which indicates a significant dominance of the process of sulfate reduction over the process of methanogenesis. The closeness of the relationships of the concentrations of CH_4 and ΣH_2S between themselves and the values of K_{CH_4} , pH and Eh deposits is analyzed.

Keywords: Azov Sea basin, reservoirs and ponds, bottom sediments, redox conditions, acid-base environment, methane, hydrogen sulfide, sulfide sulfur, distribution

Acknowledgments: the authors thank senior researcher of the laboratory of Methods and Technical Means of Water analysis of the Hydrochemical Institute Tambieva N.S. for determining concentrations of CH_4 and ΣH_2S .

Research was financially supported by Russian Science Foundation No. 22-27-00671, <https://rscf.ru/project/22-27-00671/>, in Southern Federal University.

For citation: Gar'kusha D.N., Fedorov Y.A. Methane and Hydrogen Sulfide in Bottom Sediments of Reservoirs and Ponds of the Azov Sea Basin. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(3):45-61. (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

Метан и сероводород являются восстановленными газами, образующимися на конечных стадиях разложения органического вещества в гидросфере, педосфере и верхней части литосферы. Эти газы играют важную роль в круговороте углерода и серы в природе [1, 2], а метан является также одним из наиболее значимых парниковых газов, поглощающая способность которого во много раз превышает таковую углекислого газа [3–5].

Генерация метана (CH_4) в донных отложениях осуществляется в основном метанобразующими археями (метаногенами), которые населяют анаэробные слои и используют ограниченное количество субстратов (H_2 , CO_2 , ацетат, метанол, формиат, метиламины) [6–8]. Сероводород (H_2S) образуется вследствие протекания процесса сульфатредукции, осуществляемого сульфатредуцирующими бактериями, которые используют кислород сульфатов для анаэробного окисления низкомолекулярных органических веществ (ацетат, пропионат, бутират, лактат, пируват, малат, фумарат, сахар, этанол, пропанол, метанол) до CO_2 и сопряженного восстановления серы сульфатов до сульфида (сероводород) [1, 2, 9, 10]. Наиболее благоприятные условия для процессов метаногенеза и сульфатредукции складываются в верхних горизонтах мелководных иловых отложений водных объектов, характеризующихся повышенной концентрацией органического вещества и низким окислительно-восстановительным потенциалом [2, 6, 11, 12].

Сульфатредукторы и метаногены, занимая одни и те же экологические ниши [12–14], нередко используют одни и те же питательные субстраты, в частности ацетат, формиат и молекулярный водород. Поэтому между ними за обладание этими субстратами возникает конкурентная борьба, преимущество в которой принадлежит бактериям-сульфатредукторам [15]. Исследования [12, 16, 17] показали, что в пределах нескольких десятков сантиметров для океанических и морских акваторий обычно характерно обратное распределение содержаний CH_4 и H_2S и скоростей их образования по вертикали донных осадков, что хорошо согласуется с представлениями об ингибировании процесса метаногенеза сульфатредукцией. В то же время в отдельных случаях данная закономерность не проявляется. Нередко, наряду с обратной, наблюдается и прямая связь между концентрациями CH_4 и H_2S [11, 13, 17, 18].

В настоящее время в научной литературе работы, направленные на одновременное изучение закономерностей формирования уровня концентраций и распределения CH_4 и H_2S в донных отложениях, касаются в основном морских и озерных экосистем [9, 12, 18–24], в то время как работы, посвященные процессам сопряженной генерации и распределения этих газов в донных отложениях водотоков, водохранилищ и прудов, единичны [11, 13, 17, 25].

В настоящей статье рассматриваются результаты сопряженного изучения распределения концентраций CH_4 и H_2S в донных отложениях водохранилищ и прудов бассейна Азовского моря.

Объекты, материалы и методы исследования

В летне-осенний период (июнь – октябрь) в бассейне Азовского моря проведены исследования Соколовского, Артемовского, Грушевского, Цимлянского, Веселовского и Пролетарского водохранилищ и других запруженных водоемов (рис. 1, таблица).

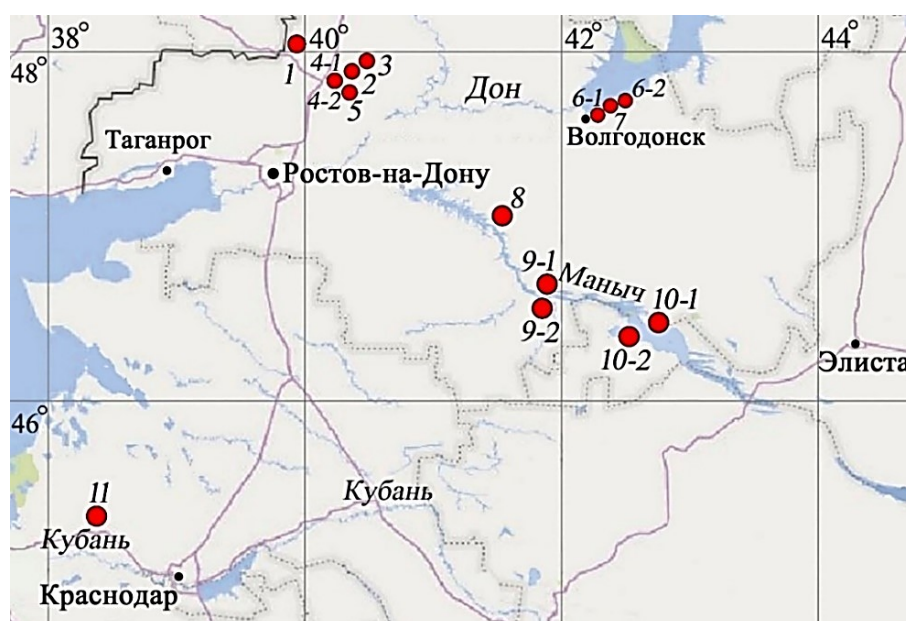


Рис. 1. Местоположение станций наблюдения в исследованных водохранилищах и прудах бассейна Азовского моря: 1 – Соколовское водохранилище; 2 – Грушевское водохранилище; 3 – Артемовское водохранилище; 4-1 и 4-2 – пруд-отстойник шахты «Южная»; 5 – пруд-аэратор шахты «Аютинская»; 6-1 и 6-2 – Цимлянское водохранилище; 7 – водоем-охладитель Ростовской АЭС; 8 – рисовый чек; 9-1 и 9-2 – Веселовское водохранилище; 10-1 и 10-2 – Пролетарское водохранилище; 11 – пруд лотосов

Fig. 1. Location of observation stations in the studied reservoirs and ponds of the Azov Sea basin:
1 - Sokolovskoye reservoir; 2 - Grushevskoye reservoir; 3 - Artemovskoye reservoir; 4-1 and 4-2 - sedimentation pond of the Yuzhnaya mine; 5 - aerator pond of the Ayutinskaya mine; 6-1 and 6-2 - Tsimlyanskoye reservoir; 7 - cooling reservoir of the Rostov NPP; 8 - rice check; 9-1 and 9-2 - Veselovskoye reservoir; 10-1 and 10-2 - Proletarskoye reservoir; 11 - Lotus pond

Водохранилищами принято считать искусственно созданные котловинные и естественные озерные водоемы с замедленным водообменом, полным объемом более 1 млн м³, уровень которых постоянно регулируется (контролируется) гидротехническими сооружениями в целях накопления и последующего использования запасов вод для удовлетворения хозяйственных и социальных потребностей [26]. Водохранилища – это антропогенные, управляемые человеком объекты, но испытывающие и сильнейшее воздействие природных факторов, поэтому как объекты изучения, использования и управления они занимают промежуточное положение между чисто природными и чисто техническими образованиями. У водохранилищ нет природных аналогов, поскольку процессы трансформации вещества и энергии в них имеют иные, чем в озерах и реках, масштабы, направленность, интенсивность и длительность, что выражается в показателях качества воды, в структуре и продуктивности водных экосистем [26].

Соколовское (Киселевское) водохранилище, расположенное на территории Ростовской области, сооружено в 1930–1945 гг. на реке Кундрючья и служит для питьевого водоснабжения городов Новошахтинск и Красный Сулин. Водоём вытянутый, длина – более 8 км, ширина – до 600 м, площадь водного зеркала – 3,2 км². Глубина плавно увеличивается от 3 м в районе села Киселево до 10 м в районе плотины, расположенной в Соколово-Кундрюченском микрорайоне г. Новошахтинска.

Результаты экспедиционных исследований водохранилищ и прудов бассейна Азовского моря /
Results of expedition studies of reservoirs and ponds of the Azov Sea basin

Водный объект	№ станции и ее местоположение	Координаты, с.ш/в.д. (месяц проведения исследования)	Вода	Донные отложения						
			Температура, °С / CH ₄ , мкл/дм ³	Горизонт отбора проб, см	Eh, мВ	pH	CH ₄ , мкг/г	ΣH ₂ S, мг/г	KCH ₄ , %	Визуальное описание донных отложений
Соколовское водохранилище на р. Кундрючья (правый приток р. Северский Донец, система р. Дон)	Станция 1, в 10–15 м от уреза воды, глубина до 1 м. Ростовская область, г. Новошахтинск	47°50'41.92" / 39°55'06.19" (август)	24,0 21,5	0–2	–138,5	7,00	0,97	0,96	0,10	Темно-серый, местами коричневатый (элементы почвы) влажный ил
				2–5	–174,5	6,47	0,84	0,47	0,18	Темно-серый ил, более плотный, с небольшой примесью песчаного материала
				5–10	–179,0	7,29	3,97	0,16	2,42	То же, более плотный
				10–15	–117,0	7,12	0,53	0,01	5,03	То же, с примесью песчаного материала и обломков раковин моллюсков до 10–15 %
Грушевское водохранилище на р. Грушевка (левый приток р. Тузлов, система р. Дон)	Станция 2, в 1–2 м от уреза воды, глубина до 1 м. Ростовская область, г. Шахты	47°43'11.19" / 40°15'21.87" (август)	25,0 3,4–75,9 (n = 2)	0–2	–230,0	7,79	0,16	3,88	0,004	Серые и темно-серые плотные илы с растительными остатками 5–10 %
				2–5	–174,6	7,72	0,22	3,60	0,01	Серые и темно-серые очень плотные илы с примесью песчаного материала 5–10 %
				5–10	–155,0	7,36	0,19	4,02	0,005	То же
				10–15	–137,5	7,01	0,18	0,74	0,02	То же
Артемовское водохранилище на р. Грушевка (левый приток р. Тузлов, система р. Дон)	Станция 3, в 5 м от уреза воды, глубина до 1 м. Ростовская область, г. Шахты	47°45'45.27" / 40°17'40.22" (октябрь)	12,0 1,05	0–2	–50,0	7,45	9,33	1,08	0,86	Темно-серый и черный влажный глинистый ил с растительными остатками
				2–5	–113,0	7,55	12,1	0,77	1,55	То же, но более плотный
				5–10	–50,0	7,59	14,8	0,49	2,93	То же, но более плотный
				10–15	–135,0	7,80	21,2	0,52	3,92	То же, но более плотный
				15–20	–170,0	7,58	16,4	0,21	7,24	То же, но более плотный
Пруд-отстойник шахты «Южная»	Станция 4-1, в 2–3 м от уреза воды, глубина до 1 м. Ростовская область, г. Шахты	47°41'25.83" / 40°08'05.06" (август)	23,9 5,8–80,8 (ср. 38,1; n = 3)	0–2	–114,0	8,17	0,17	1,86	0,01	Темно-серый и черный глинистый ил
				2–5	–155,0	7,77	0,51	0,95	0,05	То же
				5–10	–229,0	7,41	0,39	0,57	0,07	То же
				10–15	–221,0	7,80	0,49	1,35	0,04	То же
Станция 4-2, в 1–2 м от уреза воды, глубина до 1 м. Ростовская область, г. Шахты	47°41'25.83" / 40°08'05.06" (октябрь)	10,0 1,0	0–2	–116,0	7,27	0,44	2,03	0,02	Черный маслянистый глинистый ил с растительными остатками. Запах H ₂ S	
			2–5	–288,0	7,37	0,25	2,89	0,01	То же	
			5–10	–315,0	7,38	0,50	2,62	0,02	То же	

Продолжение таблицы

Водный объект	№ станции и ее местоположение	Координаты, с.ш/в.д. (месяц проведения исследования)	Вода	Донные отложения						Визуальное описание донных отложений
			Температура, °С / СН ₄ , мкл/дм ³	Горизонт отбора проб, см	Eh, мВ	pH	СН ₄ , мкг/г	ΣH ₂ S, мг/г	K _{СН₄} , %	
Пруд-аэртор шахты «Аютинская»	Станция 5, в 2–3 м от уреза воды, глубина до 0,5 м. Ростовская область, г. Шахты	47°38'44.68" / 40°10'42.37" (октябрь)	6,0 / 0,4	0–2	103,0	7,68	0,10	<0,01	>0,99	Черный сильно мажущийся ил, состоящий из тонкозернистых частиц угля
				2–5	201,0	7,68	0,16	<0,01	>1,57	То же
				5–10	204,0	7,32	0,15	<0,01	>1,48	То же
				10–15	186,0	7,6	0,15	<0,01	>1,48	То же
				15–20	162,0	7,37	0,22	<0,01	>2,15	То же
				20–25	146,7	7,55	0,27	<0,01	>2,63	То же
Цимлянское водохранилище на р. Дон	Станция 6-1, в 3 м от уреза воды, глубина до 0,7 м. Ростовская область, г. Волгодонск	47°31'51.85" / 42°10'11.07" (июль)	27,0 / 53,9	0–5	–	–	30,4	0,37	7,59	Серый влажный ил
				5–10	–	–	51,2	4,62	1,10	Серый ил с черными примазками (гидротроилит)
				10–15	–	–	49,3	4,14	1,18	То же
				15–20	–	–	3,64	2,48	0,15	Коричнево-серый ил с черными примазками
				20–25	–	–	2,44	0,07	3,37	Коренные светло-коричневые суглинки
	Станция 6-2, в 5 м от уреза воды, глубина до 0,7 м. Ростовская область, к северо-востоку от г. Волгодонска, в 1–2 км от п. Хорсеев	47°37'54.46" / 42°26'50.17" (июль)	–	0–5	–	–	0,12	0,12	0,10	Серо-коричневый заиленный песок
				5–10	–	–	1,32	0,30	0,44	Темно-серый заиленный песок с примесью гравия
				10–15	–	–	3,35	1,83	0,18	Темно-серый заиленный песок
				15–20	–	–	2,14	0,08	2,61	Темно-серый заиленный песок с включениями целых раковин моллюсков
				20–25	–	–	2,52	0,32	0,78	Светло-коричневый заиленный крупнозернистый песок с включениями гравия
				25–30	–	–	1,18	0,98	0,12	Светло-коричневый заиленный песок
				30–35	–	–	0,66	<0,01	>6,19	Светло-коричневый песчаный ил
				35–40	–	–	0,29	0,23	0,13	Темно-коричневый заиленный песок
				40–45	–	–	0,16	<0,01	>1,57	Коренные суглинки с примазками серой глины
Водоем-охладитель Ростовской АЭС	Станция 7, в 1–2 м от уреза воды, глубина до 0,7 м. Ростовская область, восточнее г. Волгодонска	47°35'2.65" / 42°21'44.82" (июль)	30,5 / 44,4	0–2	–	–	0,22	0,40	0,05	Темно-серый заиленный песок
				2–11	–	–	0,59	0,10	0,59	Серовато-коричневый песок
				11–16	–	–	0,05	<0,01	>0,50	Серый песок
				16–20	–	–	0,06	<0,01	>0,60	Светло-серый песок с ржавыми включениями
				20–25	–	–	0,05	<0,01	>0,50	Серый песок с примазками коричневой глины
Рисовый чек, наполняемый из р. Западный Маныч (левый приток р. Дон)	Станция 8, в 7 м от уреза воды, глубина до 0,1 м. Ростовская область, в 1 км от х. Валуиский	47°01'34.62" / 41°21'22.39" (июнь)	31,0 / 0,9–1,3 (n=2)	0–2	168,6	7,6	0,07	<0,01	>0,70	Темно-каштановые затопленные почвы
				2–5	108,2	7,5	0,05	<0,01	>0,50	То же
				5–10	6,4	7,5	0,06	<0,01	>0,60	То же

Окончание таблицы

Водный объект	№ станции и ее местоположение	Координаты, с.ш./в.д. (месяц проведения исследования)	Вода	Донные отложения						
			Температура, °С / CH ₄ , мкл/дм ³	Горизонт отбора проб, см	Eh, мВ	pH	CH ₄ , мкг/г	ΣH ₂ S, мг/г	K _{CH₄} , %	Визуальное описание донных отложений
Веселовское водохранилище на р. Западный Маныч (левый приток р. Дон)	Станция 9-1, в 1–2 м от уреза воды, глубина до 1 м, верховье водохранилища, левый берег р. Чепрак (левый приток р. Западный Маныч). Ростовская область, ниже г. Пролетарска	46°41'11.30"/41°39'49.50" (октябрь)	–	0–2	–	–	2,20	0,22	0,99	Темно-серый глинистый ил с обломками раковин и растительными остатками
				2–5	–	–	25,3	0,34	6,93	То же
				5–10	–	–	20,3	0,43	4,51	То же
				10–15	–	–	61,3	0,49	11,1	То же
				15–20	–	–	15,4	0,86	1,76	То же
				25–30	–	–	12,9	0,78	1,63	Темно-серый глинистый ил
				30–35	–	–	4,30	1,71	0,25	То же
				35–40	–	–	0,20	1,34	0,01	То же
				40–45	–	–	0,24	1,55	0,02	То же
				45–50	–	–	0,20	1,23	0,02	То же
				50–55	–	–	0,35	1,37	0,03	То же
Станция 9-2, в 1–2 м от уреза воды, глубина до 1 м, верховье водохранилища, левый берег р. Западный Маныч. Ростовская область, ниже пос. Маньчстрой	46°38'46.00"/41°37'31.40" (октябрь)	–	0–2	–	–	0,14	0,30	0,05	Темно-серый и черный влажный ил с примесью песка и растительных остатков	
			2–7	–	–	0,31	1,22	0,03	Черный ил с обломками раковин моллюсков	
			7–15	–	–	2,24	0,07	3,10	Серая глина	
			15–20	–	–	0,08	0,19	0,04	Темно-серый ил с песком	
			20–25	–	–	0,08	0,33	0,02	То же	
			25–30	–	–	0,02	0,26	0,01	То же	
			30–35	–	–	0,03	0,03	0,10	То же	
Пролетарское водохранилище на р. Западный Маныч (левый приток р. Дон)	Станция 10-1, в 15 м от уреза воды, глубина до 0,1 м, северный берег. Ростовская область	46°24'24.53"/42°42'6.90" (сентябрь)	15,0 –	0–2	–	–	0,09	0,64	0,01	Черный влажный ил с включениями растительных остатков
				2–5	–	–	0,13	1,36	0,01	Черно-бурый влажный ил с включениями глины и растительных остатков
				5–10	–	–	0,06	0,02	0,30	Бурая плотная, пластичная глина
Станция 10-2, в 3 м от уреза воды, глубина до 0,1 м, южный берег. Республика Калмыкия	46°20'53.31"/42°31'58.63" (сентябрь)	–	0–2	–	–	3,88	5,48	0,07	Черный плотный, маслянистый, пластичный ил с сильным запахом H ₂ S	
			2–5	–	–	1,29	8,36	0,02	То же	
			5–10	–	–	0,69	6,00	0,01	То же, но с большим количеством растительных остатков	
			10–15	–	–	0,44	6,71	0,01	То же	
			15–20	–	–	0,50	5,83	0,01	То же	
Пруд лотов, заполненный водой из Ангелинского ерика (система р. Кирпили)	Станция 11, в 0,5 м от уреза воды, глубина до 0,6 м. Краснодарский край, станция Старонижестеблиевская	45°22'58.00"/38°26'14.04" (август)	25,0 226,0–286,0 (n=2)	0–2	–	–	6,60	0,87	0,75	Черный глинистый ил с растительными остатками, древесным и гравийным материалом
				2–5	–	–	3,90	5,00	0,08	Черный более плотный, маслянистый, глинистый ил
				5–9	–	–	4,10	1,60	0,26	То же
				9–12	–	–	5,80	0,56	1,03	То же
				12–16	–	–	7,90	0,46	1,69	Более рыхлый песчано-алевритопелитовый ил

Грушевское водохранилище (или став хлопчатобумажного комбината), расположенное на территории Ростовской области, сооружено в 1985 г. путем перегораживания дамбой реки Грушевка с целью создания зоны отдыха в районе поселка Текстильщики г. Шахты. Протяженность водохранилища составляет около 2 км, ширина – до 330 м и площадь водного зеркала – 351 тыс. м². С распадом СССР зона отдыха оказалась заброшенной. В ходе реконструкции и ремонта дамбы в 2007 г. вода из водоема была спущена, а в 2008 г. водохранилище вновь наполнили водой.

Артёмовское водохранилище, расположенное на территории Ростовской области, построено в 1929 г. на реке Грушевка в южной окраине г. Шахты для охлаждения турбин Шахтинской ГРЭС им. Артёма. Водоем перегорожен посередине плотиной со шлюзами. Общая длина – около 3 км, ширина – до 300 м, площадь водного зеркала – 545 тыс. м². Правый берег скалистый, покрыт в основном травянистой растительностью и прорезан по всей длине балками и оврагами. На более пологом левом берегу преобладает лесной массив. Здесь располагается неорганизованная зона отдыха.

Цимлянское водохранилище, расположенное на территории Ростовской и Волгоградской областей, образовано плотиной Цимлянской ГЭС на р. Дон как составная часть Волго-Донского водного пути. Заполнение водохранилища происходило в течение 1952–1955 гг. Площадь водохранилища составляет 2700 км², объем – 23,8 км³, длина – 280 км, ширина – до 38 км, глубина – до 28 м [27]. На месте устьевых участков основных притоков Дона – рек Цимла, Чир, Аксай и др. – образовались заливы шириной до 5 км и длиной 15–30 км. Помимо орошения и рыбного хозяйства, водохранилище осуществляет многолетнее регулирование стока р. Дон. На его берегах расположены города Калач-на-Дону, Цимлянск, Волгодонск. Наименьший уровень воды в Цимлянском водохранилище отмечается с декабря по март, наибольший – с мая по июль, что обусловлено режимом наполнения и сброски водохранилища.

Веселовское водохранилище, расположенное на территории Ростовской области, является источником орошения Манычской и Азовской оросительных систем и внесистемных участков. Водохранилище образовано путем затопления пойменной и частично надпойменной террасы долины р. Западный Маныч. Строительство Веселовского гидроузла с плотиной, шлюзом и водохранилищем завершено в 1933 г., а полное его наполнение произошло в 1942 г. [27]. Площадь зеркала водохранилища составляет 279 км², длина – 100 км, ширина – до 7 км, глубина – до 7–8 м [27]. Его питание осуществляется из западного отсека Пролетарского водохранилища, донской водой из ДМК по Садковскому сбросу и из Пролетарского канала по Ельмутинскому сбросу. Также в водохранилище поступают возвратные воды с Пролетарской и Манычской оросительных систем. При Веселовской плотине имеется судоходный шлюз, донный водовыпуск и ГЭС, которая в настоящее время не работает. Помимо орошения, водохранилище построено для многолетнего регулирования стока р. Западный Маныч, судоходства (шлюзования) и рыбного хозяйства.

Пролетарское водохранилище, расположенное на территории Ростовской области, Ставропольского края и Республики Калмыкии, является верхним и наибольшим среди каскада водохранилищ в долине р. Западный Маныч. Плотина водохранилища построена в 1938 г., а полное завершение строительства Пролетарского гидроузла с плотиной и судоходным шлюзом произошло в 1960 г. путем затопления и соединения между собой ряда озер Манычской впадины, в том числе озера Маныч-Гудило [27]. Непосредственно выше устья р. Большой Егорлык расположена Ново-Манычская дамба, разделяющая Пролетарское водохранилище на западный и восточный отсеки. Восточный отсек представляет собой водоем, сохраняющий в основном морфометрические характеристики озера Маныч-Гудило, которое является наиболее крупным водоемом каскада, длиной – 175 км, шириной – до 10 км и площадью водного зеркала – 700 км². Западный отсек Пролетарского водохранилища по своим размерам наименьший в каскаде. Его длина – около 19 км, ширина – до 2 км и площадь водного зеркала – 35 км². Он занимает командное положение над всем каскадом, через этот отсек проходит большая часть приточных вод. Поступление воды из западного отсека в восточный (оз. Маныч-Гудило) в настоящее время прекращено, хотя технические возможности для этого имеются. Из западного отсека в Веселовское водохранилище вода поступает через донный водовыпуск и судоходный шлюз. Западный отсек используется для орошения, судоходства и рыбного хозяйства.

Водоем-охладитель Ростовской АЭС, наполняемый водами Цимлянского водохранилища, – это молодой водоем, образованный в 1980–2000 гг. путем отсечения части Цимлянского водохранилища земляной дамбой. Площадь зеркала водоема составляет 18 км², длина – 8,3 км, ширина – до 3 км, максимальная глубина – до 6 м.

Рисовый чек, входящий в состав рисового массива предприятия ООО «Энергия» (пос. Валуйский Пролетарского района Ростовской области), наполняется водами р. Западный Маныч в апреле-мае, а спускается в середине сентября. Его длина – около 200 м, ширина – 150 м и площадь водного зеркала – 30,5 тыс. м². Затопливаемые почвы рисового массива представляют собой солонцеватые разности темно-каштановых почв.

Пруд лотосов, расположенный в станице Старонижестеблиевской Краснодарского края, наполняется водой из Ангелинского ерика, входящего в систему реки Кирпили, которая впадает в Кирпильский лиман Азовского моря. Площадь зеркала пруда составляет 14 тыс. м², длина – до 200 м и ширина – до 100 м.

Пруд-отстойник шахты «Южная» расположен на юго-восточной окраине г. Шахты Ростовской области. Его длина – около 125 м, ширина – 68 м и площадь водного зеркала – 7,1 тыс. м². На большей площади прибрежной зоны отстойника каменистое дно. В период исследования наблюдалось активное цветение ряски, покрывающей до 30–35 % площади водоема.

Пруд-аэратор шахты «Аютинская» расположен на южной окраине г. Шахты. Длина пруда-аэратора – около 46 м, ширина – 42 м и площадь водного зеркала – 1,6 тыс. м². Его большая часть в период исследования высохла и заросла тростником. Поверхностный слой илов, оголившихся в результате осушения пруда-аэратора, практически повсеместно покрыт белым налетом солей толщиной от 1 до 3 мм. Высохшие черные илы, состоящие из тонких частиц угля, имеют слоистое строение и легко раскалываются на слои.

В ходе исследований водохранилищ и прудов, помимо метана (СН₄) и общего содержания сульфидной серы (далее – суммарного сероводорода ΣН₂С), в отдельных водных объектах в различных горизонтах (до 55 см) донных отложений определены значения Eh и рН. Пробы донных отложений отбирали в основном в прибрежных участках с глубинами до 1 м с помощью специально сконструированной трубки с остро заточенными краями и фторопластовым поршнем для выдавливания керна.

Для характеристики сопряженного распределения СН₄ и ΣН₂С в донных отложениях впервые использован коэффициент метанизации, представляющий собой процентное содержание СН₄ в сумме концентраций (мг/г) восстановленных газов – ΣН₂С и СН₄.

Отбор, транспортировка, хранение проб и последующее определение СН₄ и ΣН₂С проводили согласно аттестованным методикам, описанным в работах [17, 18]. Определение метана выполняли на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» с дозатором равновесного пара на пламенно-ионизационном детекторе. Выполнение измерений массовой доли ΣН₂С основано на переводе сульфидов донных отложений в сероводород действием соляной кислоты и последующей отдувке сероводорода азотом особой чистоты в раствор гидроксида натрия и определении сульфид-ионов фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамином. При этом в общее содержание сульфидной серы входят как растворенные в поровой воде сероводород и сульфиды щелочных металлов, так и сульфиды, содержащиеся в твердой фракции, которые представляют собой кислоторастворимые сульфиды железа и тяжелых металлов, нерастворимые в воде. Определение газов производилось в донных отложениях при их естественной влажности и выражалось в мкг/г и мг/г влажного осадка (вл. о.) соответственно для метана и сероводорода. Определение величин Eh и рН выполнено с помощью электродов портативного рН-метра, иономера «Экотест-2000» сразу после отбора проб.

Результаты исследования и их обсуждение

Температура воды в водохранилищах и прудах в период наблюдений (июнь – октябрь) варьировалась в диапазоне от 6 до 31 °С, с минимальными значениями, зафиксированными в октябре, в пруду-отстойнике шахты «Южная» и пруду-аэраторе шахты «Аютинская» (таблица). Концентрации СН₄ в воде исследованных водоемов варьируются от 0,4 до 80,8 мкл/дм³ (в среднем 24,5 мкл/дм³), с максимальными значениями, наблюдаемыми в летний период, в

пруду-отстойнике шахты «Южная», в Грушевском и Цимлянском водохранилищах и минимальными – в осенний период – в Артемовском водохранилище и пруду-аэраторе шахты «Аютинская».

Донные отложения исследованных участков водохранилищ и прудов представлены преимущественно темно-серыми до черного илисто-песчаными отложениями, для которых характерны нейтральная или слабощелочная среда (рН – от 6,47 до 8,17, в среднем 7,50) и восстановительные условия (Eh – от –315,0 до –50,0 мВ, в среднем –163,1 мВ). Исключением являются затопленные почвы рисового чека, а также отложения пруда-аэратора шахты «Аютинская», представленные тонкими обломками частиц угля, в которых наблюдаются окислительные условия (Eh – от +6,4 до +204,0 мВ, в среднем +142,9 мВ) (таблица). Следует отметить, что наблюдения на рисовых чеках проводились спустя месяц после их заполнения водой (в фазу полных всходов риса – 2–3 листа). В то же время, по данным не вошедших в настоящую статью наблюдений в сентябре, перед уборкой риса (в фазу полной спелости) значения Eh в верхнем 0–15 см слое затопленных почв заметно снизились до –114,4...+13,1 мВ (в среднем –74,0 мВ; количество определений $n = 4$).

Концентрации CH_4 в донных отложениях водохранилищ и прудов бассейна Азовского моря изменяются в пределах от 0,02 до 61,3 мкг/г влажного осадка (среднее значение – 5,26 мкг/г, медиана – 0,50 мкг/г), что согласуется с данными по диапазону варьирования и средним концентрациям CH_4 в водохранилищах Волги, Камы и Кубани [11]. Концентрации $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ варьируются в пределах от <0,01 до 8,36 мг/г влажного осадка (среднее значение – 1,28 мг/г, медиана – 0,49 мг/г). В целом в отложениях исследованных водохранилищ наблюдаются достаточно высокие концентрации данных газов, свидетельствующие об интенсивных процессах анаэробного распада органического вещества и активно протекающих процессах метаногенеза и сульфатредукции [11, 13, 17, 23].

Наиболее высокие концентрации CH_4 наблюдаются (таблица, рис. 2) в Артемовском (до 21,2 мкг/г, в среднем 14,8 мкг/г), Цимлянском (до 51,2 мкг/г, в среднем 10,6 мкг/г) и Веселовском (до 61,3 мкг/г, в среднем 8,09 мкг/г) водохранилищах. Несколько меньшие концентрации зафиксированы в пруду лотосов (до 7,90 мкг/г, в среднем 5,66 мкг/г), Соколовском (до 3,97 мкг/г, в среднем 1,58 мкг/г) и Пролетарском (до 3,88 мкг/г, в среднем 0,89 мкг/г) водохранилищах. В остальных водоемах концентрации CH_4 не превышают 0,59 мкг/г, составляя в среднем от 0,06 до 0,39 мкг/г, с минимальными значениями в затопленных почвах рисовых чеков.

Наиболее высокие концентрации $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ наблюдаются в отложениях Пролетарского (до 8,36 мг/г, в среднем 4,03 мг/г), Цимлянского (до 4,62 мг/г, в среднем 1,11 мг/г) и Грушевского (до 4,02 мг/г, в среднем 3,06 мг/г) водохранилищ, пруда лотосов (до 5,0 мг/г, в среднем 1,70 мг/г) и пруда-отстойника шахты «Южная» (до 2,89 мг/г, в среднем 1,75 мг/г). Несколько меньшие концентрации $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ отмечены в отложениях Веселовского (до 1,71 мг/г, в среднем 0,71 мг/г), Артемовского (до 1,08 мг/г, в среднем 0,61 мг/г) и Соколовского (до 0,96 мг/г, в среднем 0,40 мг/г) водохранилищ. Минимальные концентрации $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ (менее 0,01 мг/г) зафиксированы в обедненных органикой черных мажущихся илах пруда-аэратора шахты «Аютинская», сложенных тонкозернистыми углистыми частицами, а также в затопленных водой почвах рисовых чеков. Отложения данных водоемов характеризуются окислительными условиями среды, что обуславливает низкие скорости анаэробных процессов, в том числе сульфатредукции и метаногенеза, и, как следствие, самые низкие концентрации как $\Sigma\text{H}_2\text{S}$, так и CH_4 .

Распределение метана по вертикальному профилю изученных отложений характеризуется, как правило, увеличением его концентраций от поверхностного 0–2 см слоя к более нижним слоям, в которых фиксируется максимальный пик (чаще в слоях 5–10 и 10–15 см) концентраций CH_4 , после чего они снижаются, в том числе нередко и до минимальных значений (рис. 3). Последнее связывается нами с уменьшением лабильности органического вещества вниз по разрезу донных отложений.

Подобное распределение по вертикали изученных отложений характерно и для концентраций $\Sigma\text{H}_2\text{S}$. Некоторым отличием от распределения CH_4 является частая фиксация максимальных пиков концентраций $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ в менее глубоких горизонтах отложений – в 2–5 см, а нередко и в слое 0–2 см.

Такое распределение концентраций CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ по вертикальному профилю отложений обусловлено, с одной стороны, распределением в них окислительно-восстановительных условий, зависящих главным образом от концентрации в придонном горизонте воды растворенного кислорода и интенсивности процессов распада органических веществ в отложениях. В условиях нормальной аэрации исследованных нами водохранилищ и прудов, характеризующихся в основном отсутствием дефицита кислорода у дна, в поверхностном слое отложений, как правило, преобладают аэробные процессы, а в более глубоких горизонтах – анаэробные.

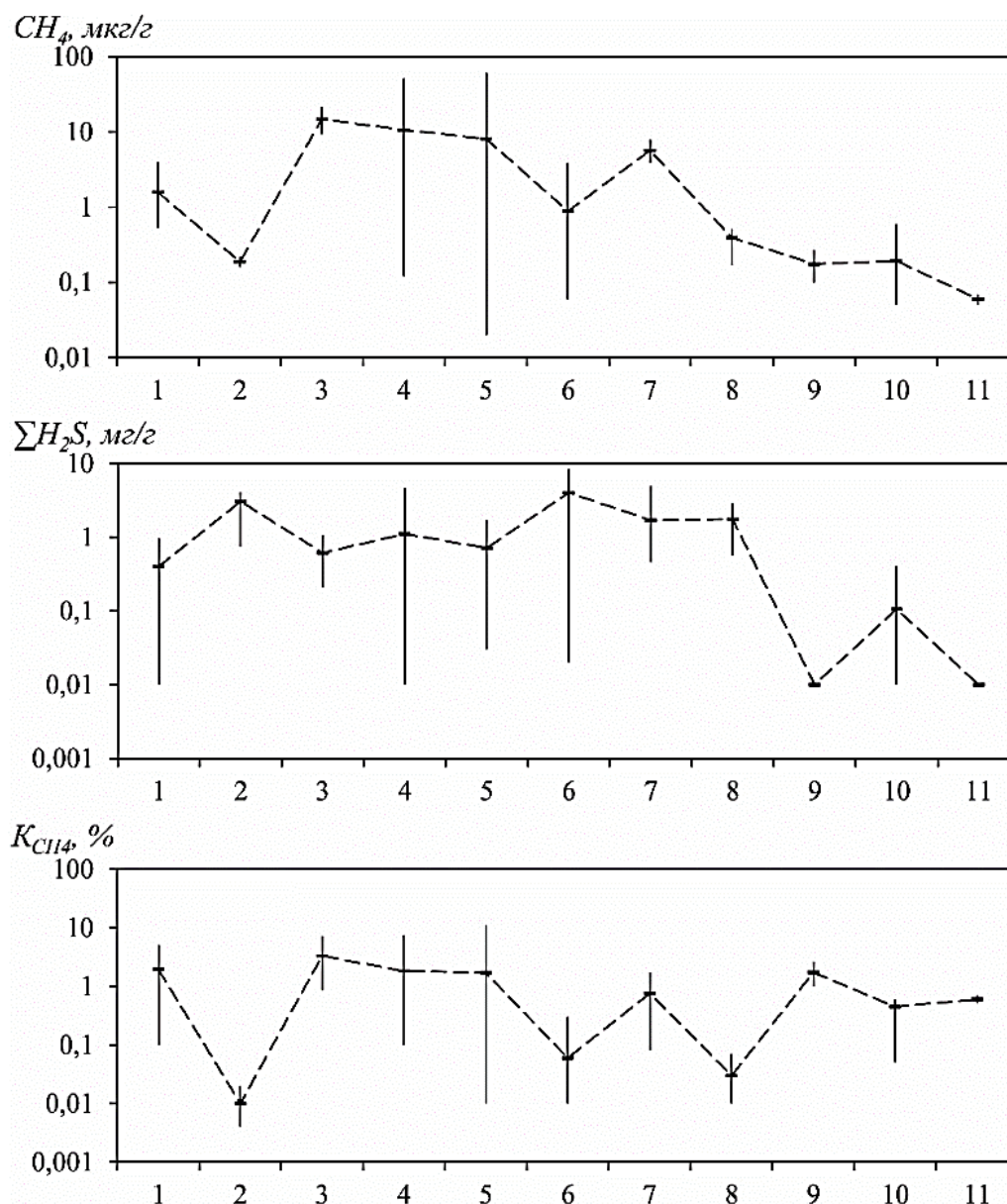


Рис. 2. Пределы изменения и средние концентрации CH_4 , $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ и процентного содержания CH_4 в донных отложениях исследованных водохранилищ и прудов бассейна Азовского моря: 1 – Соколовское водохранилище; 2 – Грушевское водохранилище; 3 – Артемовское водохранилище; 4 – Цимлянское водохранилище; 5 – Веселовское водохранилище; 6 – Пролетарское водохранилище; 7 – пруд лотосов; 8 – пруд-отстойник шахты «Южная»; 9 – пруд-аэрактор шахты «Аютинская»; 10 – водоем-охладитель Ростовской АЭС; 11 – рисовый чек / Fig. 2. Limits of change and average concentrations of CH_4 , $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ and the percentage of CH_4 in the sediments of the studied reservoirs and ponds of the Azov Sea basin: 1 - Sokolovskoye reservoir; 2 - Grushevskoye reservoir; 3 - Artemovskoye reservoir; 4 - Tsimlyanskoye reservoir; 5 - Veselovskoye reservoir; 6 - Proletarskoye reservoir; 7 - Lotus pond; 8 - pond-sump of the Yuzhnaya mine; 9 - pond-aerator of the Ayutinskaya mine; 10 - reservoir-cooler of the Rostov NPP; 11 - rice check

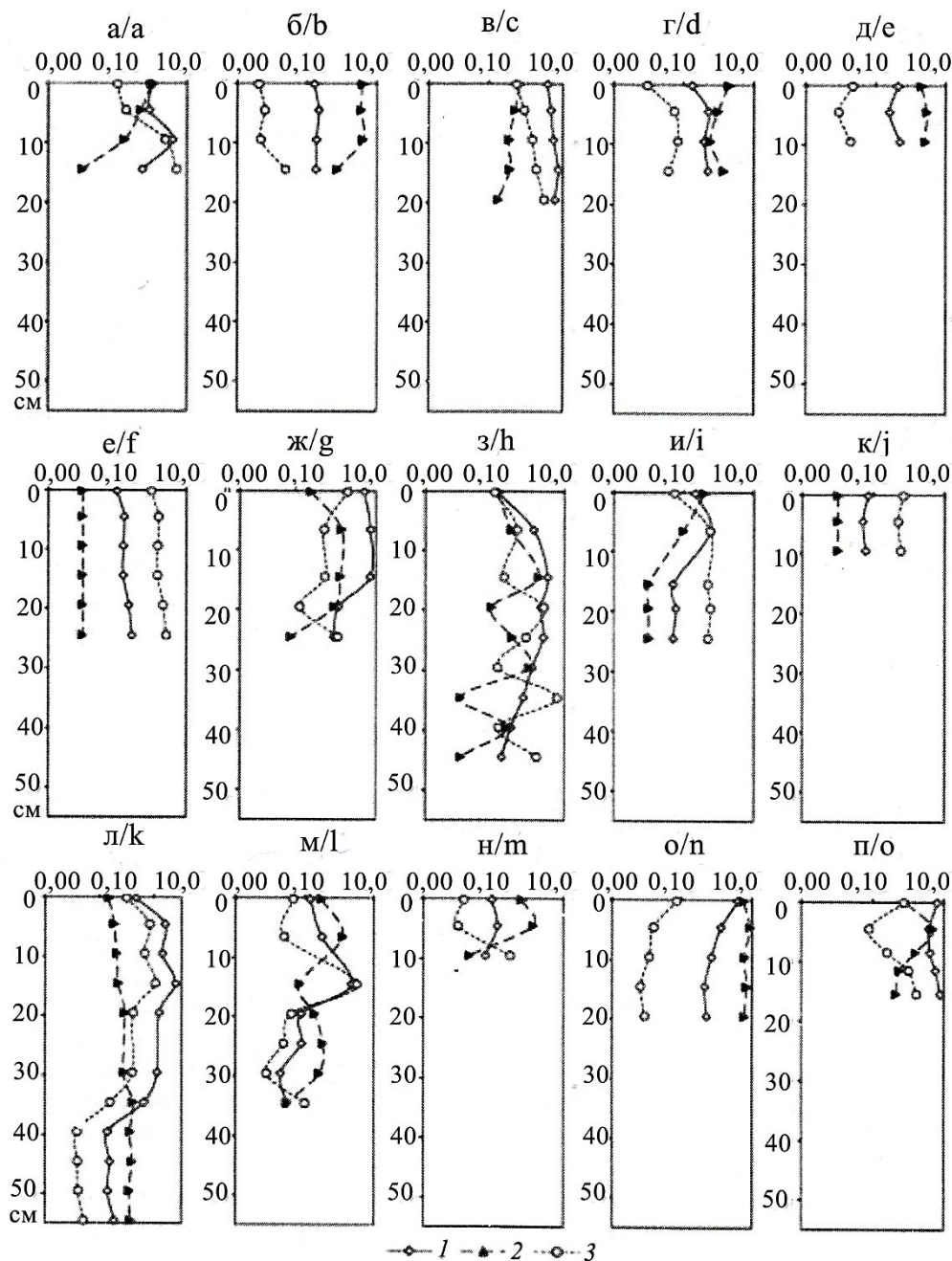


Рис. 3. Распределение концентраций CH_4 , $\mu\text{г/г}$ (1), и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$, мг/г (2), а также процентного содержания CH_4 (3) по вертикальному профилю донных отложений водохранилищ и прудов бассейна Азовского моря: а – ст. 1, Соколовское водохранилище; б – ст. 2, Грушевское водохранилище; в – ст. 3, Артемовское водохранилище; г – ст. 4-1, пруд-отстойник шахты «Южная»; д – ст. 4-2, пруд-отстойник шахты «Южная»; е – ст. 5, пруд-аэратор шахты «Аютинская»; ж – ст. 6-1, Цимлянское водохранилище; з – ст. 6-2, Цимлянское водохранилище; и – ст. 7, водоем-охладитель Ростовской АЭС; к – ст. 8, рисовый чек; л – ст. 9-1, Веселовское водохранилище; м – ст. 9-2, Веселовское водохранилище; н – ст. 10-1, Пролетарское водохранилище; о – ст. 10-2, Пролетарское водохранилище; п – ст. 11, пруд лотосов / Fig. 3. Distribution of concentrations of CH_4 , $\mu\text{g/g}$ (1), and $\Sigma\text{H}_2\text{S}$, mg/g (2), as well as the percentage of CH_4 (3) along the vertical profile of bottom sediments of reservoirs and ponds of the Azov Sea basin: a - station 1, Sokolovskoye reservoir; b - station 2, Grushevskoye reservoir; c - station 3, Artemovskoye reservoir; d - station 4-1, pond-sump of the Southern mine; e - station 4-2, pond-sump of the Southern mine; f - station 5, pond-aerator of the Ayutinskaya mine; g - station 6-1, Tsimlyanskoye reservoir; h - station 6-2, Tsimlyanskoye reservoir; i - station 7, reservoir-Rostov NPP cooler; j - station 8, rice receipt; k - station 9-1, Veselovskoye reservoir; l - station 9-2, Veselovskoye reservoir; m - station 10-1, Proletarskoye reservoir; n - station 10-2, Proletarskoye reservoir; o - station 11, Lotus Pond

С другой стороны, описанное выше распределение по вертикальному профилю отложений концентраций изучаемых газов обусловлено особой зональностью протекания биогеохимических процессов в анаэробных условиях. Так, в отложениях водных объектов выше зоны метанообразования находится слой, называемый сульфат-метановой переходной зоной, где встречаются восходящие диффузионные потоки метана и нисходящие диффузионные потоки сульфат-иона, концентрации которых в этой зоне уменьшаются [14]. Глубина проникновения сульфатов и мощность сульфат-метановой переходной зоны во многом связаны с содержанием в придонных водах сульфатов и с интенсивностью их использования в процессе сульфатредукции. Поэтому эта зона в отложениях пресных водоемов, как правило, будет ближе к поверхности и меньше по мощности по сравнению с морскими экосистемами и, вероятно, вообще отсутствовать в ультрапресных водоемах. В сульфат-метановой переходной зоне метан, диффузионно восходящий из более глубоких горизонтов отложений, окисляется консорциумом анаэробных метанокисляющих архей и сульфатредуцирующих бактерий [24], что и обуславливает низкие концентрации метана и, наоборот, высокие концентрации сероводорода в этой зоне. Поскольку сульфатредуцирующие бактерии имеют высокое сродство к метаногенным субстратам, например, таким как ацетат и водород, и термодинамическое преимущество перед метаногенами [15], то метаногенез обычно подавляется в зоне сульфатзависимого анаэробного окисления метана и активизируется в более глубоких отложениях (в исследованных водохранилищах, судя по концентрациям метана, это, как правило, горизонт 5–15 см), где лабильные вещества еще присутствуют в достаточном количестве, но большая часть сульфат-иона истощена, что ограничивает протекание процесса сульфатредукции.

Процентное содержание CH_4 в сумме изученных восстановленных газов (коэффициент метанизации K_{CH_4}) варьирует в диапазоне 0,004–11,1 % (среднее значение – 1,26 %, медиана – 0,30 %) (таблица, рис. 2), что свидетельствует о существенном доминировании при разложении органических веществ процесса сульфатредукции над процессом метаногенеза. Наиболее высокие величины коэффициента метанизации K_{CH_4} наблюдаются в отложениях Соколовского, Артемовского, Цимлянского и Веселовского водохранилищ, где его значения в среднем составляют от 1,70 до 3,30 %, достигая в отдельных главным образом нижних горизонтах 5,03–11,1 % (рис. 3). В отложениях остальных водохранилищ и прудов содержание CH_4 , как правило, не превышает 1 % от суммы концентраций CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$.

В целом для всех исследованных водоемов в большинстве отобранных проб отложений наиболее встречаемыми диапазонами концентраций CH_4 являются 0,11–1,0 (44 % отобранных проб) и 1,01–10,0 мкг/г (24 % отобранных проб), а концентраций CH_4 менее 0,01 мкг/г вообще не зафиксировано (рис. 4). Для $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ наиболее частыми (73 %) являются концентрации от 0,11 до 10,0 мг/г, с преобладанием в этом диапазоне концентраций от 0,11 до 1,0 мг/г (39 %). Для коэффициента метанизации K_{CH_4} большинство значений находятся в интервале от 0,01 до 10,0 %, на который приходится 88 % всех проб.

Анализ корреляционных зависимостей между исследуемыми гидрохимическими показателями в донных отложениях водохранилищ и прудов (рис. 5; зависимости построены для всего массива данных) выявил наличие достаточно тесной обратной связи значений Eh с концентрациями $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ ($r = -0,62$) и менее выраженной обратной связи с концентрациями CH_4 ($r = -0,16$). Наличие отрицательных зависимостей между концентрациями восстановленных газов и значениями Eh в отложениях обусловлено тем, что распад органических и неорганических веществ приводит к поглощению кислорода. Последнее способствует снижению окислительно-восстановительного потенциала, что активизирует анаэробные процессы в донных отложениях, в том числе метаногенез и сульфатредукцию [6].

Анализ корреляционной связи коэффициента метанизации K_{CH_4} с концентрациями CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$, величинами pH и Eh в отложениях показывает наличие относительно тесной прямой зависимости его значений с концентрациями CH_4 ($r = 0,53$) и обратной зависимости с концентрациями $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ ($r = -0,56$). В то же время четких корреляционных связей между значениями K_{CH_4} и величинами pH и Eh в отложениях не просматривается.

Между концентрациями CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ для всего массива данных проявляется не очень высокая, но достоверная прямая связь ($r = 0,41$, $P < 0,01$), что указывает на синхронность процессов генерации этих газов в отдельных горизонтах донных отложений. Это согласуется с нашими исследованиями, проведенными в устьевых областях рек Дон [13] и Северная Двина [17], а

также в Рыбинском водохранилище [11]. Синхронное продуцирование CH_4 и H_2S объясняется возможным течением реакции метаногенеза по пути как ферментации ацетата, так и восстановления диоксида углерода молекулярным водородом. Наличие в больших количествах последнего обусловлено распадом лабильного органического вещества в местах его свала на участках загрязнения водных экосистем хозяйственно-бытовыми стоками, что нивелирует конкуренцию между метаногенами и сульфатвосстанавливающими бактериями за обладание молекулярным водородом. Синхронное образование CH_4 и H_2S может быть связано также с развитием на загрязненных участках альтернативных процессов их генерации [17]. Это прежде всего образование H_2S гнилостными бактериями и бактериями, участвующими в гидролизе древесины, поступающей различными путями в водотоки и водоемы. В местах поступления загрязненных фекалиями стоков и стоков с сельскохозяйственных полей, где применяются органические удобрения, возможен привнос сульфитредуцирующих кластридий, способных также генерировать H_2S [28]. При этом образование CH_4 на таких участках может протекать и по реакции восстановления метилированных аминов, не являющихся питательными субстратами для сульфатредукторов [28].

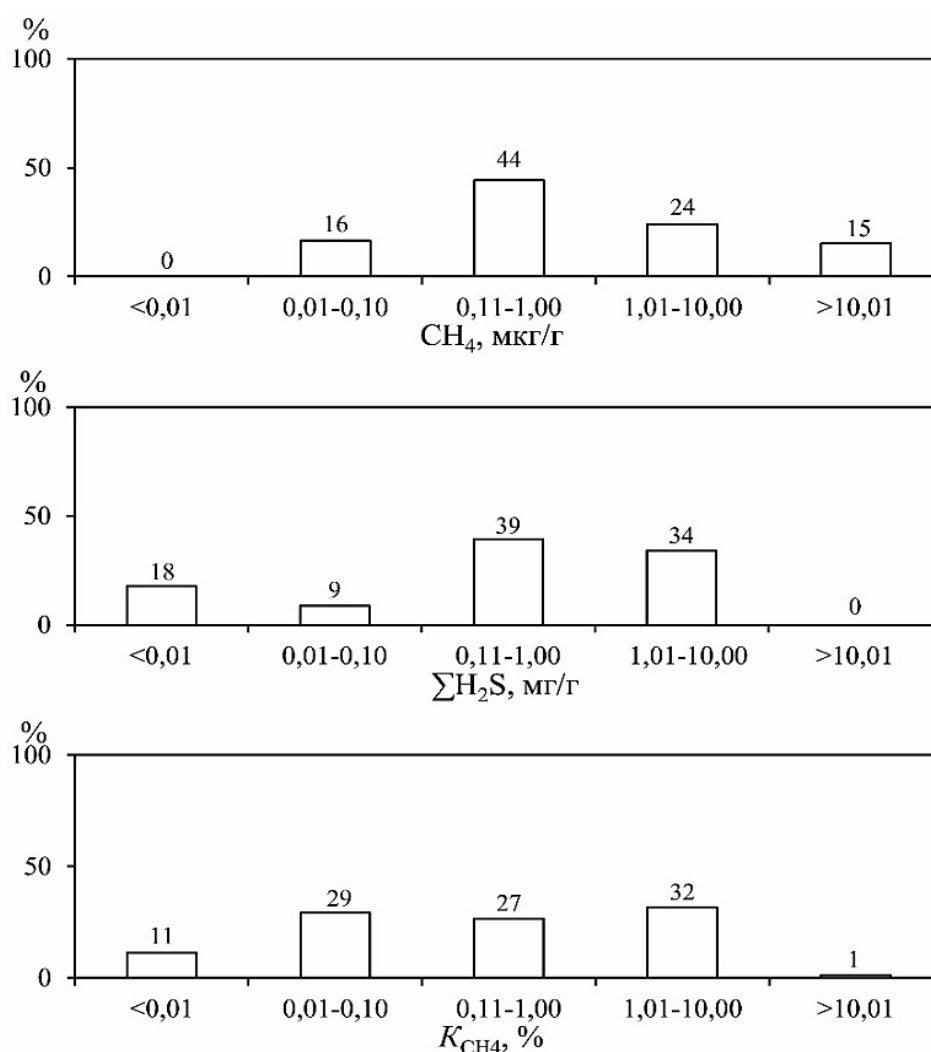


Рис. 4. Частота встречаемости, %, концентраций CH_4 , мкг/г, и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$, мг/г, а также процентное содержание CH_4 в донных отложениях исследованных водохранилищ и прудов бассейна Азовского моря / Fig. 4. Frequency of occurrence, %, of CH_4 concentrations, $\mu\text{g/g}$, and $\Sigma\text{H}_2\text{S}$, mg/g , as well as the percentage of CH_4 in the sediments of the studied reservoirs and ponds of the Azov Sea basin

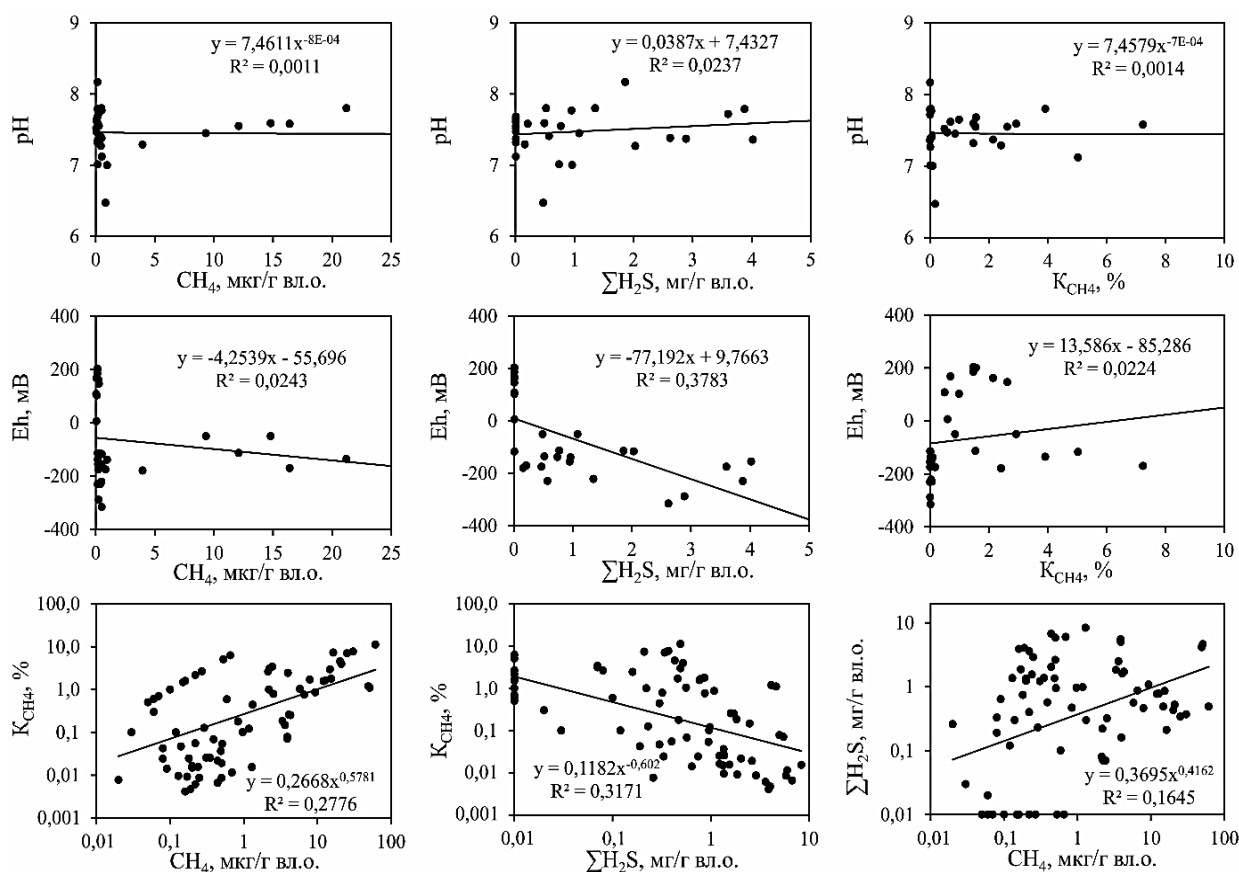


Рис. 5. Зависимость между исследуемыми гидрохимическими показателями в донных отложениях исследованных водохранилищ и прудов бассейна Азовского моря / Fig. 5. Dependencies between the studied biochemical parameters in the bottom sediments of the studied reservoirs and ponds of the Azov Sea basin

Выводы

1. Донные отложения исследованных водохранилищ и прудов бассейна Азовского моря представлены преимущественно темно-серыми и черными илисто-песчаными отложениями, для которых характерны нейтральная или слабощелочная среда (pH – от 6,47 до 8,17) и восстановительные условия (Eh – от -315,0 до -50,0 мВ), за исключением затопленных почв рисовых чеков, а также отложений пруда-аэратора шахты «Аютинская», в которых наблюдаются окислительные условия (Eh – от +6,4 до +204,0 мВ).

2. В тонкозернистых отложениях (илах) водохранилищ и прудов идет активный процесс образования CH_4 и ΣH_2S . В целом концентрации CH_4 и ΣH_2S в донных отложениях изменяются в пределах от 0,02 до 61,3 мкг/г влажного осадка (среднее значение – 5,26 мкг/г, медиана – 0,50 мкг/г) и от <0,01 до 8,36 мг/г влажного осадка (среднее значение – 1,28 мг/г, медиана – 0,49 мг/г) соответственно. Таким образом, диапазон колебания концентраций изученных восстановленных газов составляет 3–4 порядка. Наиболее высокие концентрации CH_4 наблюдаются в отложениях Артемовского, Цимлянского и Веселовского водохранилищ, а ΣH_2S – в отложениях Пролетарского, Цимлянского и Грушевского водохранилищ. Самые низкие концентрации CH_4 и ΣH_2S зафиксированы в затопленных почвах рисовых чеков и отложениях пруда-аэратора шахты «Аютинская», характеризующихся окислительными условиями.

3. Распределение CH_4 и ΣH_2S по вертикальному профилю изученных отложений отличается, как правило, увеличением концентраций от поверхностного слоя к подповерхностным горизонтам, в которых фиксируется их максимальный пик, после чего концентрации данных газов снижаются, нередко до минимальных значений. Отличием распределения ΣH_2S от распределения CH_4 является более частая фиксация максимальных концентраций ΣH_2S в менее глубоких горизонтах отложений – в 2–5 см, а нередко и в слое 0–2 см.

4. Содержание CH_4 в сумме изученных восстановленных газов (коэффициент метанизации K_{CH_4}) в отложениях исследованных водохранилищ и прудов варьирует в диапазоне 0,004–11,1 % (среднее значение – 1,26 %, медиана – 0,30 %), что свидетельствует о существенном доминировании процесса сульфатредукции над процессом метаногенеза. При этом в Соколовском, Артемовском, Цимлянском и Веселовском водохранилищах доля проб отложений с процентным содержанием метана более 1 % от суммы концентраций CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ повышается, достигая в отдельных, как правило, нижних горизонтах 5,03–11,1 %. В отложениях остальных водохранилищ и прудов содержание CH_4 в отложениях, как правило, не превышает 1 % от суммы концентраций CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$.

5. В донных отложениях водохранилищ и прудов установлено наличие достаточно тесной обратной связи значений Eh с концентрациями $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ ($r = -0,62$) и менее выраженной обратной связи с концентрациями CH_4 ($r = -0,16$). Выявлена относительно тесная прямая зависимость коэффициента метанизации K_{CH_4} с концентрациями CH_4 ($r = 0,53$) и обратная зависимость с концентрациями $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ ($r = -0,56$). Между концентрациями CH_4 и $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ для всего массива данных проявляется не очень высокая, но достоверная прямая связь ($r = 0,41$, $P < 0,01$), что указывает на сопряженные процессы генерации этих газов в отдельных горизонтах донных отложений.

Список источников

1. Волков И.И. Геохимия серы в осадках океана. М.: Наука, 1984. 272 с.
2. Кузнецов С.И., Саралов А.Е., Назина Т.Н. Микробиологические процессы круговорота углерода и азота в озерах. М.: Наука, 1985. 213 с.
3. Федоров Ю.А., Сухоруков В.В., Трубник П.Г. Аналитический обзор: эмиссия и поглощение парниковых газов почвами. Экологические проблемы // Антропогенная трансформация природной среды. 2021. Т. 7, № 1. С. 6–35.
4. Conrad R. The global methane cycle: recent advances in understanding the microbial processes involved // Environ. Microbiol. 2009. Rep. 1. P. 285–292.
5. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J. [et al.]. Carbon and other biogeochemical cycles // Proceedings of the Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, MA: Cambridge University Press, 2013. P. 465–570.
6. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А. Факторы формирования концентраций метана в водных экосистемах. Ростов н/Д.; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2021. 366 с.
7. Reeburgh W.S. Oceanic methane biogeochemistry // Chem. Rev. 2007. Vol. 107. P. 486–513.
8. Kirschke S., Bousquet P., Ciais P., Saunoy M., Canadell J.G., Dlugokencky E.J. [et al.]. Three decades of global methane sources and sinks // Nat. Geosci. 2013. Vol. 6. P. 813–823.
9. Намсараев Б.Б., Самаркин В.А., Нельсон К., Клам В., Бухгольц Л., Ремсен К., Майер Ч. Микробиологические процессы круговорота углерода и серы в донных осадках озера Мичиган // Микробиология. 1994. Т. 63, № 4. С. 730–839.
10. Jørgensen B., Findlay A.J., Pellerin A. The Biogeochemical Sulfur Cycle of Marine Sediments // Front Microbiol. 2019. Vol. 10. Article 849.
11. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. Ростов н/Д.; М.: Ростиздат, 2007. 330 с.
12. Леин А.Ю., Иванов М.В. Биогеохимический цикл метана в океане. М.: Наука, 2009. 576 с.
13. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А. Метан в устьевой области реки Дон. Ростов н/Д.; М.: Ростиздат, 2010. 181 с.
14. Wallenius A.J., Martins P.D., Slomp C.P., Jetten M.S.M. Anthropogenic and Environmental Constraints on the Microbial Methane Cycle in Coastal Sediments // Front. Microbiol. 2021. Vol. 12. Article 631621.
15. Schönheit P., Kristjansson J.K., Thauer R.K. Kinetic mechanism for the ability of sulfate reducers to out-compete methanogens for acetate // Arch. Microbiol. 1982. Vol. 132. P. 285–288.
16. Галимов Э.М. Метанообразование в морских осадках в зоне сульфатредукции // Докл. РАН. 1995. Т. 342, № 2. С. 219–221.
17. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А. Метан в воде и донных отложениях устьевой области Северной Двины в зимний период // Океанология. 2014. Т. 54, № 2. С. 178–188.
18. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Андреев Ю.А., Тамбиева Н.С., Михайленко О.А. Метан и сульфидная сера в донных отложениях озера Байкал // Геохимия. 2019. Т. 64, № 4. С. 427–439.
19. Пименов Н.В., Саввичев А.С., Русанов И.И., Леин А.Ю., Иванов М.В. Микробиологические процессы цикла углерода и серы на холодных метановых сипах Северной Атлантики // Микробиология. 2000. Т. 69, № 6. С. 831–843.

20. Дзюбан А.Н., Кузнецова И.А., Пименов Н.В. Микробиологические процессы деструкции органического вещества в донных осадках Балтийского моря // *Океанология*. 2001. Т. 41, № 2. С. 217–223.
21. Иванов М.В., Русанов И.И., Пименов Н.В., Байрамов И.Т., Юсупов С.К., Саввичев А.С., Леин А.Ю., Сапожников В.В. Микробные процессы цикла углерода и серы в озере Могильном // *Микробиология*. 2001. Т. 70, № 5. С. 675–686.
22. Саввичев А.С., Русанов И.И., Захарова Е.Е., Веслополова Е.Ф., Мицкевич И.Н., Кравчишина М.Д., Леин А.Ю., Иванов М.В. Микробные процессы циклов углерода и серы в Белом море // *Микробиология*. 2008. Т. 77, № 6. С. 823–838.
23. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Доценко И.В., Афанасьев К.А. Метан и сероводород в лечебных сульфидных грязях (на примере озера Большой Тамбукан) // *Изв. вузов. Сев. Кавк. регион. Естеств. науки*. 2014. № 3. С. 102–109.
24. Knüttel K., Wegener G., Boetius A. Anaerobic methane oxidizers // *Microbial Communities Utilizing Hydrocarbons and Lipids: Members, Metagenomics and Ecophysiology*. Ed. T.J. McGenity. Cham: Springer, 2018. P. 1–21.
25. Дзюбан А.Н. Метаногенез и деструкция органического вещества в донных осадках техногенных водных объектов // *Водные ресурсы*. 2014. Т. 41, № 3. С. 330–338.
26. Авакян А.Б., Салтанкин В.П., Шаранов В.А. Водохранилища (Природа мира). М.: Мысль, 1987. 325 с.
27. Лурье П.М., Панов В.Д. Реки бассейна Азовского моря: гидрография и режим стока. Ростов н/Д.: Донской издательский дом, 2021. 670 с.
28. Fedorov Y.A., Gar'kusha D.N., Trubnik R.G., Morozova M.A. Sulfite-Reducing Clostridia and their Participation in Methane and Hydrogen Sulfide Formation in the Bottom Sediments of Water Objects and Streams of the ETR South // *Water Resources*. 2019. Vol. 46, No. 1. P. S85–S93.

References

1. Volkov I.I. *Geochemistry of sulfur in ocean sediments*. Moscow: Nauka Publ.; 1984. 272 p. (In Russ.).
2. Kuznetsov S.I., Saralov A.E., Nazina E.N. *Microbiological processes of carbon and nitrogen circulation in lakes*. Moscow: Nauka Publ.; 1985. 213 p. (In Russ.).
3. Fedorov Yu.A., Sukhorukov V.V., Trubnik R.G. Analytical review: emission and absorption of greenhouse gases by soils. Ecological problems. *Antropogennaya transformatsiya prirodnoi sredy = Anthropogenic Transformation of Environment*. 2021;7(1):6-35. (In Russ.).
4. Conrad R. The global methane cycle: recent advances in understanding the microbial processes involved. *Environ. Microbiol.* 2009;(1):285-292.
5. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., et al. Carbon and other biogeochemical cycles. *Proceedings of the Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, MA: Cambridge University Press; 2013:465-570.
6. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A. *Factors of formation of methane concentrations in aquatic ecosystems*. Rostov-on-Don; Taganrog: Southern Federal University Press; 2021. 366 p. (In Russ.).
7. Reeburgh W.S. Oceanic methane biogeochemistry. *Chem. Rev.* 2007;107:486-513.
8. Kirschke S., Bousquet P., Ciais P., Saunoy M., Canadell J.G., Dlugokencky E.J., et al. Three decades of global methane sources and sinks. *Nat. Geosci.* 2013;6:813-823.
9. Namsaraev B.B., Samarkin V.A., Nelson K., Klamp V., Buchholz L., Remsen K., Mayer Ch. Microbiological processes of carbon and sulfur cycling in bottom sediments of Lake Michigan. *Mikrobiologiya = Microbiology*. 1994;63(4):730-839. (In Russ.).
10. Jørgensen B., Findlay A.J., Pellerin A. The Biogeochemical Sulfur Cycle of Marine Sediments. *Front. Microbiol.* 2019;10:849.
11. Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Gar'kusha D.N., Khoroshevskaya V.O. *Methane in aquatic ecosystems*. 2nd ed., reprint. and add. Rostov-on-Don; Moscow: Rostizdat Publ.; 2007. 330 p. (In Russ.).
12. Lein A.Yu., Ivanov M.V. *Biogeochemical cycle of methane in the ocean*. Moscow: Nauka Publ.; 2009. 576 p. (In Russ.).
13. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A. *Methane in the estuary region of the Don River*. Rostov-on-Don; Moscow: Rostizdat Publ.; 2010. 181 p. (In Russ.).
14. Wallenius A.J., Martins P.D., Slomp C.P., Jetten M.S.M. Anthropogenic and Environmental Constraints on the Microbial Methane Cycle in Coastal Sediments. *Front. Microbiol.* 2021;12:631621.
15. Schönheit P., Kristjansson J.K., Thauer R.K. Kinetic mechanism for the ability of sulfate reducers to out-compete methanogens for acetate. *Arch. Microbiol.* 1982;132:285-288.
16. Galimov E.M. Methane formation in marine sediments in the sulfate reduction zone. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk = Reports of the Russian Academy of Sciences*. 1995;342(2):219-221. (In Russ.).
17. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A. Methane in water and bottom sediments of the estuary region of the Northern Dvina in winter. *Okeanologiya = Oceanology*. 2014;54(2):178-188. (In Russ.).

18. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Andreev Yu.A., Tambieva N.S., Mikhailenko O.A. Methane and sulfide sulfur in bottom sediments of Lake Baikal. *Geohimiya = Geochemistry*. 2019;64(4):427-439. (In Russ.).
19. Pimenov N.V., Savvichev A.S., Rusanov I.I., Lein A.Yu., Ivanov M.V. Microbiological processes of the carbon and sulfur cycle on cold methane sips of the North Atlantic. *Mikrobiologiya = Microbiology*. 2000;69(6):831-843. (In Russ.).
20. Dzyuban A.N., Kuznetsova I.A., Pimenov N.V. Microbiological processes of organic matter destruction in bottom sediments of the Baltic Sea. *Okeanologiya = Oceanology*. 2001;41(2):217-223. (In Russ.).
21. Ivanov M.V., Rusanov I.I., Pimenov N.V., Bayramov I.T., Yusupov S.K., Savvichev A.S., Lein A.Yu., Sapozhnikov V.V. Microbial processes of the carbon and sulfur cycle in Lake Mogilny. *Mikrobiologiya = Microbiology*. 2001;70(5):675-686. (In Russ.).
22. Savvichev A.S., Rusanov I.I., Zakharova E.E., Veslopolova E.F., Mickiewicz I.N., Kravchishina M.D., Lein A.Yu., Ivanov M.V. Microbial processes of carbon and sulfur cycles in the White Sea. *Mikrobiologiya = Microbiology*. 2008;77(6):823-838. (In Russ.).
23. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Dotsenko I.V., Afanasyev K.A. Methane and hydrogen sulfide in therapeutic sulfide mud (on the example of Lake Bolshoy Tambukan). *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2014;(3):102-109. (In Russ.).
24. Knittel K., Wegener G., Boetius A. Anaerobic methane oxidizers. *Microbial Communities Utilizing Hydrocarbons and Lipids: Members, Metagenomics and Ecophysiology*. T.J. McGenity, ed. Cham: Springer Press; 2018:1-21.
25. Dzyuban A.N. Methanogenesis and destruction of organic matter in bottom sediments of technogenic water bodies. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2014;41(3):330-338. (In Russ.).
26. Avakyan A.B., Saltankin V.P., Sharapov V.A. *Reservoirs (Nature of the world)*. Moscow: Mysl' Publ.; 1987. 325 p. (In Russ.).
27. Lurie P.M., Panov V.D. *Rivers of the Azov Sea basin: Hydrography and flow regime*. Rostov-on-Don: Don Publishing House; 2021. 670 p. (In Russ.).
28. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Trubnik R.G., Morozova M.A. Sulfite-Reducing Clostridia and their Participation in Methane and Hydrogen Sulfide Formation in the Bottom Sediments of Water Objects and Streams of the ETR South. *Water Resources*. 2019;46(1):S85-S93.

Информация об авторах

Д.Н. Гарькуша – кандидат географических наук, доцент, Институт наук о Земле.

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

Information about the authors

D.N. Garkusha - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Institute of Earth Sciences.

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

Статья поступила в редакцию 04.05.2022; одобрена после рецензирования 16.05.2022; принята к публикации 30.08.2022.
The article was submitted 04.05.2022; approved after reviewing 16.05.2022; accepted for publication 30.08.2022.

Научная статья
УДК 551.583+556
doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-62-69

РОЛЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ФОРМИРОВАНИИ СТОКА РЕКИ БЕЛОЙ В СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД

Людмила Алексеевна Овчаренко^{1✉}, Екатерина Андреевна Короткова²

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

¹ ludmila25.11@yandex.ru✉

² katya_korotkova_1998@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена стоку реки Белой, протекающей по территории Республики Адыгея. Анализируются факторы, влияющие на его формирование: температура воздуха и атмосферные осадки в горной и предгорной частях республики. Работа основывается на данных метеостанций в поселке Гузерипль и городе Майкопе. Выявлена динамика температуры воздуха в горной части от 7 до 11,2 °С, в предгорной – от 9 до 15,3 °С. Осадки изменяются от 482 до 1136 мм в предгорной и от 825 до 1594 мм в горной части. Проанализированы изменения количества осадков и температуры воздуха по пятилетиям. Рассматривается расход воды в верхнем и среднем течении реки Белой, который имеет тенденцию к сокращению и изменяется в пределах от 42,11 до 26,9 и от 83,56 до 52,46 м³/с в верхнем и среднем течении соответственно. Анализируется корреляционная зависимость данных факторов от расхода реки, выявлена низкая парная связь.

Ключевые слова: сток, расход воды, атмосферные осадки, температура воздуха, Республика Адыгея, река Белая

Для цитирования: Овчаренко Л.А., Короткова Е.А. Роль климатических факторов в формировании стока реки Белой в современный период // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 3. С. 62–69.

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

Original article

THE ROLE OF CLIMATIC FACTORS IN THE FORMATION OF THE FLOW OF THE BELAYA RIVER IN THE MODERN PERIOD

Ludmila A. Ovcharenko^{1✉}, Ekaterina A. Korotkova²

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

¹ ludmila25.11@yandex.ru✉

² katya_korotkova_1998@mail.ru

Abstract. The paper is devoted to the runoff of the Belaya River flowing on the territory of the Adygea Republic. Factors influencing its formation: air temperature and atmospheric precipitation in a mountainous and piedmont part of the republic are analyzed. The work is based on data from weather stations in the village of Guzeripl and Maikop. The dynamics of air temperature in the mountainous part from 7 to 11.2 °C, in the foothill from 9 to 15.3 °C. Precipitation varies from 482 to 1136 mm in the foothill and from 825 to 1594 mm in the mountainous part. Changes in precipitation and air temperature over five years are analyzed. The water consumption in the upper and middle

reaches of the Belaya River is considered, which tends to decrease and varies from 42.11 to 26.9 m³/s and from 83.56 to 52.46 m³/s in the upper and middle reaches, respectively. The correlation of these factors with the flow rate of the river is analyzed and a low pair relationship is revealed.

Keywords: runoff, water discharge, precipitation, air temperature, Adygea Republic, Belaya river

For citation: Ovcharenko L.A., Korotkova E.A. The Role of Climatic Factors in the Formation of the Flow of the Belaya River in the Modern Period. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2022;(3):62-69. (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

Водный потенциал оказывает значительное влияние на экономическое и социальное развитие общества. Ресурсы поверхностных вод являются главным источником удовлетворения потребности в пресной воде и зачастую оцениваются величиной среднего годового стока рек.

Главная водная артерия горной Адыгеи – река Белая, которая по совместительству является вторым по длине притоком Кубани. Её воды активно используются для орошения, промышленного, коммунального и сельскохозяйственного водоснабжения, а горный характер реки привлекает внимание любителей экстремальных видов отдыха. Поэтому изменение стока реки может повлиять на многие аспекты жизни населения. Многолетние изменения речного стока являются актуальной темой, которой посвящены многочисленные исследования. В настоящее время хорошо изучен водный режим рек Восточно-Европейской равнины и России в целом [1–12].

Большая часть рек Кавказа являются притоками более крупных рек, что и вызывает большой интерес при их изучении. Так, в [12] изучали основные гидрологические характеристики притоков реки Кубань, среди которых значительное место отводилось реке Белой и её притокам. Большинство работ Т.Н. Мельниковой посвящены рекам Республики Адыгеи [13–15], где рассмотрено изменение гидрологических особенностей под влиянием природных и антропогенных факторов, однако в большинстве работ отмечается недостаточное количество источников (гидрологических постов) для получения более подробной информации об этих реках.

В данной работе изучена динамика величины стока реки Белой в предгорной и горной частях Республики Адыгеи за период с 2008 по 2018 г. и проанализирована её взаимосвязь с изменением температуры воздуха и количества осадков.

Для достижения цели были поставлены такие задачи, как изучение динамики многолетних данных температуры воздуха и количества осадков (по архивным источникам, электронным данным); анализ изменения стока реки и определение основных причин, влияющих на изменение; выявление взаимосвязи между стоком реки и осадками с температурой.

Объекты и методы исследования

Исток реки Белой находится на Главном Кавказском хребте на высоте 2300 м. При движении от истока к устью Белая пересекает Боковой, Передовой, Скалистый, Пастбищный и Лесистый хребты, а также Кубанскую наклонную равнину. Средняя высота водосбора – 770 м, а его площадь составляет 5590 км². Бассейн реки Белой вытянут в меридиональном направлении и сужается к устью. Основные притоки – Киша и Дах (правые), Пшеха и Курджипис (левые), составляющие 64,5 % водосбора. У реки есть 15 притоков, длина которых варьируется от 10 до 150 км, а также 3439 рек длиной менее 10 км. В целом протяжённость всех притоков реки – 7527 км [12].

Анализ изменения температуры воздуха и количества атмосферных осадков с 2008 по 2018 г. основывается на исследовании оперативных метеорологических данных [16–19]. Данные о расходе воды в верхнем и среднем течении реки Белой с 2008 по 2018 г. на гидрологических постах в районе г. Майкопа и п. Гузерипль являются основой изучения трансформации стока [17]. В процессе исследования использовались исторический и статистический методы, обработка данных проводилась в программе Excel.

Результаты и обсуждение

На основе наблюдений, проводимых на метеостанции в посёлке Гузерипль с 1929 по 2020 г., была выявлена средняя температура воздуха, которая составила 8,7 °С. За период с 2010 по 2020 г. наблюдается повышение средней температуры воздуха до 9,8 °С, что превышает многолетнее значение на 1,1 °С. Максимальные значения температуры отмечались в 2010 г. (11,2 °С), также к аномально жарким годам можно отнести 2014 и 2018 гг. (рис. 1).

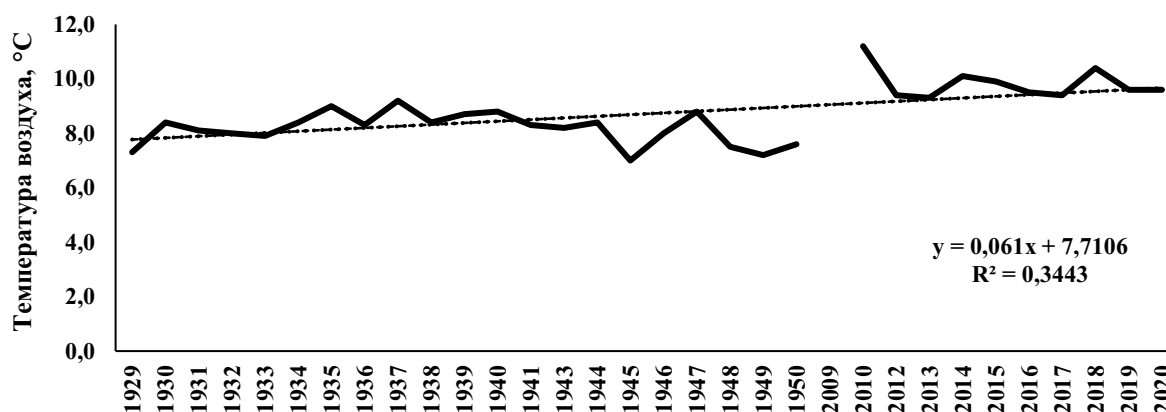


Рис. 1. Динамика температуры воздуха, м/с Гузерипль (1929–2020) /
 Fig. 1. Dynamics of air temperature, Guzeripl (1929-2020)

На метеостанции в Майкопе наблюдения происходили с 1901 г., и средняя температура воздуха здесь составила 11,3 °С. За период с 2000 по 2020 г. произошло увеличение температуры до 12,6 °С, превысив среднемноголетнее значение на 1,3 °С. По многочисленным данным, с 70-х гг. XX в. наблюдается монотонное поднятие температуры воздуха и отмечается, что 2007, 2002, 2005 и 2004 гг. стали самыми теплыми годами не только для России, но и для Северного полушария и земного шара в целом [8]. Поэтому Майкоп полностью соответствует данным тенденциям; самыми жаркими были года с 2007 по 2010 г., где среднегодовая температура воздуха колебалась от 14,3 до 15,3 °С (рис. 2).



Рис. 2. Динамика температуры воздуха, м/с Майкоп (1901–2020) /
 Fig. 2. Dynamics of air temperature, Maikop (1901-2020)

Наблюдения за количеством осадков на метеостанциях в Майкопе и Гузерипле велись с 1936 г. На первой метеостанции изменения происходили следующим образом: в конце 30-х составило 757 мм, в 40-х гг. – 766 мм, в 50-х гг. увеличение осадков до 803 мм, затем в 60-х гг. сокращение до

747 мм, с 70-х гг. до конца 80-х гг. происходит увеличение количества осадков от 749 до 765 мм, к началу 2000-х гг. количество осадков увеличилось до 868 мм, а за последние 20 лет снизилось до 820 мм – и это выше среднемноголетнего количества осадков (786 мм). Это также соответствует трендам, выявленным на юге европейской части РФ, где отмечается положительный тренд в увеличении количества выпавших осадков [20]. Минимальное количество осадков – 482 мм (1986 г.), а максимальное – 1136 мм (2004 г.). Самыми засушливыми были 1949, 1969, 1986, 1990 гг., а наиболее дождливыми – 1988, 1997, 2004 и 2016 гг. (рис. 3). Также можно заметить, что происходит увеличение амплитуды колебания осадков.

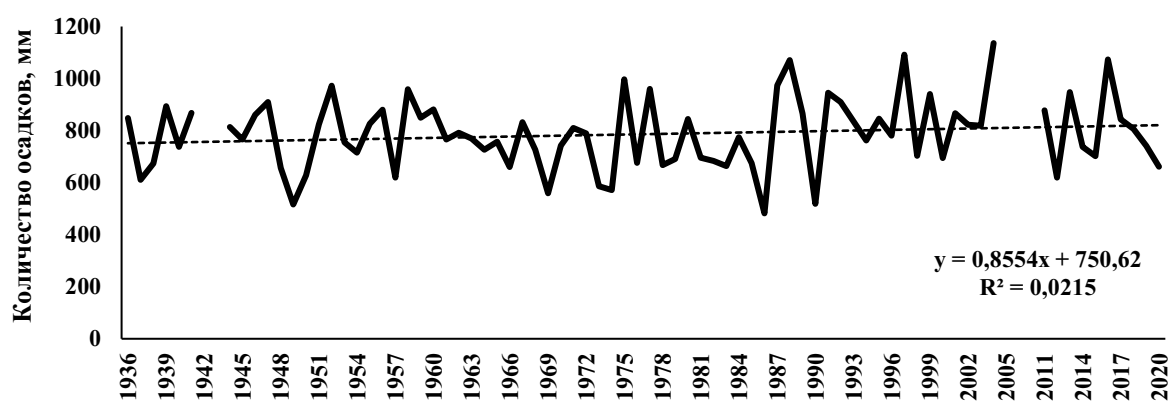


Рис. 3. Динамика количества осадков, м/с Майкоп (1936–2020) /
 Fig. 3. Dynamics of precipitation, Maikop (1936-2020)

Обратную картину мы наблюдаем в п. Гузерибль. В 1930-е гг. среднее годовое количество осадков составляло 1259 мм, в 1940-е гг. – 1171 мм, а за последние 10 лет количество осадков сократилось до 1067 мм, что ниже среднемноголетнего количества осадков (1139 мм). Минимальное количество осадков составило 825 мм (1949 г.), а максимальное – 1594 мм (1941 г.). Аномально сухими оказались 1949 и 2012 гг., а в 1939, 1941, 1947 и 2016 гг. было зафиксировано наибольшее количество осадков (рис. 4).

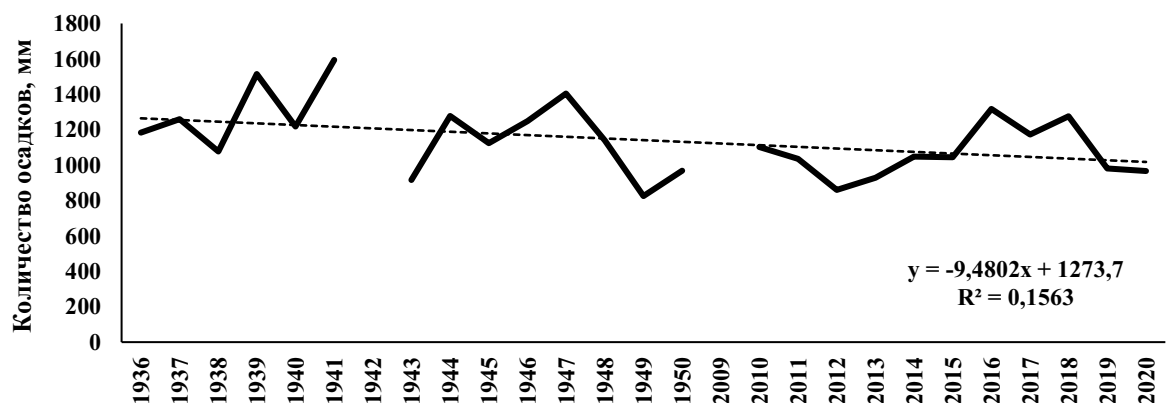


Рис. 4. Динамика количества осадков, м/с Гузерибль (1936–2020) /
 Fig. 4. Dynamics of precipitation, Guzeripl (1936–2020)

Изменение температуры воздуха и колебание количества осадков на метеостанциях по пятилетиям приводится в сводной таблице.

Средний расход воды на гидропосте в п. Гузерипль составляет 32,5 м³/с. Наибольшее среднее значение расхода воды в реке наблюдалось в 2010 г., а наименьшее значение – в 2012 г. Наибольший расход воды приходится на май, а наименьший отмечается в январе. Самое низкое значение расхода было зафиксировано в феврале 2008 г. (3,13 м³/с), а самое высокое – в ноябре 2010 г. (471 м³/с). За период наблюдения были отмечены циклические увеличения и сокращения расхода воды на гидропосте, однако можно заметить общую тенденцию к сокращению расхода воды (рис. 5).

Изменение метеопказателей на метеостанциях / Change of meteorological indicators

Период	М/с Гузерипль		М/с Майкоп	
	Температура воздуха, °С	Количество осадков, мм	Температура воздуха, °С	Количество осадков, мм
1936–1940	8,7	1250	11,3	753
1941–1945	8	1227	–	–
1946–1950	7,8	1117	10,1	714
2001–2005	–	–	11,9	883
2011–2015	10	995	12	777
2016–2020	9,7	1126	12,5	825
Среднее	8,7	1139	11,3	786

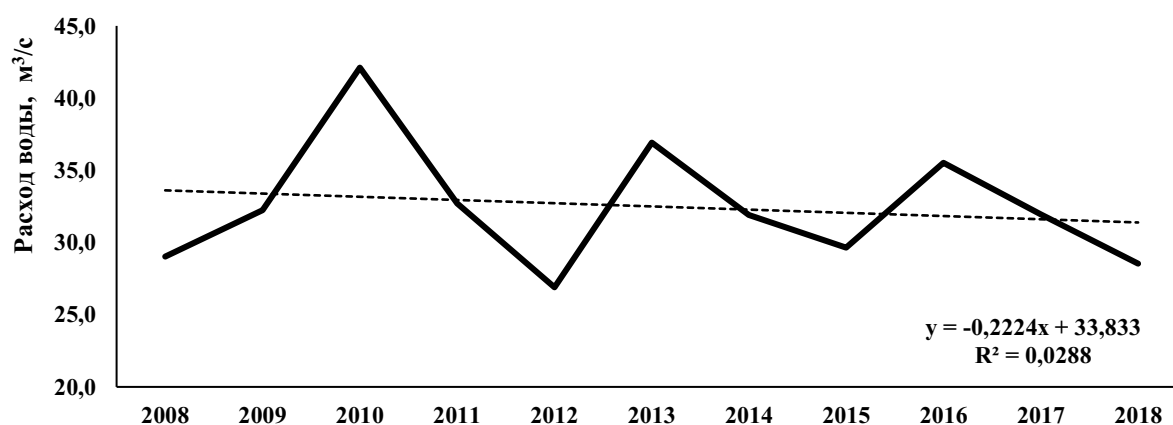


Рис. 5. Средний расход воды, река Белая, г/п Гузерипль (2008–2018) /
 Fig. 5. Average water discharge, river Belaya, Guzeripl (2008-2018)

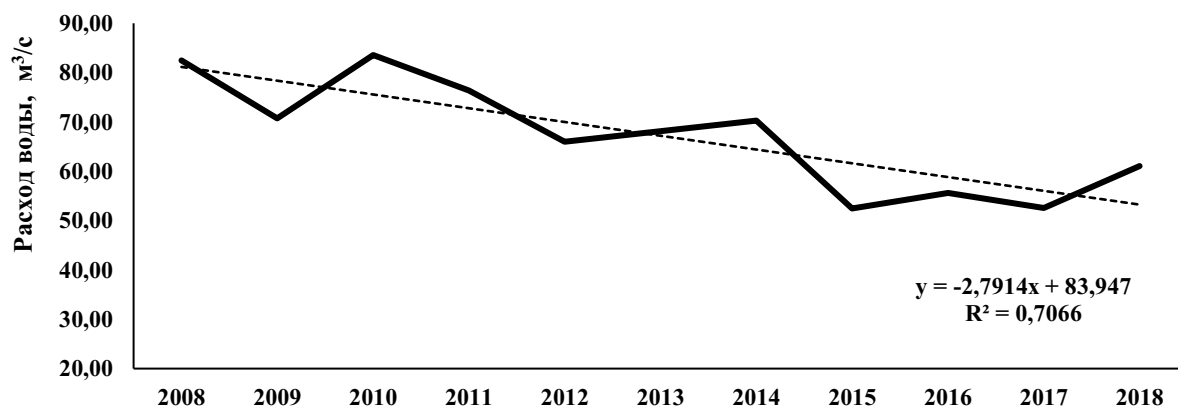


Рис. 6. Средний расход воды, река Белая, г/п Майкоп (2008–2018) /
 Fig. 6. Average water discharge, river Belaya, Maikop (2008-2018)

Средний расход воды на гидропосте в г. Майкопе составляет 67,2 м³/с. Так же, как и на предыдущем poste, наибольшее среднее значение расхода наблюдалось в 2010 г., однако наименьшее значение было отмечено в 2015 г. Наибольший расход воды, как и на предыдущем poste, приходится на май, а наименьший – на январь. Самое низкое значение расхода было зафиксировано в феврале 2017 г. (14 м³/с), а самое высокое – в мае 2011 г. (737 м³/с). На данном графике наиболее чётко прослеживается общая тенденция сокращения расхода воды, несмотря на небольшие колебания (рис. 6).

Для выявления взаимосвязей между показателями была проанализирована корреляционная зависимость между температурой, осадками и расходом воды в реке. В результате выявлена низкая парная корреляция между исследуемыми параметрами. Для получения полной картины планируется в дальнейшем расширить исследуемый период наблюдений.

Выводы

В течение периода наблюдения на исследуемых метеостанциях отмечались циклические изменения температур. При этом наибольшие отклонения от средней многолетней температуры отмечались в последние 20 лет. Но в целом наблюдается тенденция к увеличению температуры воздуха в данном районе. Также в период исследований на метеостанциях отмечались циклы смены максимума и минимума осадков. При этом в горах отмечается заметная тенденция к сокращению количества осадков, обратная ситуация – в Майкопе, где наблюдается увеличение количества осадков по сравнению со среднемноголетним значением.

Максимальный показатель среднегодового расхода на всех пунктах был отмечен в 2010 г. Несмотря на то что данный год был аномально жарким, количество осадков выпало выше нормы. Особенно много осадков выпало в весенний период (март, апрель), а также в осенний период (сентябрь, октябрь). В горной части значительное количество осадков отмечалось и летом, в июне. Минимальные показатели расхода воды в реке в Гузерипле связаны с тем, что в 2012 г. со склонов горы Гузерипль сошёл оползень, который перекрыл русло реки Мутный Тепляк, вследствие чего и произошло сокращение количества воды, которая поступала в реку. Кроме того, в горной части выпало значительно меньше осадков, что способствовало сокращению расхода. Минимальный показатель в Майкопе был отмечен в 2015 г. и связан с тем, что этот год был относительно сухим и тёплым, так как отмечались более высокие температуры по сравнению со среднемноголетними, при этом количество осадков было ниже среднемноголетних значений.

Список источников

1. Вопросы географии. Сб. 145: Гидрологические изменения / отв. ред. В.М. Котляков, Н.И. Коронкевич, Е.А. Барабанова. М.: Кодекс, 2018. 432 с.
2. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И. А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
3. 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.
4. Киреева М.Б., Фролова Н.Л. Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона // Водное хозяйство России. 2013. № 1. С. 60–76.
5. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России / А.Г. Георгиади, Н.И. Коронкевич, И.П. Милукова [и др.]. М.: МАКС Пресс, 2014. 214 с.
6. 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.
7. Kuz'mina Zh.V. The Analysis of the Long-Term Meteorological Trends on the South Russia and Ukraine (from Forest-Steppe to Deserts) // Aridniye ekosistemy. 2007. Vol. 13, № 32. P. 461.
8. Назаренко О.В. Изменение некоторых метеорологических показателей в условиях засушливой степи // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2019. № 4. С. 84–90.
9. Nazarenko O.V. On the effect of climatic factors on groundwater in the Don-Donetsk basin in the second half of the 20th century // Water Resources. 2006. Vol. 33, № 4. P. 463–468.
10. Nazarenko O.V. Variability of the water regime of the lower Don // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGM 2019: Conference proceedings. Albena: STEF92 Technology, 2019. P. 617–624. Doi: 10.5593/sgem2019/3.1/S12.079.

11. Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B., Safronova T.I. Climate-Induced Changes in Groundwater Runoff in Don Basin // *Water Resources*. 2010. Vol. 37, No. 5. P. 733–742.
12. Лурье П.М., Панов В.Д., Ткаченко Ю.Ю. Река Кубань: гидрография и режим стока. СПб.: Гидрометеоиздат, 2005. 498 с.
13. Мельникова Т.Н. Многолетняя изменчивость годового стока рек Северо-Западного Кавказа. Майкоп: Изд-во АГУ, 2003. С. 49–50.
14. Мельникова Т.Н. Гидрометеорологическая изученность Северо-Западного Кавказа // *Вестн. Адыгейского гос. ун-та. Естественно-математические и технические науки*. 2011. № 4. С. 91–96.
15. Мельникова Т.Н. Многолетняя изменчивость годового стока рек Северо-Западного Кавказа и особенности её пространственного распределения // *Вестн. Адыгейского гос. ун-та. Естественно-математические и технические науки*. 2015. № 1. С. 64–69.
16. Погода и климат. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 02.04.2021).
17. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 05.04.2021).
18. Климатологический справочник СССР. Вып. 13, ч. 1: Температура воздуха. Л.: Гидрометеоиздат, 1957. 362 с.
19. Климатологический справочник СССР. Вып. 13, ч. 2–3: Атмосферные осадки, снежный покров. Л.: Гидрометеоиздат, 1957. 362 с.
20. Обзор состояния и тенденций изменения климата России. М., 2008–2019. URL: <http://climatechange.igce.ru/> (дата обращения: 11.05.2021).

References

1. Kotlyakov V.M., Koronkevich N.I., Barabanova E.A., eds. *Problems of Geography. Vol. 145. Hydrological changes*. Moscow: Kodeks Publ.; 2018. 432 p. (In Russ.).
2. Shiklomanov I.A., ed. *Water resources of Russia and their use*. Saint Petersburg: State Hydrological Institute Press; 2008. 600 p. (In Russ.).
3. Dmitriyeva V. A., Maskaykina 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. Geography. Geoecology*. 2013;(1):17-21. (In Russ.).
4. Kireyeva M.B., Frolova N.L. Present-day special features of the Don river basin rivers spring tide. *Vodnoe khozyaystvo Rossii = Water Sector of Russia*. 2013;(1):60-76. (In Russ.).
5. Georgiadi A. G., Koronkevich N. I., Milyukova I. P., et al. *Modern and scenario changes in river runoff in the basins of the largest rivers in Russia*. Moscow: MAKS Press; 2014. 214 p. (In Russ.).
6. Lur'e P.M., Panov V.D. An influence of climate changes on hydrological regime of the Don river in the early 21st century. *Russian Meteorology and Hydrology*. 1999;(4):62-68.
7. Kuz'mina Zh.V. The Analysis of the Long-Term Meteorological Trends on the South Russia and Ukraine (from Forest-Steppe to Deserts). *Aridniye ekosistemy*. 2007;13(32):461.
8. 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*. 2019;(4):84-90. (In Russ.).
9. Nazarenko O.V. On the effect of climatic factors on groundwater in the Don-Donetsk basin in the second half of the 20th century. *Water Resources*. 2006;33(4):463-468.
10. Nazarenko O.V. Variability of the water regime of the lower Don. *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019*. Conference Proceedings. Albena: STEF92 Technology Publ.; 2019:617-624, doi: 10.5593/sgem2019/3.1/S12.079.
11. Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B., Safronova T.I. Climate-Induced Changes in Groundwater Runoff in Don Basin. *Water Resources*. 2010;37(5):733-742.
12. Lur'e P.M., Panov V.D., Tkachenko Yu.Yu. *The River Kuban: hydrography and run-off regime*. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat Publ.; 2005. 498 p. (In Russ.).
13. Melnikova T.N. *Long-term variability of an annual runoff of the rivers of the North-West Caucasus*. Mai-kop: Adygea State University Press; 2003:49-50. (In Russ.).
14. Melnikova T. N. A hydrometeorological study of the North-West Caucasus. *Vestn. Adygeyskogo gos. un-ta. Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki = The Bulletin of the Adyghe State University. Natural-Mathematical and Technical Sciences*. 2011;(4):91-96. (In Russ.).
15. Melnikova T. N. Long-term variability of an annual runoff of the rivers in the North-West Caucasus and features of its spatial distribution. *Vestn. Adygeyskogo gos. un-ta. Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki = The Bulletin of the Adyghe State University. Natural-Mathematical and Technical Sciences*. 2015;(1):64-69. (In Russ.).

16. *Weather and climate*. Available from: <http://www.pogodaiklimat.ru/> [Accessed 2nd April 2021]. (In Russ.).
17. *Automated information system of state monitoring of water objects (AIS GMVO)*. Available from: <https://gmvo.skniihv.ru/> [Accessed 5th April 2021]. (In Russ.).
18. *Climatological directory of the USSR*. Leningrad: Gidrometizdat Publ.; 1957;13(1). 362 p. (In Russ.).
19. *Climatological directory of the USSR*. Leningrad: Gidrometizdat Publ.; 1957;13(2-3). 362 p. (In Russ.).
20. *Overview of the state and trends of climate change in Russia*. Moscow, 2008-2019. Available from: <http://climatechange.igce.ru/> [Accessed 11th May 2021]. (In Russ.).

Информация об авторах

Л.А. Овчаренко – магистрант, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Е.А. Короткова – магистрант, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле.

Information about the authors

L.A. Ovcharenko - Master Student, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

E.A. Korotkova - Master Student, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences.

*Статья поступила в редакцию 06.03.2022; одобрена после рецензирования 12.04.2022; принята к публикации 30.08.2022.
The article was submitted 06.03.2022; approved after reviewing 12.04.2022; accepted for publication 30.08.2022.*

Научная статья

УДК 504.05

doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-70-78

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЗЕЛЕННОЙ МАССЕ КУСТАРНИКОВ ВИДА *BETULA NANA* (БЕРЕЗА КАРЛИКОВАЯ) В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

Илья Викторович Плотников

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

iplotnikov@sfedu.ru

Аннотация. Рассматриваются особенности распределения и накопления тяжелых металлов в зеленой массе кустарников *Betula nana* (береза карликовая) на территориях Ямало-Ненецкого автономного округа, подверженных антропогенной нагрузке. Определены относительные концентрации элементов Ni, Cu, Cd, Mn, Zn, Pb в зеленой массе кустарников. Выявлены элементы (Cd, Ni, Mn) с аномальными концентрациями в исследованной зеленой массе условно фоновой территории относительно кларкового содержания в растениях суши. Для всех рассмотренных районов с повышенной антропогенной нагрузкой характерно аномальное относительно условно фоновое содержание кадмия, цинка и марганца в зеленой массе *Betula nana*, также в районе грунтовой автодороги у Яр-Сале обнаружены высокие концентрации меди и свинца. Наибольшим коэффициентом концентрации в районе грунтовой автодороги обладает Pb (11,81), для ценопопуляций *Betula nana* у железной дороги Обская – Бованенково в наибольшей степени характерно накопление Cd (2,4), в районе автодороги Салехард – Аксарка и ГТЭС-3 выявлен наибольший коэффициент концентрации для Zn (14,24). Также исследован характер распространения тяжелых металлов от источников, среди изученных элементов наиболее дальний перенос характерен для марганца, а кадмий и медь, напротив, осаждаются на прилегающей к источникам территории. Сделаны выводы об основных путях попадания тяжелых металлов в окружающую среду в регионе.

Ключевые слова: тяжелые металлы, *Betula nana*, антропогенная нагрузка

Для цитирования: Плотников И.В. Особенности накопления тяжелых металлов в зеленой массе кустарников вида *Betula nana* (береза карликовая) в условиях повышенной антропогенной нагрузки // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 3. С. 70–78.

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

Original article

FEATURES OF ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN THE GREEN MASS OF *BETULA NANA* SHRUBS UNDER CONDITIONS OF INCREASED ANTHROPOGENIC IMPACT

Ilya V. Plotnikov

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

iplotnikov@sfedu.ru

Abstract. The features of the distribution and accumulation of heavy metals in the green mass of *Betula nana* (dwarf birch) shrubs in the territories of the Yamalo-Nenets Autonomous District exposed to anthropogenic load are considered. The relative concentrations of the elements Ni, Cu, Cd, Mn, Zn, Pb in the green mass of shrubs

© Плотников И.В., 2022

were determined. Elements (Cd, Ni, Mn) with abnormal concentrations in the studied green mass of the conditionally background territory, relative to the clark content in land plants, were identified. The anomalous content of cadmium, zinc and manganese in the *Betula nana* green mass is characteristic of all the considered areas with increased anthropogenic load, and high concentrations of copper and lead were also found in the area of the unpaved highway near Yar-Sale. Pb has the highest concentration coefficient in the area of a dirt road (11.81), Cd accumulation is most characteristic for the *Betula nana* cenopopulations near the Obskaya-Bovanenkovo railway (2.4), the highest concentration coefficient for Zn (14.24) was found in the area of the Salekhard-Aksarka highway and GTPP-3. The nature of the distribution of heavy metals from sources is also investigated, among the studied elements, the most distant transfer is characteristic of manganese, and cadmium and copper, on the contrary, are deposited on the territory adjacent to the sources. Conclusions are drawn about the main ways of heavy metals getting into the environment in the region.

Keywords: heavy metals, *Betula nana*, anthropogenic impact

For citation: Plotnikov I.V. Features of Accumulation of Heavy Metals in the Green Mass of *Betula Nana* Shrubs under Conditions of Increased Anthropogenic Impact. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(3):70-78. (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

Освоение тундровых территорий Арктики способствует увеличению антропогенной нагрузки на компоненты природной среды. Уязвимость тундровой растительности определяется низкой скоростью её самовосстановления. При этом в настоящее время тундра является наиболее сохранившейся в первозданном виде природной зоной, что вызывает повышенный интерес к изучению тундровых растительных сообществ, в том числе непосредственно к ценопопуляциям вида *Betula nana*, который преобладает в кустарниковых сообществах южной тундры [1–4].

Одним из факторов техногенного воздействия на растительные сообщества, связанных с промышленным и инфраструктурным освоением территорий, является токсическое действие тяжелых металлов (ТМ). Поступление в растительные организмы ТМ из окружающей среды происходит при поглощении их корневой системой и листьями. Высокая концентрация ТМ в растениях приводит к ограничению роста и фотосинтеза, развитию хлороза, нарушению растительного покрова [5–8].

Целью данного исследования является установление особенностей накопления ТМ в зеленой массе кустарников *Betula nana* в условиях повышенной антропогенной нагрузки. Для достижения цели были выполнены задачи:

1. Определение степени накопления ТМ в зеленой массе *Betula nana* на условно фоновых ненарушенных территориях южной тундры Ямала.
2. Выделение anomalно содержащихся ТМ в зеленой массе *Betula nana* для территорий, расположенных в непосредственной близости от объектов антропогенного воздействия разного рода.
3. Выявление характеристики распределения ТМ в зеленой массе кустарников *Betula nana* по мере удаления от объектов антропогенного загрязнения.

Объекты и методы исследования

Отбор проб растительного материала кустарников *Betula nana* для исследования производился во второй половине июля 2021 г. на территории Ямало-Ненецкого автономного округа. Всего было заложено 20 исследовательских площадок размером 20×20 м, распределенных по 4 участкам. На всех исследованных территориях береза карликовая является доминирующим видом кустарникового яруса с проективным покрытием более 50 %. На рис. 1 представлена карта-схема с указанием исследованных территорий.

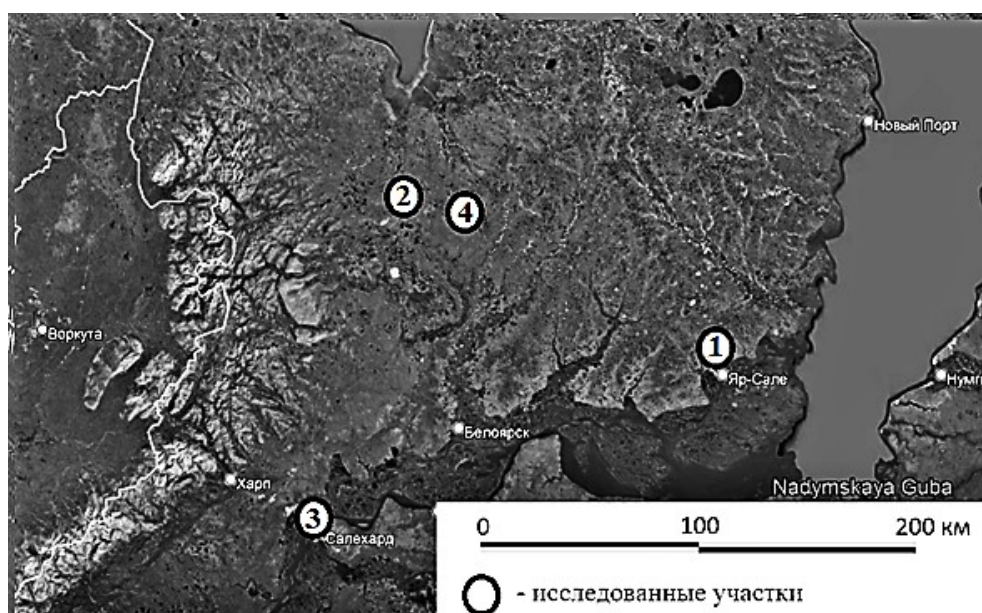


Рис. 1. Карта-схема расположения участков, включенных в исследование (за основу взят спутниковый снимок TerraMetrics) / Fig. 1. Map-layout of the sites included in the study (based on the TerraMetrics satellite image)

1. Участок к северу от Яр-Сале. В качестве объекта антропогенной нагрузки здесь выступает грунтовая тундровая дорога – одна из множества дорог без покрытия в южной тундре Ямала. Она представляет собой хаотично расположенные колеи, с нарушением почвенного и растительного покрова общей шириной механического воздействия от 20 до 140 м. На момент проведения полевых исследований в июле 2021 г. на данной линии фиксировался трафик 0,5–4 транспортных средства в час, подавляющую часть представляли снегоходы.

2. Район оз. Юнто, у железной дороги Обская – Бованенково, которая является крупнейшим линейным источником антропогенного загрязнения и единственной железнодорожной линией на полуострове Ямал. Дорога не электрифицирована.

3. Участок к северу от г. Салехарда. Объектами техногенного загрязнения на участке являются автодорога Салехард – Аксарка и ГТЭС-3. Содержание ТМ в выбросах газовой электростанции незначительное, однако поступающие оксиды углерода, серы, азота увеличивают подвижность ТМ в окружающей среде и биологическое поглощение растениями [6, 9–12].

4. Условно фоновый участок, удаленный от объектов локальной антропогенной нагрузки, координаты центра: 67°37'23"С, 68°24'33"В.

Отобранную с исследовательских площадок зеленую массу кустарников *Betula nana* сушили, измельчали, производили сухое озоление с последующим растворением остатка в смеси кислот. Затем в полученном растворе с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра «Спектроскан МАКС – GV» определяли концентрации ТМ (Ni, Cu, Cd, Mn, Zn, Pb).

Результаты и обсуждение

Согласно полученным результатам, ряд абсолютных значений накопленных ТМ в сухой зеленой массе кустарников *Betula nana* условно фоновых территорий выглядит следующим образом: Mn (265,4 мг/кг) > Zn (21,41 мг/кг) > Ni (9,88 мг/кг) > Cu (4,26 мг/кг) > Pb (0,369 мг/кг) > Cd (0,168 мг/кг).

При сравнении концентраций элементов в зеленой массе кустарников условно фоновом участке с кларковым содержанием, характерным для биомассы наземных растений в целом [13], обнаружены anomalно высокие относительные значения содержаний Cd, Ni, Mn. Общий ряд относительной концентрации элементов в зеленой массе *Betula nana* на условно фоновом участке представлен в виде (в скобках указан коэффициент концентрации относительно кларка для наземных растений): Ni (4,94) > Cd (4,8) > Mn (1,29) > Zn (0,71) > Cu (0,53) > Pb (0,30). В работах

других авторов отмечаются характерные для кустарников тундры высокие коэффициенты биологического поглощения Cd, Mn, Zn [1, 14], а поступление Ni в природную среду региона может быть связано с дальним атмосферным переносом [4].

Чтобы выявить особенности накопления элементов для участков с повышенной антропогенной нагрузкой, были выделены ТМ с аномальными концентрациями в зеленой массе *Betula nana* в непосредственной близости от источников антропогенной нагрузки, подсчитаны коэффициенты концентрации относительно условно фоновых значений. Полученные результаты представлены в таблице.

Ряды аномальной концентрации ТМ в зеленой массе *Betula nana* вблизи источников техногенного воздействия / Series of anomalous concentrations of heavy metals in the green mass of *Betula nana* near sources of technogenic impact

Источник антропогенной нагрузки	Ряд выявленных аномально накапливающихся элементов на ближайшей к объекту точке отбора (в скобках указан коэффициент концентрации)
Тундровая грунтовая дорога у Яр-Сале	Pb (11,81) > Mn (7,53) > Cd (7,53) > Zn (1,90) > Cu (1,72)
Ж/д Обская – Бованенково	Cd (2,4) > Mn (2,33) > Zn (1,66)
Автодорога Салехард – Аксарка, ГТЭС-3	Zn (14,24) > Mn (6,66) Cd > (3,88)

Таким образом, выделяются элементы с аномальной концентрацией (цинк, кадмий и марганец), характерной для всех рассмотренных зон воздействия. Помимо данных элементов, на площадке, прилегающей к грунтовой дороге у Яр-Сале, отмечаются высокие коэффициенты накопления свинца и меди.

Для никеля не выявлено аномальных концентраций в зонах антропогенной нагрузки, что объясняется относительно высокими фоновыми значениями содержания во всех компонентах среды, связанными с региональным загрязнением, вследствие дальнего атмосферного переноса [4].

Отдельно рассмотрим распределение ТМ в зеленой массе березы карликовой в зонах влияния каждого источника. На рис. 2 представлены графики распределения ТМ на профиле при удалении от грунтовой дороги у Яр-Сале.

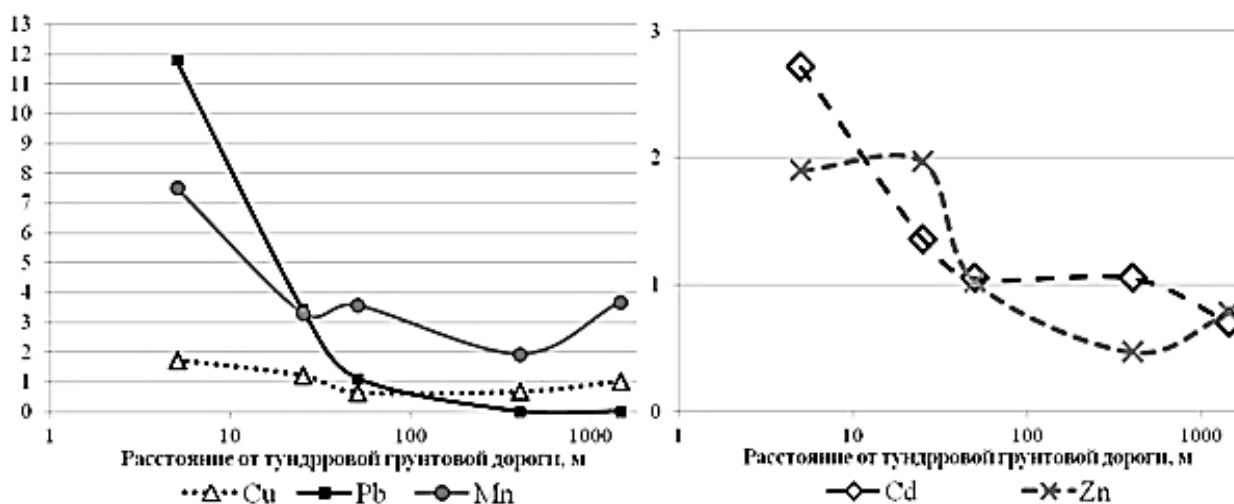


Рис. 2. Коэффициенты концентрации ТМ (ордината) в зеленой массе растений вида *B. nana* при удалении от тундровой дороги в районе Яр-Сале / Fig. 2. Coefficients of heavy metals concentration in the green mass of plants of the *B. nana* species at a distance from the tundra road in the Yar-Sale area

Для пяти исследованных элементов наблюдается выраженный тренд снижения концентраций по мере удаления от тундровой дороги. Концентрация меди в зеленой массе *Betula nana* на прилегающей к дороге территории составила 7,3 мг/кг, на отдалении в 25 м значения в 1,4 раза ниже

(достигают околофоновых уровня). Аномальные значения для цинка характерны для двух ближайших к дороге точек – 40,7 и 43,6 мг/кг, что почти в 2 раза выше условного фона. Концентрация кадмия в зеленой массе *B. nana* достигает максимума (0,456 мг/кг) в придорожной зоне при коэффициенте концентрации 2,71. На расстоянии 25 м достигает околофоновых значений. В целом ширина зоны накопления Cd, Cu, Zn в зеленой массе вдоль дороги не превышает 25–50 м.

Содержание марганца достигает максимальных значений (1999,2 мг/кг) на расстоянии 5 м от дороги, на удалении 25 м снижается более чем в 2 раза, на удалении в 400 м – в 3,9 раза. Таким образом, среди исследованных элементов для Mn наблюдается наиболее удаленный перенос.

Накопление свинца в придорожной зоне имеет наиболее выраженный характер. Относительно высокое значение концентрации на площадке рядом с дорогой – 4,36 мг/кг, что в 11,4 раза выше значений, характерных для ненарушенных условно фоновых территорий. По мере удаления от дороги концентрация Pb значительно снижается: на расстоянии в 25 м в 3,3 раза ниже, чем у края дороги, на расстоянии 50 м – в 10 раз.

Попадание свинца в природную среду у дороги связано с выбросами масла и выхлопами при сгорании топлива с содержанием тетраэтилсвинца, что особенно было выражено до введения ограничений на использование подобного топлива в 2002 г. Цинк и медь также поступают вместе с маслом и при износе, коррозии деталей моторизованных транспортных средств. Марганец, кадмий и цинк попадают в придорожное пространство в первую очередь при истирании резиновых шин [15–18].

Следующим типом рассмотренных инфраструктурных объектов в тундре являются железные дороги, в частности линия Обская – Бованенково. Результаты анализа на выявление концентраций ТМ в рассмотренной зоне у железной дороги представлены на рис. 3.

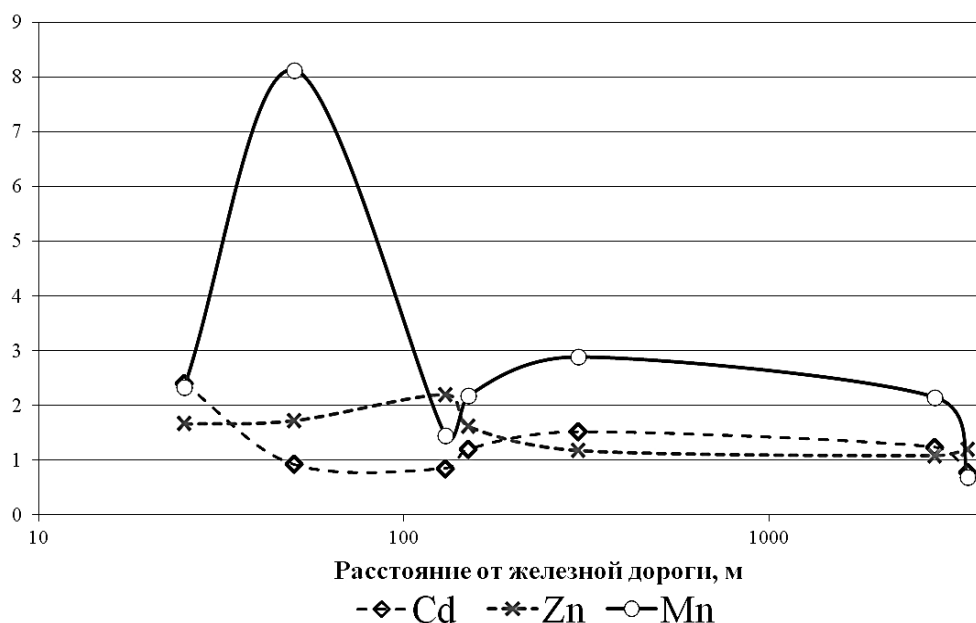


Рис. 3. Коэффициенты концентрации ТМ в зеленой массе растений вида *B. nana* на различном удалении от ж/д Обская – Бованенково / Fig. 4. Coefficients of heavy metals concentration in the green mass of plants of the species *B. nana* at different distances from the railway Obskaya-Bovanenkovo

Максимальное содержание марганца наблюдается на расстоянии 50 м от дороги – 2157 мг/кг, что более чем в 8 раз превышает условно фоновый уровень. На последующих площадках наблюдаются коэффициенты концентрации от 1,5 до 3 вплоть до точки отбора, удаленной на 2850 м от железной дороги. Можно заметить, что у железной дороги создаются условия для относительно дальнего переноса данного элемента с пиком накопления на расстоянии около 50 м.

Наибольшие значения коэффициента концентрации цинка достигаются на расстоянии 130 м – 59,2 мг/кг, в 2,2 раза выше условного фона. На площадках с удалением 300 м и дальше наблюдаются околофоновые значения содержания элемента. Распределение Zn в профиле говорит о меньшей степени поступления, чем Mn, но более дальней точке максимального осаждения.

Аномалия концентрации кадмия выявлена только на самой близкой площадке к железной дороге – в 2,4 раза выше условно фонового значения. Данный элемент, в отличие от Mn и Zn, в исследованной зоне у железной дороги не имеет широкой полосы распространения, оседая в прилегающей к источнику зоне.

Полученные результаты частично согласуются с работами других авторов [19–21] по изучению накопления ТМ в природных компонентах зон вдоль железных дорог других регионов. Марганец является составным компонентом (0,5–1,7 %) железнодорожных рельсов, колесных пар, подшипников и тормозных колодок. Со стиранием подшипников скольжения связано поступление цинка в природную среду зоны вдоль железных дорог. Попадание кадмия при рассмотрении неэлектрифицированной железной дороги обусловлено в первую очередь пылением грузов. В отличие от других регионов и природных компонентов в исследовании зеленой массы *Betula nana* не было обнаружено аномальных концентраций никеля, меди и свинца. Объясняется это в первую очередь отсутствием электрификации, так как отмеченные элементы являются компонентами железнодорожных аккумуляторных батарей, конденсаторов, токосъемников и проводов [19–21]. Как и в случае с участком у Яр-Сале, присутствует изначально высокая фоновая концентрация никеля, обусловленная в том числе дальним воздушным переносом [4].

Следующая исследованная территория расположена к северу от города Салехарда, в секторе преобладающего воздушного переноса от электростанции ГТЭС-3 и автодороги Салехард – Аксарка. Полученные результаты распределения коэффициентов накопления ТМ в зеленой массе *B. nana* представлены на рис. 4.

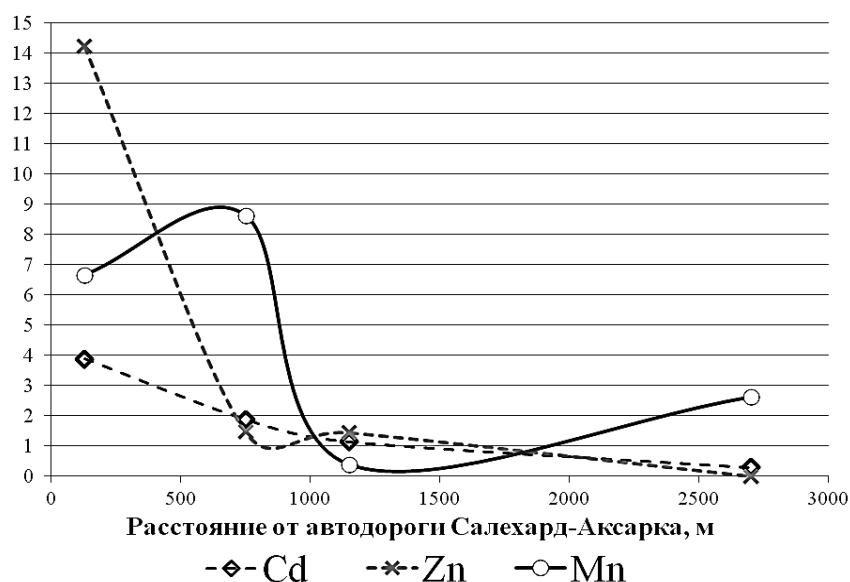


Рис. 4. Распределение коэффициентов концентраций ТМ в зеленой массе *B. nana* относительно автодороги Салехард – Аксарка / Fig. 5. Distribution of heavy metals concentration coefficients in the *B. nana* green mass relative to the Salekhard-Aksarka highway

Наибольшие коэффициенты концентрации отмечаются для цинка, более чем в 14 раз превышающие условный фон на ближайшей к автодороге Салехард – Аксарка площадке. На удалении 750 м концентрация цинка падает в 10 раз, достигая околочонового значения.

Марганец в зеленой массе *B. nana* в первой точке отбора имеет коэффициент концентрации 6,66, однако максимум достигается на удалении 750 м от дороги, где концентрация почти в 9 раз выше фонового уровня. На расстоянии 1150 м концентрация значительно снижается, но в точке отбора в 2700 м от дороги снова показывает аномальные значения коэффициента концентрации – 2,63. Таким образом, для Mn, как и в случае с железной и грунтовой дорогой, наблюдается более дальний перенос.

Коэффициент концентрации кадмия на расстоянии 130 м составляет 3,88 от фонового значения, сохраняется аномальная концентрация и на удалении 750 м коэффициентом концентрации 1,88. На большем удалении значения приближены к условно фоновому уровню.

В отличие от грунтовой дороги аномальных значений Pb и Cu не наблюдалось, что может быть связано с использованием более качественного, неэтилированного топлива и меньшим уровнем попадания моторного масла – источника меди – в окружающую среду, а также небольшим расстоянием переноса данных элементов от источников выброса [16, 17].

Заключение

1. На ненарушенных территориях южной тундры Ямала присутствуют аномальные для растений суши концентрации (в скобках указан коэффициент концентрации относительно кларка для растений суши) Cd (6,62), Ni (4,32), Mn (3,33). Основываясь на работах других авторов [1, 4, 14], можно сделать вывод о том, что высокое содержание Cd и Mn связано с высокими коэффициентами биологического поглощения кустарников данных элементов, а поступление Ni обусловлено дальним атмосферным переносом с общим региональным загрязнением.

2. Во всех зонах, прилегающих к антропогенным объектам (тундровая грунтовая дорога, железная дорога, асфальтированная автодорога и газовая теплоэлектростанция), были выявлены общие аномально накапливающиеся элементы – марганец, кадмий, цинк. На площадке, расположенной в непосредственной близости от тундровой грунтовой дороги, аномальные значения концентрации относительно условного фона наблюдались также у свинца и меди.

3. В зоне воздействия тундровой грунтовой дороги к северу от Яр-Сале происходит накопление в зеленой массе элементов Pb, Mn, Cd, Cu, Zn, наибольшие коэффициенты концентрации имеют Pb и Mn. При этом свинец распространяется в узкой полосе до 100 м от дороги, марганец имеет более дальнее распространение (более 1000 м). Основными источниками ТМ в районе грунтовой дороги являются продукты сгорания топлива, попадание масла, истирание шин и деталей транспортных средств.

В районе железной дороги Обская – Бованенково происходит накопление Mn, Cd, Zn, обнаружены наибольшие коэффициенты концентрации Mn и Cd, здесь также наблюдается относительное дальнее распространение Mn (более 1000 м), Cd, напротив, распространяется не более чем на 50 м от железной дороги. Mn и Zn могут поступать в окружающую среду при истирании и разрушении деталей подвижного состава и частей железнодорожного полотна, а Cd в окружающую среду в первую очередь поступает при пылении перевозимого груза.

В районе автодороги Салехард – Аксарка и ГТЭС-3, как и в случае с железной дорогой, наблюдаются повышенные аномальные концентрации Mn, Cd, Zn, однако первостепенное значение в данном случае имеет цинк, затем марганец. Марганец имеет более дальнее распространение с наличием аномалий на удалении 2700 м. Поступление ТМ в окружающую среду в данном случае обусловлено теми же самыми факторами, что и в случае с грунтовой дорогой. Но наблюдаются различия, связанные с характером транспортных средств и трафиком, в результате фиксируется преобладание Zn, поступающего в первую очередь как продукт истирания шин. Также стоит учитывать наличие поступающих в среду кислотных оксидов при выбросах с ГТЭС-3: кислотные условия повышают подвижность и усиливают биологическое поглощение ТМ кустарниками.

Список источников

1. *Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Арестова И.Ю., Кукушкин С.Ю., Спасский В.В., Никитина М.А., Елсукова Е.Ю., Шейнерман Н.А., Недбаев И.С.* Использование методов биоиндикации и биотестирования в оценке экологического состояния территории газоконденсатных месторождений севера Западной Сибири // Вестн. СПбГУ. Науки о Земле. 2018. № 3. С. 326–343.
2. *Трегубов О.Д.* Об устойчивости тундр к техногенному воздействию и глобальным изменениям среды // Вестн. ДВО РАН. 2010. № 4. С. 79–89.
3. *Патова Е.Н., Кулюгина Е.Е., Денева С.В.* Процессы естественного восстановления почв и растительного покрова на отработанном угольном карьере (Большеземельская тундра) // Экология. 2016. № 3. С. 173–179.
4. *Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г.* Оценка экологического состояния природной среды районов добычи нефти и газа в ЯНАО // Вестн. СПбГУ. Науки о Земле. 2012. № 4. С. 87–101.
5. *Узаков З.З.* Тяжелые металлы и их влияние на растения // Символ науки. 2018. № 1–2. С. 52–54.
6. *Медведев И.Ф., Деревягин С.С.* Тяжелые металлы в экосистемах. Саратов: Ракурс, 2017. 178 с.

7. Ветчинникова Л.В., Кузнецова Т.Ю., Титов А.Ф. Особенности накопления тяжелых металлов в листьях древесных растений на урбанизированных территориях в условиях Севера // Тр. КарНЦ РАН. 2013. № 3. С. 68–73.
8. Яковлева Е.В., Габов Д.Н., Везхов К.С. Накопление полиаренов в почвах и кустарниках *Betula nana* в условиях южной тундры // Изв. Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 2 (34). С. 33–42.
9. Теплая Г.А. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (обзор литературы) // Астраханский вестн. экол. образования. 2013. № 1 (23). С. 182–192.
10. Регинский А.С. Программа комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры муниципального образования город Салехард Ямало-Ненецкого автономного округа на период до 2040 г. М., 2020. 549 с.
11. Доклад «Об экологической ситуации в Ямало-Ненецком автономном округе в 2019 году». Салехард, 2020. 348 с.
12. Сакова Н.В. Анализ экологичности газотурбинной теплоэлектростанции // ОНВ. 2010. № 3 (93). С. 180–184.
13. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М.: Академия, 2003. 400 с.
14. Тентюков М.П. Экогеохимия районов промышленного освоения Большеземельской тундры и Ямала : дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Сыктывкар, 2016. 336 с.
15. Лёвкин Н.Д., Лазеба А.В. Распространение тяжелых металлов в зоне движения автотранспорта // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. 2014. № 3. С. 9–16.
16. Петрова Е.Е., Райхерт Е.Р. Влияние автотранспорта на накопление цинка и свинца в почвах и их биологическое поглощение пшеницей мягкой (*Triticum aestivum*) в придорожных агроценозах (в условиях Алейского района Алтайского края) // Изв. АлтГУ. 2013. № 3 (79). С. 42–46.
17. Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов. Челябинск: ЮУрГУ, 2005. 403 с.
18. Семенова В.В. Аккумуляция тяжелых металлов представителями рода тысячелистник (*Achillea L.*) в условиях высотной зональности Северо-Восточного Кавказа: дис. ... канд. биол. наук. Н. Новгород, 2020. 199 с.
19. Журавлева М.А. Экологическая оценка распределения тяжелых металлов в полосе отвода железных дорог: дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 209 с.
20. Казанцев И.В., Зарубин Ю.П., Пурыгин П.П. Влияние подвижного состава на содержание тяжелых металлов в почвах и растениях полосы отвода железных дорог // Вестн. СамГУ. Естественно-научная серия. 2007. № 2. С. 172–179.
21. Тихонова Л.В., Тельминова О.В., Ларионова А.П. Накопление некоторых тяжелых металлов в почвах и растениях вблизи железной дороги // Вестн. Курганского гос. ун-та. 2006. № 4 (8). С. 106–108.

References

1. Opekunova M.G., Opekunov A.Yu., Arestova I.Yu., Kukushkin S.Yu., Spassky V.V., Nikitina M.A., El-sukova E.Yu., Sheinerman N.A., Nedbaev I.S. The use of bioindication and biotesting methods in assessing the ecological state of the territory of gas condensate fields in the North of Western Siberia. *Vestn. SPbGU. Nauki o Zemle = Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences*. 2018;(3):326-343. (In Russ.).
2. Tregubov O. D. On the resistance of tundras to man-made impacts and global environmental changes. *Vestn. DVO RAN = Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*. 2010;(4):79-89. (In Russ.).
3. Patova E.N., Kulyugina E.E., Deneva S.V. Processes of natural restoration of soils and vegetation cover at a spent coal quarry (Bolshezemelskaya tundra). *Ekologiya = Ecology*. 2016;(3):173-179. (In Russ.).
4. Opekunov A.Yu., Opekunova M.G., Kukushkin S.Yu., Ganul A.G. Assessment of the ecological state of the natural environment of oil and gas production areas in the Yamalo-Nenets Autonomous District. *Vestn. SPbGU. Nauki o Zemle = Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences*. 2012;(4):87-101. (In Russ.).
5. Uzakov Z.Z. Heavy metals and their effect on plants. *Simvol nauki = A Symbol of Science*. 2018;(1-2):52-54. (In Russ.).
6. Medvedev I.F., Derevyagin S.S. *Heavy metals in ecosystems*. Saratov: Rakurs Publ.; 2017. 178 p. (In Russ.).
7. Vetchinnikova L.V., Kuznetsova T.Yu., Titov A.F. Features of the accumulation of heavy metals in the leaves of woody plants in urbanized territories in the conditions of the North. *Tr. KarNC RAN = Proceedings of the Karelian Scientific Center, Russian Academy of Sciences*. 2013;(3):68-73. (In Russ.).
8. Yakovleva E.V., Gabov D.N., Vezhov K.S. Accumulation of polyarenes in soils and shrubs of betula papa in conditions of the southern tundra. *Izv. Komi NTs UrO RAN = Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences*. 2018;(2):33-42. (In Russ.).
9. Teplyaya G.A. Heavy metals as a factor of environmental pollution (literature review). *Astrakhanskiy vestn. ekol. obrazovaniya = Astrakhan Bulletin for Environmental Education*. 2013;(1):182-192. (In Russ.).

10. Reginsky A.S. *Program of integrated development of municipal infrastructure systems of the municipality of Salekhard of the Yamalo-Nenets Autonomous District for the period up to 2040*. Moscow, 2020. 549 p. (In Russ.).
11. *On the environmental situation in the Yamalo-Nenets Autonomous District in 2019*. Salekhard, 2020. 348 p. (In Russ.).
12. Sakova N.V. Analysis of environmental friendliness of a gas turbine thermal power plant. *ONV = Omsk Scientific Bulletin*. 2010;(3):180-184. (In Russ.).
13. Dobrovolsky V.V. *Fundamentals of biogeochemistry*. Moscow: Akademiya Publ.; 2003. 400 p. (In Russ.).
14. Tentyukov M. P. *Ecogeochemistry of industrial development areas of the Bolshezemelskaya tundra and Yamal*. Dissertation. Syktyvkar, 2016. 336 p. (In Russ.).
15. Levkin N.D., Lazeba A.V. Distribution of heavy metals in the zone of motor transport movement. *Izv. TulGU. Nauki o Zemle = Izvestiya Tula State University*. 2014;(3):9-16. (In Russ.).
16. Petrova E.E., Reichert E.R. The influence of motor transport on the accumulation of zinc and lead in soils and their biological absorption by soft wheat (*Triticum aestivum*) in roadside agrocenoses (in the conditions of the Aleysky district of the Altai Territory). *Izv. AltGU = Izvestiya of Altai State University*. 2013;(3):42-46. (In Russ.).
17. Sharoglazov B.A., Farafontov M.F., Klementyev V.V. *Internal combustion engines: theory, modeling and calculation of processes*. Chelyabinsk: South Ural State University Press; 2005. 403 p. (In Russ.).
18. Semenova V.V. *Accumulation of heavy metals by representatives of the genus yarrow (*Achillea L.*) in conditions of high-altitude zonality of the North-Eastern Caucasus*. Dissertation. Nizhny Novgorod, 2020. 199 p. (In Russ.).
19. Zhuravleva M.A. *Ecological assessment of the distribution of heavy metals in the right-of-way of railways*. Dissertation. Moscow, 2015. 209 p. (In Russ.).
20. Kazantsev I.V., Zarubin Y.P., Purygin P.P. The influence of rolling stock on the content of heavy metals in soils and plants of the right-of-way of railways. *Vestn. SamGU. Estestvenno-nauchnaya seriya = Vestnik of Samara University. Natural Science Series*. 2007;(2):172-179. (In Russ.).
21. Tikhonova L.V., Telminova O.V., Larionova A.P. Accumulation of some heavy metals in soils and plants near the railway. *Vestn. Kurganskogo gos. un-ta = Vestnik of Kurgan State University*. 2006;(4):106-108. (In Russ.).

Информация об авторе

И.В. Плотников – аспирант, кафедра геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле.

Information about the author

I.V. Plotnikov - Postgraduate, Department of Geocology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences.

*Статья поступила в редакцию 17.05.2022; одобрена после рецензирования 07.06.2022; принята к публикации 30.08.2022.
The article was submitted 17.05.2022; approved after reviewing 07.06.2022; accepted for publication 30.08.2022.*

Научная статья
УДК 551.510.5
doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-79-90

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАВНОВЕСИЯ СТОЛБА СЖИМАЕМОЙ АТМОСФЕРЫ. ЧАСТЬ 1: СТАЦИОНАРНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

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. Рассматривается упрощенная аэротермодинамическая модель, описывающая равновесие неограниченного сверху столба сжимаемой атмосферы. В рамках этой модели удается получить аналитические решения уравнений аэродинамики с учетом двух условий равновесия столба атмосферы: первое – это классическое условие гидростатики; второе – отсутствие движения вследствие изменений плотности атмосферы во времени. Для определения аналитического решения выбирались два граничных условия вблизи твердой поверхности: значения температуры и ее градиента. Такой выбор позволяет рассматривать столб без ограничительных условий на верхней границе. Решение для температуры может демонстрировать острый минимум на некоторой высоте, выше которого температура растет с высотой. При этом профиль температуры зависит от высоты почти линейно вблизи поверхности. Обсуждается физическая интерпретация решений с использованием экспериментальных измерений в атмосфере. Аналитическое решение для адиабатической температуры важно для некоторых приложений. Результаты исследования улучшают понимание протекающих в атмосфере процессов и могут использоваться в научных и образовательных целях.

Ключевые слова: математическая модель, столб сжимаемой атмосферы, равновесие столба атмосферы, нелинейные дифференциальные уравнения, климатическая модель

Для цитирования: Радионов А.А. Математическая модель равновесия столба сжимаемой атмосферы. Часть 1: Стационарные решения для температуры // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 3. С. 79–90.

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

Original article

MATHEMATICAL MODEL OF EQUILIBRIUM OF THE COLUMN OF COMPRESSIBLE ATMOSPHERE. PART 1: STATIONARY SOLUTION FOR TEMPERATURE

Anatoliy A. Radionoff

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

© Радионов А.А., 2022

Abstract. An analytical model of mathematical physics, which is implemented for an unbounded column of compressible atmosphere, is discussed. For the column, there are two equilibrium conditions, which are written in the form of a system of aerodynamic equations. The first condition is the classical condition of hydrostatic, which is derived from the equations of motion. The second one is derived from the continuity equation and arises due to temporal variations of air density. Two boundary conditions are selected near the solid surface: one is the magnitude of temperature and second condition is the magnitude of its vertical gradient. This allows us to consider the column without any restrictive conditions at some upper boundary. The analytical solution for adiabatic temperature can contain a sharp minimum at some height, above which the temperature rises with altitude. Herewith the temperature profile depends on the altitude linearly near the surface. 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.

Keywords: mathematical model, column of compressible fluid, equilibrium of the fluid column, nonlinear differential equations, climatic model.

For citation: Radionoff A.A. Mathematical Model of Equilibrium of the Column of Compressible Atmosphere. Part 1: Stationary Solution for Temperature. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(3):79-90. (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

Задача о равновесии столба атмосферы в поле силы тяжести является одной из самых известных в физике атмосферы. Почти все монографии в этой области содержат имеющееся решение этой задачи [1–6]. Математическая модель равновесия столба атмосферы выводится с упрощающим условием – отсутствием скоростей движений в столбе. В этом случае уравнения движения упрощаются до гипсометрического уравнения $dp/dz = -\rho g$, которое интегрируется с граничным условием $p(z = 0) = p_b$. 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 – некоторая средняя по столбу температура; R_a – универсальная газовая постоянная атмосферного воздуха; g – ускорение свободного падения, принимаемое константой. Зависимость g и температуры от высоты несложно учесть. Эта формула удовлетворительно описывает распределение давления для интервала высот, представляющих практический интерес.

Заметные отличия от барометрической формулы наблюдаются в атмосфере уже выше 8 км. С увеличением высоты эти отличия возрастают. Недостатки решений гипсометрического уравнения обсуждаются в работах [4–7]. При выяснении причин неудовлетворительности гидростатического приближения на высоте более 8 км отмечается необходимость учета стратификации атмосферы [4, 5]. Анализ процессов выделения тепла на высоте стратосферы можно найти в [3, 6, 8].

Размышления о причинах некорректности решений гипсометрического уравнения для высоты выше 8 км приводят к выводу, что только этого уравнения недостаточно, чтобы действительно не возникало вертикального движения. Это лишь одно из необходимых условий равновесия, которое неявно предполагает, что плотность воздуха не меняется во времени, т.е. атмосфера принимается несжимаемой. При этом очевидно, что необходимым условием равновесного состояния атмосферы является условие, связанное с зависимостью плотности от времени. Действительно, если плотность столба меняется во времени, из уравнения неразрывности можно записать $\partial w / \partial z \sim \partial \rho / \partial t$, где ρ – плотность; w – вертикальная компонента скорости; t – время. Следовательно, при изменении плотности во времени появляется движение воздуха и равновесие нарушается.

Изложенные аргументы показывают актуальность развития модельных представлений о столбе атмосферы. В настоящей работе представлена упрощенная математическая модель равновесного состояния столба сжимаемой атмосферы. При дополнительных допущениях удается получить аналитические решения для температуры столба сжимаемой атмосферы без ограничительных условий на верхней границе. Отметим, что использование граничных условий, задаваемых на определенной высоте внутри столба атмосферы, является одним из недостатков современных климатических моделей [8]. В приложениях адиабатические решения представляют самостоятельный интерес и важны как для прикладных задач, так и для фундаментальной науки об атмосфере.

Математическая модель

Введем неподвижную систему прямоугольных координат (x, y, z) , начало которой на поверхности Земли. Ось z направим вертикально вверх, x, y – горизонтальные координаты. Уравнение неразрывности имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \rho D = 0, \quad (1)$$

где $D = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y + \partial w / \partial z$ – дивергенция вектора скорости $\mathbf{v} = (u, v, w)$; ρ – плотность; $\partial / \partial \tau$ – оператор Стокса.

Уравнение неразрывности (1) показывает, что изменение во времени плотности элементарного объема воздуха определяется дивергенцией его скорости.

Уравнение сохранения импульса для горизонтальной компоненты скорости u , направленной вдоль оси Ox ,

$$\rho \frac{\partial u}{\partial \tau} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho f v + \mu_1 \nabla^2 u + \mu_2 \frac{\partial D}{\partial x}, \quad (2)$$

где p – давление; f – параметр Кориолиса; μ_1 – турбулентная вязкость воздуха; $\mu_2 = \zeta + \mu_1 / 3$, где ζ – вторая вязкость. Для описания турбулентности используется подход Экмана [9]. Обе величины μ_1 и μ_2 считаются далее не зависящими от координат (x, y, z) (в качестве некоторого приближения).

Уравнение сохранения импульса для горизонтальной компоненты скорости v , направленной вдоль оси Oy ,

$$\rho \frac{\partial v}{\partial \tau} = -\frac{\partial p}{\partial y} - \rho f u + \mu_1 \nabla^2 v + \mu_2 \frac{\partial D}{\partial y}. \quad (3)$$

Уравнение для вертикальной компоненты скорости w

$$\rho \frac{\partial w}{\partial \tau} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + \mu_1 \nabla^2 w + \mu_2 \frac{\partial D}{\partial z}. \quad (4)$$

Преобразуем уравнения (2)–(4) с целью получения уравнения для дивергенции. Для этого уравнение (2) частно продифференцируем по координате x , (3) – по координате y , (4) – по координате z . Полученные уравнения сложим. В результате имеем

$$\frac{\partial D}{\partial \tau} + D^2 - 2 \frac{\partial(u,v)}{\partial(x,y)} - 2 \frac{\partial(u,w)}{\partial(x,z)} - 2 \frac{\partial(v,w)}{\partial(y,z)} = -\frac{1}{\rho} \nabla^2 p + \frac{\nabla \rho \cdot \nabla p}{\rho^2} - \frac{\partial g}{\partial z} + f \xi + \frac{\mu_1 + \mu_2}{\rho} \nabla^2 D, \quad (5)$$

где f принимается константой, $\xi = \partial u / \partial y - \partial v / \partial x$. Использовано тождество

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 \equiv D^2 - 2 \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - 2 \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial z} - 2 \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial z}.$$

Якобианы определены формулами:

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

Уравнение (5) используется в некоторых алгоритмах вычислительной гидродинамики [10] для определения поля давления и называется уравнением Пуассона.

При описании равновесия вертикального столба атмосферы считаем, что все искомые величины зависят только от вертикальной координаты и времени. Вблизи равновесия скорости течения пренебрежимо малы, и их можно считать равными нулю. В этом случае уравнение (5) упрощается. Действие оператора Стокса сводится к частному дифференцированию по времени, оператора ∇ – к частному дифференцированию по вертикальной координате. Оператор Лапласа ∇^2 эквивалентен второй частной производной по вертикальной координате, якобианы в (5) равняются нулю, $\xi = 0$. Уравнение (5) принимает вид

$$\frac{\partial D}{\partial t} + D^2 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial g}{\partial z} + \frac{\mu_1 + \mu_2}{\rho} \frac{\partial^2 D}{\partial z^2}. \quad (6)$$

С учетом (1) уравнение (6) можно записать в виде

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - \frac{2}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right)^2 = \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + g \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \frac{\partial g}{\partial z} + (\mu_1 + \mu_2) \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \right). \quad (7)$$

Если плотность представима в виде произведения $\rho(t, z) = F(t)G(z)$, где $F(t)$ – функция времени; $G(z)$ – функция вертикальной координаты, то вязкие слагаемые в уравнении (7) исчезают. Это проверяется простой подстановкой: $\rho^{-1} \partial \rho / \partial t = F^{-1} \partial F / \partial t$. В результате $\partial(\rho^{-1} \partial \rho / \partial t) / \partial z \equiv 0$. В работе рассматривается этот случай.

Для столба атмосферы уравнение сохранения полной энергии $\epsilon = c_V \theta$ с учетом уравнения неразрывности (1) можно записать в виде [1]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{c_V} \frac{p}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{\rho c_V} \frac{\partial}{\partial z} \left(c_Q \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{Q}{\rho c_V}, \quad (8)$$

где θ , c_V , c_Q , Q – абсолютная температура, теплоемкость, теплопроводность, мощность источников/стоков тепла столба атмосферного воздуха соответственно. Уравнение состояния

$$p = \rho R_a \theta. \quad (9)$$

Равновесие столба атмосферы полностью описывается системой трех уравнений (7)–(9) с заданными граничными и начальными условиями.

Адиабатические процессы. Уравнение состояния (9) для адиабатических процессов записывается в виде

$$p = A \rho^\gamma, \quad (10)$$

где A – константа; $\gamma = 1,4$ – показатель адиабаты.

Для адиабатических атмосферных процессов уравнение (7) принимает вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} - \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{1}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)^2 = c^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{\gamma-1} \frac{1}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right) + g \frac{\partial T}{\partial z} + (\gamma-1) T \frac{\partial g}{\partial z}, \quad (11)$$

где $c^2 = \gamma R_a T$ – квадрат скорости звука, вычисленный с использованием адиабатической температуры T . Уравнение (11) выражает два условия равновесия столба сжимаемой адиабатической атмосферы.

Граничные условия для уравнения (11) имеют вид

$$\frac{\partial T}{\partial z} (z=0, t) = T_{zb}(t), T(z=0, t) = T_b(t), \quad (12)$$

где $T_{zb}(t)$, $T_b(t)$ – известные функции времени. В качестве начального условия примем некоторый профиль $T_s(z)$, известный из данных эксперимента.

Уравнение (8) можно переписать в виде

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{\rho c_V} \frac{\partial}{\partial z} \left(c_Q \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{Q}{\rho c_V}. \quad (13)$$

Граничными и начальными условиями для (13) являются соотношения

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} (z=0, t) = \theta_{zb}(t), \theta(z=0, t) = \theta_b(t), \theta(z, t=0) = \theta_s(z).$$

Функции $\theta_{zb}(t)$, $\theta_b(t)$, $\theta_s(z)$ определяются из данных наблюдений.

Адиабатическая температура T входит в уравнение (13) для абсолютной температуры θ в качестве источника/стока тепла, мощность которого зависит от вертикальной координаты и от времени. Скорость звука, вычисленную с использованием абсолютной температуры, которая соответствует измеренной скорости звука, обозначим $c_\theta^2 = \gamma R_a \theta$.

Сравнение с данными наблюдений является важной частью любого исследования и позволяет интерпретировать полученные решения. Профили температуры и давления по сезону, географической широте или по всей атмосфере называются стандартными или справочными атмосферами и обсуждаются во множестве монографий [2, 3, 5, 6, 11, 12].

Предварительные оценки. Рассмотрим условия, при которых сжимаемость атмосферного воздуха необходимо учитывать. Запишем уравнение (5) в параметризованном виде. Для этого выделим масштабные множители (для примера дивергенция $D = M_D D'$) и обозначим штрихом безразмерные величины; величиной J' – слагаемые, содержащие якобианы. Введем масштабы: M_D – дивергенции; M_u – скорости; M_z – координаты; M_ρ – плотности; M_t – времени. Из (5) получим

$$\frac{M_z M_D}{M_u M_t} \frac{\partial D'}{\partial t'} + M_D \mathbf{v}' \cdot \nabla' D' + \frac{M_z M_D^2}{M_u} D'^2 = \frac{M_u}{M_z} J' + \frac{c^2}{M_z M_u} \left(\frac{\nabla' \rho' \cdot \nabla' \rho'}{\rho'^2} - \frac{\nabla'^2 \rho'}{\rho'} \right) + \frac{\mu_1 c^2 M_D}{M_z M_u M_\rho} \frac{\nabla'^2 D'}{\rho'}.$$

В стационарных случаях при малых скоростях движения левая часть этого уравнения мала, часто пренебрегается и вязкими слагаемыми. При условии $M_u \rightarrow c$ два первых слагаемых в правой части имеют одинаковый масштабный множитель c/M_z . Известно, что при условии $M_u \rightarrow c$ эффекты сжимаемости необходимо учитывать, другими словами, в этом случае важно учитывать левую часть этого уравнения. В случае больших пространственных размеров задачи $M_z \rightarrow \infty$ правая часть стремится к нулю. Это означает, что эффекты сжимаемости важно учитывать на больших пространственных масштабах. Для атмосферы расстояние, на котором проявляются эффекты сжимаемости, можно оценить из правой части этого уравнения $M_z \sim c_0^2 \approx 12$ км.

Стационарные решения для температуры

Профиль адиабатической температуры столба несжимаемой атмосферы выражается из гипсометрического уравнения [4, 5] с учетом (12) в виде

$$T(z) = T_b + \gamma_\alpha z, \quad (14)$$

где $\gamma_\alpha \approx 0,0098$ К/м – сухоадиабатический градиент температуры. Зависимость (14) адекватно описывает наблюдаемые профили температуры от поверхности до высоты порядка 8 км. Выше 8 км выражение (14) занижает наблюдающуюся температуру, а выше 30 км показывает нефизические отрицательные значения.

Решение уравнения (11) для стационарной сжимаемой атмосферы показывает профиль адиабатической температуры при граничных условиях (12). Отметим, что одним из частных решений уравнения (11) является произвольная константа.

Для нахождения аналитического решения примем упрощающие предположения: 1) независимость от высоты ускорения свободного падения: $g = const$ и градиента: $\partial g / \partial z = g_z = const$, что ограничивает применимость решения к относительно тонким слоям атмосферы (далее рассматривается атмосфера высотой до 100 км); 2) постоянство скорости звука $c^2 = c_0^2$, справедливость и границы применимости этого приближения обсуждаются ниже. Уравнение (11) принимает вид

$$c_0^2 \left(\frac{d^2 T}{dz^2} + \frac{1}{\gamma-1} \frac{1}{T} \left(\frac{dT}{dz} \right)^2 \right) + g \frac{dT}{dz} + (\gamma-1) g_z T = 0. \quad (15)$$

Решение уравнения (15)

$$T(z) = \exp \left(-z \frac{g(\gamma-1) + \sqrt{\delta}}{2\gamma c_0^2} \right) \left[\frac{\gamma^2 c_0^4}{\delta} \left(C_1 \exp \left(\frac{z\sqrt{\delta}}{(\gamma-1)c_0^2} \right) - C_2 \right) \right]^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}}, \quad (16)$$

где $\delta = (\gamma-1)(4\gamma g_z c_0^2 + \gamma g^2 - g^2)$,

$$C_1 = T_b^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left(\frac{T_{zb}}{T_b} + \frac{g(\gamma-1) + \sqrt{\delta}}{2\gamma c_0^2} \right), C_2 = T_b^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left(\frac{T_{zb}}{T_b} + \frac{g(\gamma-1) - \sqrt{\delta}}{2\gamma c_0^2} \right). \quad (17)$$

Константы (17) с противоположным знаком также удовлетворяют (15).

Решение (16) положительно и непрерывно для любой высоты и существенно зависит от граничных условий. На некоторой высоте решение (16) может показывать острый минимум, в котором значение температуры близко к нулю. График такого случая приведен на рис. 1 сплошной кривой, которая показывает, что ниже некоторой точки решение убывает с высотой, а выше – возрастает и на больших высотах стремится к постоянному значению. Использовались граничные условия $T_{zb} = -0,0098$ К/м и $T_b = 297,15$ К.

Для сравнения на рис. 1 точечной линией показана линейная зависимость (14) с теми же граничными условиями. Из сравнения этих кривых видно, что решение (16) практически совпадает с линейным на высотах ниже 8 км. Выше 8 км расхождение с линейным профилем становится все более заметным. Кружками отмечены значения температуры для справочной атмосферы 30-й широты в июле.

Высота, на которой находится острый минимум температуры, составляет ≈ 15 км. Здесь dT/dz меняет знак с $-\infty$ на $+\infty$ и имеет особую точку. На высоте ниже особой точки температура убывает с высотой, а выше особой точки – возрастает (рис. 1).

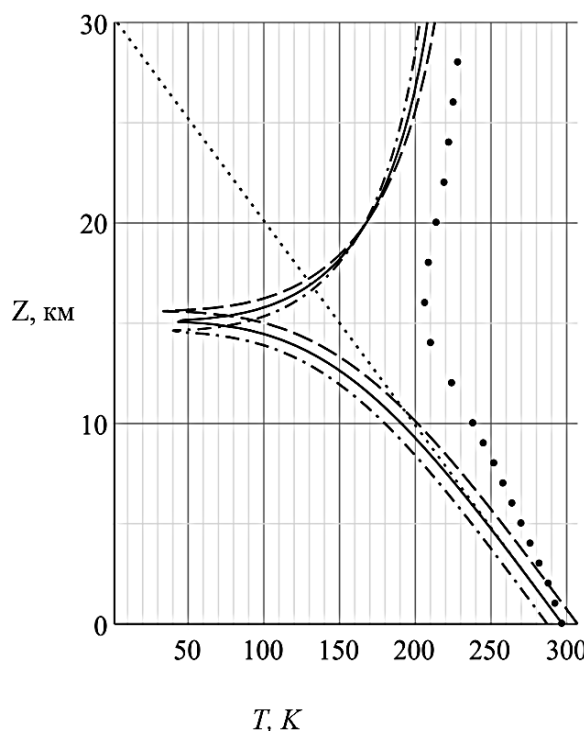


Рис. 1. Профили аналитического решения (16) при различных значениях приземной температуры T_b . По оси абсцисс отложена температура, по оси ординат – высота. Для всех кривых использовалось одно граничное условие $T_{zb} = \gamma_a$ / Fig. 1. Profiles of the analytical solution (16) at different values of the surface temperature T_b . The temperature is deposited along the abscissa axis, and the height is deposited along the ordinate axis. One boundary condition $T_{zb} = \gamma_a$ was used for all curves

Высота, на которой расположена точка особенности решения (16), зависит от приповерхностного градиента температуры T_{zb} , а величина T_b имеет более слабое влияние на решение (16), чем значение градиента.

При неизменной температуре T_b с уменьшением T_{zb} высота особой точки решения (16) понижается. На рис. 2 сплошной кривой приведен профиль температуры, полученный из решения (16) при $T_{zb} = \gamma_a$, такой же, как на рис. 1. Точечной линией показан линейный профиль (14), вычисленный при тех же граничных условиях. Линией с длинным пунктиром – решение (16) с граничным условием $T_{zb} = -0,012$ К/м. Пунктирной кривой – решение (16) для градиента $T_{zb} = -0,00705$ К/м, соответствующего влажно-адиабатическому градиенту, при этом высота особой точки в (16) составляет ≈ 52 км.

При $T_{zb} = -0,007$ К/м изменение температуры поверхности T_b на 27 К приводит к изменению высоты особой точки на ≈ 6 км: с 65,1 до 71,4 км.

При $T_{zb} = -0,006$ К/м (величина среднего многолетнего градиента справочной атмосферы) особая точка решения (16) исчезает, также исчезает и рост температуры выше нее (штрихпунктирная кривая, рис. 2). Эта кривая положительна для всех высот, линейно уменьшается с высотой, выше 11 км стремится к постоянной величине ≈ 169 К. На рис. 2 кружками приведён профиль температуры справочной атмосферы 30-й широты в июле [12]. Кривые на рис. 2 ограничены высотой 80 км.

Из рис. 2 видно, что увеличение значения приземного градиента приводит не только к уменьшению высоты, на которой возникает особая точка, но также и к увеличению максимальной тем-

Высота, на которой возникает особенность решения (16), зависит от величины поверхностной температуры T_b . Эта зависимость демонстрируется на рис. 1 пунктирной и штрихпунктирной линиями. С ростом T_b при $T_{zb} = \gamma_a$ высота особой точки увеличивается. Пунктирной кривой показано решение (16) при $T_b = 307,15$ что на 10 К выше приземной температуры справочной атмосферы. С уменьшением T_b при $T_{zb} = \gamma_a$ высота особой точки уменьшается. Штрихпунктирной кривой показано решение (16) при $T_b = 287,15$ К, что на 10 К ниже, чем приземная температура справочной атмосферы. Все показанные на рис. 1 кривые приблизительно совпадают на высоте ниже 7 км с линейным профилем (14), построенным с теми же граничными условиями.

Выше 7 км решение (16) показывает более низкие значения, чем (14), а выше 15 км – рост температуры, что не соответствует линейному профилю. Кривые на рис. 1 ограничены высотой 30 км, выше которой (14) показывает отрицательные значения. При неизменном $T_{zb} = \gamma_a$ увеличение поверхностной температуры на 27 К (с 273 до 300 К) приводит к увеличению высоты особой точки приблизительно на 1400 м: с 13,8 до 15,2 км.

Отметим, что высота, на которой расположен минимум температуры в измерениях (рис. 1), соответствует высоте, на которой расположен минимум решения (16), при этом величина из (16) ниже температуры экспериментальных значений справочной атмосферы (рис. 1).

пературы, которой достигает решение выше особой точки. Другими словами, более низкое положение особой точки соответствует большим температурам на высоте более 20 км. Несколько другой вывод можно сделать относительно влияния граничного условия T_b , что видно на кривых, изображенных на рис. 1, где большая температура поверхности приводит к возрастанию высоты особой точки и большим значениям температуры выше особой точки.

Скорость звука c_0 является одним из важных параметров аналитического решения, как и температура θ_0 для гидростатической формулы. На рис. 3 показаны профили (16) до высот 80 км, вычисленные при различных значениях параметра c_0 . Сплошной кривой показано решение при $c_0 = (\gamma R_a T_b)^{1/2}$, пунктирной $c_0 = 1,1(\gamma R_a T_b)^{1/2}$, пунктир с точкой $c_0 = 0,9(\gamma R_a T_b)^{1/2}$, точечной $c_0 = 0,8(\gamma R_a T_b)^{1/2}$. Значения, взятые на летней субтропической справочной атмосферы, изображены крупными точками.

Увеличение параметра c_0 приводит к более низкой особой точке в решении (16) и более высокой температуре выше особой точки. Уменьшение параметра c_0 – к более высокой особой точке в решении (16) и уменьшению роста температуры выше 30 км. При достаточно малом параметре c_0 особая точка в решении (16) исчезает.

Минимум температуры (16), появляющийся на графиках рис. 1–3 в виде особой точки решения, и дальнейший рост температуры с высотой можно сопоставить с наблюдающимися в атмосфере явлениями тропопаузы и стратосферного роста температуры. Высота особой точки решения (16) при $T_{zb} = \gamma_a$ близка измеренной высоте тропопаузы [3, 5, 12], при $T_{zb} = -0,00705$ К/м – наблюдающейся высоте стратопаузы. Кроме того, решение (16) демонстрирует постоянный градиент вблизи поверхности на высоте ниже 7 км [3, 12]. Высота, на которой начинается рост температуры ($T_{zb} = \gamma_a$), соответствует высоте ее стратосферного роста.

При малых значениях градиента T_{zb} или c_0 особой точки в решении (16) и стратосферного роста температуры не наблюдается. Такое явление бывает в полярных регионах (слабовыраженная тропопауза или ее отсутствие).

Решения при непостоянной скорости звука. Аналитического решения стационарного уравнения (11) при непостоянной скорости звука c найти не удастся. Его можно получить при помощи численного интегрирования стационарного уравнения (11), и результат отличается от (16). Использование величины c отражает не вполне физическую ситуацию, когда скорость звука определяется адиабатической температурой. Такой случай может реализоваться в природе, если граничные условия (12) не меняются в течение длительного времени.

В процессе численного решения стационарного уравнения (11) возникает расходимость на высоте особой точки. Такая же расходимость наблюдается и для численного решения уравнения (15) с постоянной скоростью звука. Чтобы устранить ее, для алгоритма численного решения используется поведение аналитического решения при $c = c_0$. В этом частном случае численное решение должно совпадать с (16).

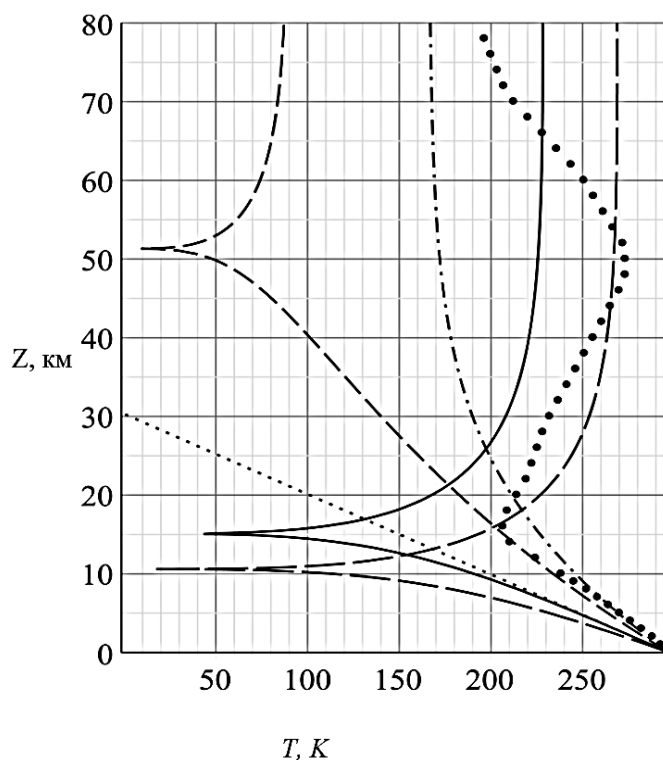


Рис. 2. Профили температуры (16) при $T_b = 297,15$ К и различных значениях T_{zb} . По оси абсцисс отложена температура, по оси ординат – высота / Fig. 2. Temperature profiles (16) at $T_b = 297.15$ K and various values of T_{zb} . The temperature is deposited along the abscissa axis, the height is deposited along the ordinate axis

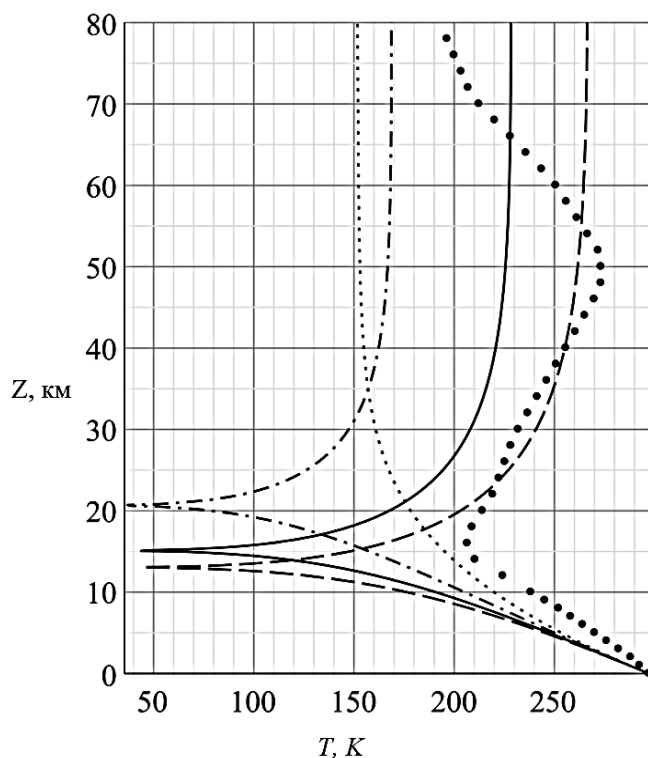


Рис. 3. Профили решения (16) при разной скорости звука c_0 .
 По оси абсцисс отложена температур в Кельвинах, по оси ординат – высота в $T_b = 297,15$ К, $T_{zb} = -0,0098$ К/м / Fig. 3. Solution profiles (16) at different sound speeds c_0 .
 On the abscissa axis the temperature in Kelvins is deposited, on the ordinate axis – the height in $T_b = 297.15$ K, $T_{zb} = -0.0098$ K/m

сотой мало меняется и составляет ≈ 10 К. Как в численных решениях, так и в аналитическом решении (16) не возникает нефизичных отрицательных температур на больших высотах.

Сверхадиабатическим значениям приземного градиента $T_{zb} = -0,011$ К/м соответствует кривая, изображенная на рис. 4 пунктирной линией. Высота точки особенности этой кривой ниже и приблизительно соответствует высоте точки особенности аналитического решения, изображенного сплошной линией на рис. 1–3, хотя приземные градиенты различаются существенно. При этом рост температуры на больших высотах гораздо слабее по сравнению с аналитическим решением (16). Для граничного условия $T_{zb} > -0,0096$ К/м точка особенности численного решения уравнения (11) отсутствует. Максимальная высота, на которой может располагаться точка особенности, достигается при $T_{zb} = -0,0097$ К/м и составляет ≈ 30 км.

Штрихпунктирная и точечная кривые построены для $T_{zb} = -0,009$ К/м и $T_{zb} = -0,00705$ К/м соответственно. Похожие кривые, не имеющие точки особенности, получаются для всех значений $T_{zb} > -0,0096$ К/м. Для этих кривых отсутствуют особые точки в численном решении, и кривые почти линейно меняются на высотах ниже 15 км, а выше 30 км мало отличаются от постоянного значения. Для сравнения на рис. 4 приведены данные измерений справочной атмосферы 30-й широты в июле [12].

На рис. 5 точками представлены данные о высотах тропопаузы в зависимости от широты для средних многолетних температур справочной летней (июнь-июль-август) атмосферы [12]. Каждая точка рис. 5 определялась по минимальным значениям температуры в столбе.

Сплошной кривой на рис. 5 представлена зависимость высоты особой точки решения (16) в зависимости от температуры поверхности в справочной атмосфере при неизменном $T_{zb} = \gamma_a$. Влияние изменения параметра c_0 показывает точечная кривая, построенная при $c_0^2 = 0,91\gamma R_a T_b$ и тех же граничных условиях. Такое значение параметра c_0 позволяет точнее описать наблюдения.

Аналитическое решение (16) в особой точке меняет знак производной по высоте. Это свойство позволяет устранить расхождимость в алгоритме численного решения уравнений (11), (15), который модифицируется следующим образом: на той высоте, где температура уменьшается до значения $< 0,1$ К, меняется знак первой производной температуры на противоположный. Численный расчет с такой модификацией алгоритма решения стационарного уравнения (11), в котором принято $c^2 = c_0^2$, показывает хорошее совпадение численного и аналитического решений (при прочих одинаковых параметрах).

На рис. 4 показаны численные решения стационарного уравнения (11) при $T_b = 297,15$ К и разных значениях градиента T_{zb} , $g_z = -3,086 \times 10^{-6} \text{ c}^{-2}$. Сплошная кривая построена для тех же граничных условий, что и сплошные кривые на рис. 1–3. Из сравнения кривых на этих рисунках видно, что сплошная кривая на рис. 4 гораздо дольше сохраняет линейный профиль с увеличением высоты. Точка особенности располагается выше, на высоте ≈ 28 км, против ≈ 15 км для аналитического решения (16). Кроме того, увеличение температуры выше точки особенности заметно слабее, чем для аналитического решения, с вы-

Вблизи экватора и на средних широтах точечная кривая располагается ближе к наблюдаемым высотам тропопаузы.

Летом в южных высоких широтах ($\varphi > 50^\circ$ ю.ш.), характеризующихся малой солнечной радиацией, высота тропопаузы выше, чем можно ожидать из аналитического решения (16) (рис. 5). В этот сезон долгое время сохраняются низкие температуры поверхности и суточные изменения граничных условий малы. В этих условиях предположение о постоянстве скорости звука может нарушаться. Для таких широт приемлемо решение уравнения (11) с непостоянной скоростью звука. Оно показывает более высокое положение особой точки. Для описания этого случая также можно использовать решение (16) при постоянной скорости звука, но при градиенте $T_{zb} = -0,007$ К/м (пунктирная кривая, рис. 2). При таком градиенте решение (16) не содержит особую точку (рис. 2), исчезает и стратосферный рост температуры. Освещенные солнцем точки вблизи полюса (рис. 5) показывают низкие значения тропопаузы при $\varphi > 70^\circ$ с.ш., которые могут соответствовать решению (16) при сверхadiaбатическом градиенте температуры вблизи поверхности.

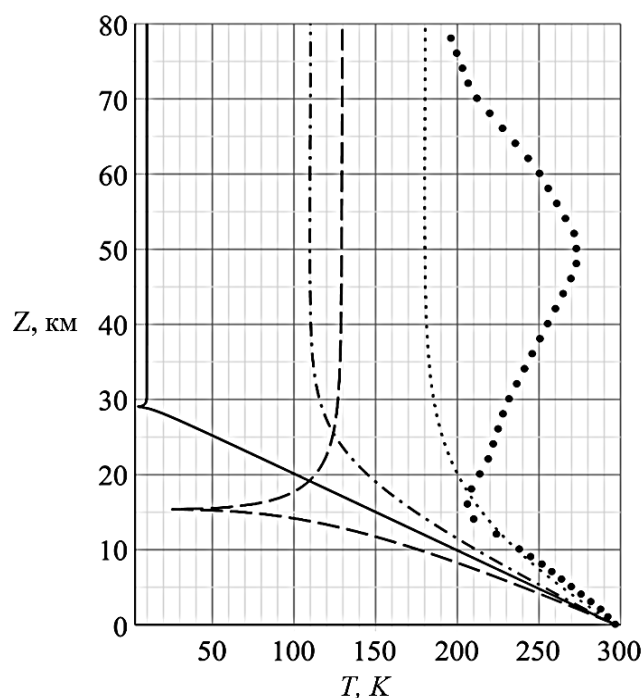


Рис. 4. Численное решение стационарного уравнения (11), $T_b = 297,15$ К, $c^2 = \gamma R_a T$. По оси абсцисс отложена температура, по оси ординат – высота / Fig. 4. Numerical solution of the stationary equation (11), $T_b = 297.15$ К, $c^2 = \gamma R_a T$. The temperature is deposited along the abscissa axis, the height is deposited along the ordinate axis

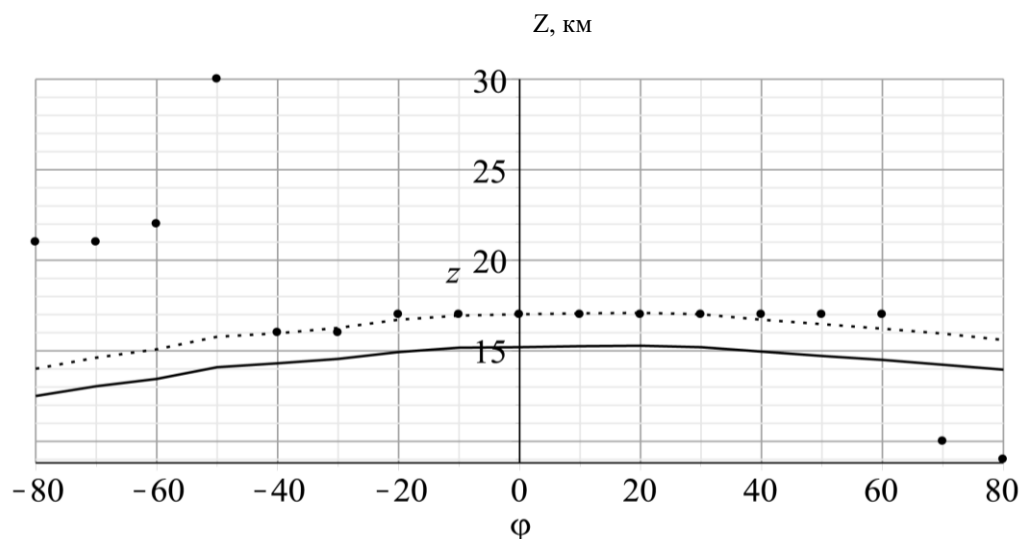


Рис. 5. Зависимость высоты особой точки решения (16) от широты. Широтное изменение высоты тропопаузы летом отмечено кружками. Отрицательные значения на оси абсцисс соответствуют южным, положительные – северным широтам / Fig. 5. The dependence of the height of the singular point of solution (16) on latitude. The latitudinal change in the height of the tropopause in summer is marked by circles. Negative values on the abscissa axis correspond to southern, positive values correspond to northern latitudes

Обсуждение результатов

Из (13) очевидно, что при $c_Q = 0$ и $Q = 0$ решением уравнения (13) будет простое равенство $\theta(t, z) = T(t, z)$. В этом случае абсолютная и адиабатическая температуры совпадают. При малой теплопроводности столб воздуха будет иметь профиль абсолютной температуры, близкий к решению (16), за исключением, вероятно, области высот вблизи особой точки.

Профили, изображенные на рис. 1, 2, дают вклад в решение уравнения (13) и формируют наблюдающийся профиль θ , зависящий от того, как долго соответствующие граничные условия существуют. Эти профили (рис. 1–3) моделируют суточные изменения адиабаты как отклик на изменения граничных условий. При изменении граничных условий величина $\partial T / \partial t$ является существенным фактором формирования профиля θ , особенно на высоте порядка 14 км и выше, и зависит от точности задания граничных условий.

Решение (16) нелинейного уравнения (15) положительно и непрерывно по высоте. Оно может содержать подвижную особую точку, возникающую на некоторой высоте и зависящую от граничных условий. В такой особой точке не определена производная температуры по высоте, а само решение содержит острый минимум температуры, достигающий нуля. При помощи численного решения стационарного уравнения (11) показано, что учет непостоянства скорости звука изменяет свойства решений, при этом сохраняется возможность возникновения особых точек.

Аналитическое выражение (16) для адиабаты может быть полезно для осмысления причин возникновения некоторых явлений в атмосфере, например тропопаузы и стратопаузы, для оценки мощности источников тепла, действующих на разных высотах. В модели не заданы источники тепла (т.е. $Q = 0$ в (13)), действующие выше поверхности и связанные с разнообразными процессами, протекающими в атмосфере. Адиабатическое решение (16) является дополнительным источником/стоком тепла в (13), обусловленным сжимаемостью атмосферы.

При сравнении с экспериментальными данными видно, что построенные кривые решения (16) занижают значения температуры, особенно в области острого минимума решения. Прямое сравнение (16) с наблюдениями некорректно, поскольку температура столба θ подчиняется уравнению теплопроводности (13), а (16) является только одним из источников/стоков тепла. Также решение (16) зависит от граничных условий (12), которые практически всегда не соответствуют своим многолетним средним. Наблюдаемый профиль температуры θ формируется наиболее часто возникающими распределениями (16).

Вблизи поверхности наблюдаются различные градиенты температуры воздуха, но наиболее часто – сухоадиабатический γ_a или влажноадиабатический γ_w . Градиент γ_a участвует в формировании минимума температуры на высоте порядка 15 км, соответствующей тропопаузе (рис. 1, 2), и является стоком тепла на этой высоте. Рост температуры решения (16) на высоте 20–30 км (рис. 1, 2) является источником тепла на высотах стратосферного роста температуры. Уменьшение температуры, наблюдаемое в стратопаузе на высоте порядка 60 км, объясняется стоком тепла (16), соответствующим γ_w (рис. 2).

Поскольку уравнения (7), (11) описывают процессы, протекающие со скоростью звука, для их получения адиабатическое приближение является приемлемым и работоспособным. Измерения скорости звука на высоте до 100 км показывают, что скорость звука удовлетворяет формуле, характеризующей именно адиабатический процесс. Адиабатическое приближение в атмосфере применимо на временных промежутках порядка трех суток [6]. Определяемые сжимаемостью источники или стоки тепла в уравнении (13) могут формировать сложное распределение температуры по столбу атмосферы быстрее, чем действует теплопроводность. При получении уравнения (13) из (8) также использовалось уравнение адиабаты (10).

Действие множества профилей (16) при интегрировании уравнения (13) можно рассматривать как некоторую предысторию, приводящую к текущему профилю температуры θ . Использованное при решении уравнения (11) упрощение $c = c_0$ по крайней мере частично учитывает эту предысторию и ее влияние на наблюдающееся распределение температуры атмосферы по высоте.

Действительно, численное решение уравнения (11), изображенное сплошной кривой на рис. 4, показывает высоту точки минимума заметно выше, чем наблюдаемая высота минимума температуры. Выше точки особенности рост температуры очень мал, что не соответствует наблюдениям. При тех же граничных условиях аналитическое решение (16) с постоянной скоростью звука, изображенное сплошной кривой на рис. 1, точнее показывает высоту точки минимума при сравнении с

измерениями. Следовательно, для вычисления скорости звука лучше использовать константу T_b (или измеренную $\theta(z)$), а не адиабатическую температуру T (кроме высоких широт).

Аналитическое решение (16) с постоянной скоростью звука показывает возникновение минимума на высоте порядка 60 км при γ_w вблизи поверхности (длинный пунктир на рис. 2). При тех же граничных условиях этот минимум не воспроизводится численным решением уравнения (11).

Кривые, приведенные на рис. 5, показывают, что в средних и умеренных широтах аналитическое решение (16) удовлетворительно воспроизводит высоты тропопаузы. Точность предсказания высоты тропопаузы становится хорошей, если при вычислении скорости звука использовать не поверхностную температуру, а некоторое среднее значение, характеризующее весь столб в целом, на 10 % ниже поверхностной температуры ($c_0^2 = 0,91\gamma R_a T_b$).

Заключение

В предложенной модели используются два условия для описания равновесия столба сжимаемой атмосферы. Первое следует из уравнений движения, как и в классическом случае гидростатической формулы. Вторым является следующее из уравнения неразрывности условие отсутствия вертикального движения воздуха, возникающего при изменении во времени плотности. Совместный учет двух условий приводит к системе уравнений (7)–(9). При дополнительном предположении о постоянстве скорости звука записывается аналитическое решение (16).

Аналитическая модель столба сжимаемой атмосферы может являться полезным инструментом для оценки профиля адиабаты. В столбе сжимаемой атмосферы изменения адиабаты во времени определяют источники тепла, не связанные с выделением/поглощением тепла какими-либо примесями либо другими физическими процессами. Эта модель полезна также для понимания возможных причин, приводящих к возникновению на некоторых высотах минимумов и максимумов температуры столба атмосферы, что трудно заранее ожидать, основываясь только на известном принципе максимума и минимума для решений уравнения теплопроводности. Аналитическое исследование уравнений аэродинамики улучшает понимание сложных процессов, протекающих в атмосфере, позволяет сузить интервалы параметров, в которых необходимо строить подробное численное решение в тех случаях, когда недостаточно точности аналитического решения.

Список источников

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI: Гидродинамика: учеб. пособие. М.: Наука, 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: НИЦ «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. Berberan-Santos M.N., Bodunov E.N., Pogliani L. On the barometric formula inside the Earth // J. Math. Chem. 2010. Vol. 47. P. 990–1004.
8. Randall D.A., Wood R.A., Bony S., Colman R., Fichefet T., Fyfe J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srivivasan 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.
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. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 616 с.
11. Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. Инфразвук и гравитационные волны в атмосфере – их возникновение и распространение. М.: Мир, 1978. 532 с.
12. ГОСТ Р 53460-2009. Глобальная справочная атмосфера для высот от 0 до 120 км для аэрокосмической практики. Параметры. М., 2010.

References

1. Landau L.D., Lifshits E.M. *Theoretical physics. Vol. VI: Hydrodynamics*: textbook. Moscow: Nauka Publ.; 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 troposphere*. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2011. 452 p. (In Russ.).
4. Eckart K. *Hydrodynamics of the ocean and atmosphere*. Moscow; Izhevsk: Regulyarnaya 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, United States: Elsevier Science, Academic Press; 1996. 627 p.
7. Berberan-Santos M. N., Bodunov E. N., Pogliani L. On the barometric formula inside the Earth. *J. Math. Chem.* 2010;47:990-1004.
8. Randall D.A., Wood R.A., Bony S., Colman R., Fichefet T., Fyfe 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.
9. Ekman V. W. On the influence of the Earth's rotation on ocean currents. *Arkiv. Matematik. Astron. Fysik.* 1905;2:1-53.
10. Roach P. *Computational fluid dynamics*. Moscow: Mir Publ.; 1980. 616 p. (In Russ.).
11. Gossard E.E., Hook W.H. *Waves in the atmosphere. Infrasound and gravitational waves in the atmosphere - their occurrence and propagation*. Moscow: Mir Publ.; 1978. 532 p. (In Russ.).
12. GOST R 53460-2009. *Global reference atmosphere for altitudes from 0 to 120 km for aerospace practice. Parameters*. Moscow, 2010. (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 06.05.2022; одобрена после рецензирования 15.06.2022; принята к публикации 30.08.2022.
The article was submitted 06.05.2022; approved after reviewing 15.06.2022; accepted for publication 30.08.2022.

Научная статья
УДК 504.4.054+550.461
doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-91-102

ВЗАИМОСВЯЗЬ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ РЕЧНЫХ ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕК БАСЕЙНА СЕВЕРСКОГО ДОНЦА (В ПРЕДЕЛАХ РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ)

Виктор Николаевич Решетняк^{1✉}, Владимир Евгеньевич Закруткин²

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

¹ reshetnyak@sfedu.ru ✉

² vezak@sfedu.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности химического состава и уровня загрязненности вод и донных отложений рек бассейна Северского Донца. Степень загрязненности поверхностных вод оценена с применением удельного комбинаторного индекса загрязнения воды, а уровень загрязненности донных отложений рек – с использованием общепринятого суммарного показателя загрязнения Z_c и предлагаемого авторами интегрального показателя загрязненности донных отложений. Для сопоставления химических составов изучаемых сред использованы коэффициенты концентрации элементов в воде и донных отложениях, рассчитанные на основе соответствующих кларков. Подробно проанализированы физико-химические особенности элементов, содержание которых значительно отличается в изучаемых средах: марганец, медь, никель и свинец. Также рассмотрены физико-географические и иные факторы, которые влияют на распределение элементов в системе вода – донные отложения в исследуемом районе.

Выявлено, что уровень загрязненности донных отложений рек бассейна Северского Донца определяется повышенным содержанием никеля и свинца. Для этих элементов характерен перенос преимущественно во взвешенной форме. Показано, что уровень загрязненности речных вод определяется рядом макро- и микрокомпонентов, среди которых соединения марганца и меди вносят значительный вклад. Сделан вывод о том, что несоответствие уровня загрязненности донных отложений и водной толщи рек бассейна Северского Донца вызвано процессами самоочищения донных отложений.

Ключевые слова: донные отложения рек, речные воды, бассейн Северского Донца, химический состав, тяжелые металлы, вторичное загрязнение вод, интегральный показатель загрязненности донных отложений, уровень загрязненности

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00305, <https://rscf.ru/project/22-27-00305/>, в Южном федеральном университете.

Для цитирования: Решетняк В.Н., Закруткин В.Е. Взаимосвязь химического состава и уровня загрязненности речных вод и донных отложений рек бассейна Северского Донца (в пределах Ростовской области) // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 3. С. 91–102.

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

Original article

INTERRELATION BETWEEN THE CHEMICAL COMPOSITION AND POLLUTION LEVEL OF RIVER WATERS AND SEDIMENTS IN THE SEVERSKY DONETS RIVER BASIN (WITHIN THE ROSTOV REGION)

Viktor N. Reshetnyak^{1✉}, Vladimir E. Zakrutkin²

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

¹ reshetnyak@sfedu.ru ✉

² vezak@sfedu.ru

© Решетняк В.Н., Закруткин В.Е., 2022

Abstract. The article considers the chemical composition features and pollution levels of river waters and sediments in the Seversky Donets River basin. The river waters pollution degree has been assessed using the specific combinatorial index of water pollution, and the river sediments pollution level has been evaluated using the conventional total pollution index and the integral contamination index of river sediments proposed by the authors. In order to compare the chemical compositions of the studied media we have used the concentration coefficients of elements in river waters and sediments based on the corresponding clarks. The physical and chemical features of the elements which contents differ significantly in the studied media have been analyzed in detail: namely manganese, copper, nickel, and lead. Physical and geographical and other factors that influence the distribution of elements within the river water – river sediments system in the study area have also been considered.

It has been revealed that the level river sediments pollution in the Seversky Donets River basin is determined by elevated contents of nickel and lead. These elements are transferred mainly in a suspended form. It is demonstrated that the river waters pollution level depends on a number of macro- and microcomponents, and manganese and copper compounds make a significant contribution. It is concluded that the discrepancy between the levels of river sediments contamination and the river water pollution in the Seversky Donets River basin is mainly caused by the self-purification processes in river sediments.

Keywords: river sediments, river waters, Seversky Donets River basin, chemical composition, heavy metals, secondary water pollution, integral contamination index of river sediments, pollution level

Acknowledgments: the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 22-27-00305, <https://rscf.ru/project/22-27-00305/>, at the Southern Federal University.

For citation: Reshetnyak V.N., Zakrutkin V.E. Interrelation Between the Chemical Composition and Pollution Level of River Waters and Sediments in the Seversky Donets River Basin (within the Rostov Region). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(3):91-102. (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

Речная вода и донные отложения представляют собой взаимосвязанные компоненты одной системы. По состоянию донных отложений, как известно, можно судить о степени загрязненности водотоков в целом, так как донные осадки являются хранилищем многих элементов, поступающих в речную сеть. Но, с другой стороны, состав речных вод формируется при участии донных отложений за счет процессов вторичного загрязнения – переноса элементов из речных осадков в водную толщу при определенных условиях.

Все это указывает на то, что и химический состав, и уровень загрязненности речных вод и донных отложений должны находиться в некотором соответствии. Однако подобного зачастую не наблюдается.

Особенно явно такое несоответствие мы наблюдали при изучении донных отложений рек Восточного Донбасса – одного из наиболее крупных углепромышленных районов России. Здесь, в частности, речные воды оценены преимущественно как грязные, очень грязные или экстремально грязные, в то время как для донных отложений рек характерен преимущественно слабый уровень загрязненности [1].

Несовпадение уровней загрязненности вод и донных отложений рек выявляется и в работах других авторов [2, 3].

В связи с этим целью данного исследования является изучение взаимосвязи химического состава и уровня загрязненности речных вод и донных отложений рек бассейна Северского Донца (в пределах Ростовской области). Для достижения поставленной цели планировалось:

- 1) сопоставить уровни загрязненности воды и донных отложений рек;
- 2) выявить отдельные элементы, которые вносят наибольший вклад в итоговую оценку уровня загрязненности изучаемых сред;
- 3) проанализировать факторы, которые обуславливают различия в полученных оценках уровня загрязненности воды и донных осадков.

Материалы и методы исследования

Исследование речных вод и донных отложений Восточного Донбасса (Ростовская область) проводилось в период 2014–2019 гг. В качестве объектов исследования выбраны реки бассейна Северского Донца (Калитва, Кундрючья, Быстрая, Лихая, Большая Гнилуша, Большая и Малая Каменка, Северский Донец).

Отбор проб речных вод и донных отложений проводили в створах, расположенных в верховьях рек или на участках, находящихся вне зоны влияния крупных источников загрязнения, в низовьях рек (для оценки суммарного влияния техногенных источников загрязнения на водосборах), а также выше и ниже предполагаемого влияния объектов угледобывающей промышленности. Схема расположения створов представлена на рис. 1.

Отбор проб донных отложений проводился согласно нормативным документам [4, 5]. В связи с неоднородностью донных осадков в каждом створе производили отбор нескольких, обычно от 3 до 5, частных проб. Отбор проб донных отложений осуществлялся из верхнего слоя мощностью 10 см. Предполагается, что именно в этом диапазоне содержащиеся в речных отложениях загрязняющие вещества будут наиболее активно взаимодействовать с поверхностными водами. На небольших и неглубоких водотоках отбирали пробы по поперечному профилю реки, на средних и больших реках – у уреза воды в местах видимой аккумуляции наносов.

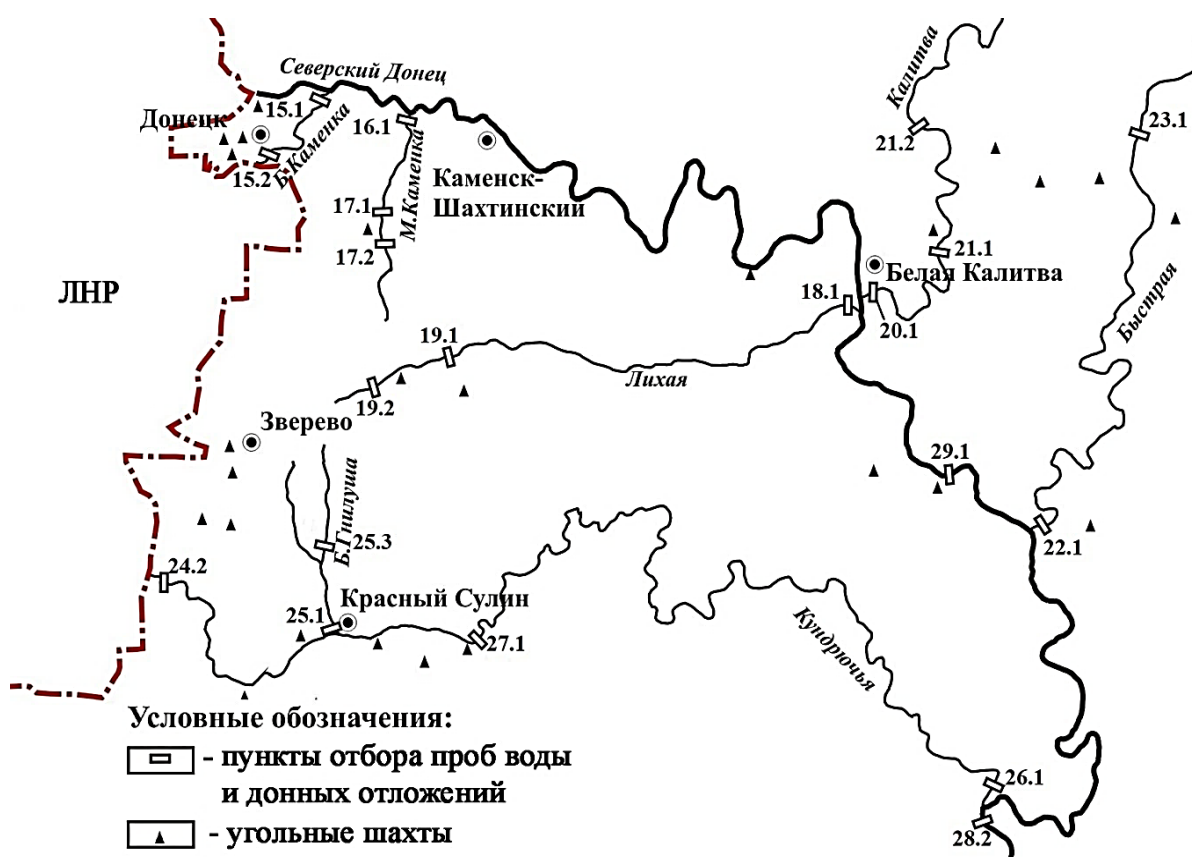


Рис. 1. Схема расположения пунктов отбора проб воды и донных отложений рек бассейна Северского Донца / Fig. 1. Layout of sampling sites for river water and sediments of the Seversky Donets River basin

Отбор проб для проведения геохимических исследований проводили дночерпателем. Масса отбираемых донных отложений с каждого створа составляла от 1000 до 1500 г. После морфологического описания отобранные пробы донных осадков были высушены до воздушно-сухого состояния и переданы в лабораторию для минералогического и химического анализа.

Как известно, главным фактором, определяющим адсорбционную способность донных грунтов, является содержание органического вещества и частиц размером меньше 0,01 мм, входящих в состав пелитовой фракции. Поэтому для того, чтобы охарактеризовать уровень загрязненности

донных отложений рек бассейна Северского Донца, был проведен анализ распределения микро-элементов в специально выделенной пелитовой фракции.

Выход пелитовой фракции нами определялся путём многократного взмучивания валовой пробы. Так как частицы разной размерности имеют различную скорость осаждения, получаемая в процессе взмучивания донных осадков суспензия содержит в себе преимущественно частицы размером $<0,01$ мм. Затем взвесь с мельчайшими частицами отделялась от остальной пробы, просушивалась и, при наличии 30 г такой пробы, отправлялась в лабораторию АО «Южгеология».

Для определения концентраций элементов в пелитовой фракции были использованы методы количественного химического анализа (КХА) – атомно-абсорбционная спектрометрия с использованием атомно-абсорбционного спектрометра «Квант-2АТ».

Отбор проб поверхностных вод для гидрохимических исследований произведен в соответствии с ГОСТ 17.1.3.07-82 и ГОСТ 17.1.5.01-80 [4, 6]. На малых и средних реках при однородном химическом составе воды отбор проб проводился на стрежне водотока, в поверхностном слое воды на глубине до 50 см. На створах р. Северский Донец отбиралась интегральная проба воды, составленная из частных проб от бортов реки и на стрежне.

Все аналитические работы, предусматривающие определение химического состава поверхностных вод, проводились в современной промышленно-экологической лаборатории ООО «Экологические технологии» в г. Шахты.

Оценка уровня загрязненности донных отложений рек бассейна Северского Донца произведена с использованием общепринятого суммарного показателя загрязнения Z_C (СПЗ) [7, 8] и предлагаемого нами интегрального показателя загрязненности донных отложений (ИПЗ_{до}). Для расчёта показателей уровня загрязненности донных отложений использовано содержание 8 металлов: Fe, Mn, Cr, Ni, Cu, Co, Zn, Pb.

Расчет СПЗ проводится в два этапа. На первом рассчитываются коэффициенты концентраций K_C , представляющих собой отношение валовых содержаний элементов в донных отложениях к их фоновому или кларковому содержанию. Выявляются элементы с аномальным содержанием

(для которых $K_C > 1,5$). Для этих элементов рассчитывается СПЗ: $Z_C = \sum_{i=1}^n K_{c_i} - (n - 1)$.

Уровень загрязнения донных отложений определяется в соответствии с величиной СПЗ по следующей шкале: 0–10 – слабый уровень загрязнения; 10–30 – средний уровень; 30–100 – сильный уровень; более 100 – очень сильный уровень загрязнения.

Предлагаемый нами ИПЗ_{до} рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{ИПЗ}_{\text{до}} = \log_{10}(PF) \cdot \frac{\sum_{i=1}^n K_T \cdot K_C}{n},$$

где K_T – коэффициент, зависящий от класса опасности элемента; K_C – коэффициент концентрации элемента, представляющий собой отношение содержания элемента в пелитовой фракции донных отложений к его фоновому (кларковому) содержанию; n – число исследуемых элементов, для которых $K_C > 1,5$; PF – выход пелитовой фракции, %.

В соответствии с нормативами качества вод водных объектов рыбохозяйственного значения [9] для элементов четырёх классов опасности были присвоены следующие коэффициенты: Fe, Mn – 0,5; Cr, Ni, Cu, Co, Zn – 1,0; Pb – 1,2. Элементы первого класса опасности в донных отложениях не анализировались, однако для них установлен коэффициент 1,5.

Степень загрязненности донных отложений определялась в соответствии с величиной ИПЗ_{до} по следующей оценочной шкале: $<3,5$ – слабая степень; 3,5–7,0 – умеренная степень; 7,0–14,0 – высокая степень; более 14,0 – экстремально высокая степень загрязненности.

Использование при расчете ИПЗ_{до} коэффициентов класса опасности типоморфных элементов и процентного содержания пелитовой фракции в пробе позволяет не только отразить уровень накопления элементов в донных отложениях, но и оценить риск вторичного загрязнения водной толщи материалом донных отложений.

Оценка качества речных вод Восточного Донбасса проведена на основе удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ) [10], принятого и широко используемого в системе го-

сударственного мониторинга. Значение показателя может изменяться в зависимости от степени загрязненности воды от 1 до 16, где большему значению индекса соответствует худшее качество воды.

Классификация качества воды по степени загрязненности осуществляется с учетом числа критических показателей загрязненности воды (КПЗ), кратности и частоты повторяемости случаев превышения ПДК. Классификация качества воды, проведенная на основе значений УКИЗВ с учетом числа КПЗ, позволяет разделить поверхностные воды на пять классов в зависимости от степени их загрязненности [10].

Оценка качества воды проводится по перечню ингредиентов и показателей качества воды, которые могут быть дополнены специфическими загрязняющими веществами, характерными для отдельных водных объектов и имеющими локальное распространение.

Поэтому в нашей работе при оценке качества речных вод и определении степени их загрязненности сформирован следующий перечень гидрохимических показателей с учетом специфики воздействия угледобывающей промышленности на поверхностные воды региона: хлориды, сульфаты, сумма ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), минерализация воды, железо общее, медь (Cu^{2+}), цинк (Zn^{2+}), никель (Ni^{2+}), марганец (Mn^{2+}), кадмий (Cd^{2+}), алюминий (Al^{3+}), стронций (Sr^{2+}), бериллий (Be^{2+}) и литий (Li^+).

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлены результаты оценки уровня загрязненности воды и донных отложений рек бассейна Северского Донца. Степень загрязненности воды по УКИЗВ варьирует от класса 4 «А» (грязная) до 5-го (экстремально грязная), в то время как уровень загрязненности донных отложений преимущественно слабый или умеренный по двум показателям. Наиболее благополучными с точки зрения загрязненности как воды, так и донных отложений являются реки Калитва, Быстрая и Северский Донец – речные осадки в целом оценены как слабозагрязненные, а вода классифицирована как грязная (4 «А» или 4 «Б»). Высокий уровень загрязнения донных отложений отмечен только в устьевом створе реки Большая Гнилуша. С точки зрения степени загрязненности воды для этого участка реки она максимальна – 5-й класс качества, экстремально грязная вода.

Таблица 1 / Table 1

Характеристика уровней загрязненности донных отложений и речных вод Восточного Донбасса / Characteristics of the river waters and sediments pollution levels in the Eastern Donbass

Река	№ створа	Донные отложения			Речная вода		
		СПЗ	Уровень загрязнения по СПЗ	ИПЗ _{до}	Уровень загрязнения по ИПЗ _{до}	УКИЗВ среднего-летнего	Класс качества и степень загрязненности по УКИЗВ
Большая Каменка	15.1	5,35	Слабый	5,49	Умеренный	5,09	4 «В», очень грязная
	15.2	7,52	Слабый	4,57	Умеренный	5,77	5, экстремально грязная
Малая Каменка	16.1	5,22	Слабый	3,01	Слабый	5,38	4 «В», очень грязная
	17.1	2,93	Слабый	5,12	Умеренный	5,71	5, экстремально грязная
	17.2	11,91	Умеренный	6,33	Умеренный	5,72	5, экстремально грязная
Лихая	18.1	2,86	Слабый	3,48	Слабый	5,85	5, экстремально грязная
	19.1	10,85	Умеренный	4,77	Умеренный	5,55	5, экстремально грязная
	19.2	15,33	Умеренный	4,92	Умеренный	5,20	4 «В», очень грязная
Калитва	20.1	4,07	Слабый	3,75	Умеренный	4,47	4 «Б», грязная
	21.1	1,96	Слабый	0,00	Слабый	4,21	4 «Б», грязная
	21.2	1,00	Слабый	2,32	Слабый	4,25	4 «А», грязная
Быстрая	22.1	6,13	Слабый	2,06	Слабый	5,58	4 «В», очень грязная
	23.1	1,00	Слабый	1,56	Слабый	4,32	4 «А», грязная
Большая Гнилуша	25.1	28,38	Умеренный	7,27	Высокий	6,52	5, экстремально грязная
	25.3	7,54	Слабый	3,92	Умеренный	6,59	5, экстремально грязная
Кундрючья	24.2	6,90	Слабый	4,10	Умеренный	5,35	4 «Г», очень грязная
	26.1	4,09	Слабый	4,59	Умеренный	5,92	5, экстремально грязная
	27.1	4,68	Слабый	6,41	Умеренный	6,36	5, экстремально грязная
Северский Донец	28.2	1,00	Слабый	0,00	Слабый	4,61	4 «Б», грязная
	29.1	1,00	Слабый	2,68	Слабый	4,51	4 «Б», грязная

Для того чтобы более корректно сравнивать уровни загрязненности воды и донных отложений, а также наиболее адекватно выявить взаимосвязь химического состава изучаемых сред, были рассчитаны коэффициенты линейной корреляции для указанных ранее показателей (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Коэффициенты корреляции для показателей уровней загрязненности воды и донных отложений /
 Correlation coefficients for indicators of river water and sediments pollution levels**

Показатель	СПЗ	ИПЗ _{до}	УКИЗВ
СПЗ	1		
ИПЗ _{до}	0,66	1	
УКИЗВ	0,55	0,71	1

Как видно из данной таблицы, значения коэффициента корреляции между УКИЗВ и показателями загрязненности донных отложений являются положительными; между УКИЗВ и СПЗ выявленная взаимосвязь является заметной, а в случае с ИПЗ_{до} – даже высокой. Отсюда следует, что дальнейшее сопоставление целесообразно проводить между УКИЗВ и ИПЗ_{до}.

Для выявления отдельных створов, в которых будут наблюдаться наиболее сильные несоответствия в уровнях загрязненности двух сред, нами построены геохимические спектры по показателям УКИЗВ и ИПЗ_{до} (рис. 2).

Как видно из рисунка, наиболее существенная разница между уровнями загрязненности воды и донных отложений наблюдается в следующих створах: 15.2 (р. Большая Каменка), 16.1 и 17.1 (р. Малая Каменка), 18.1 (р. Лихая), 22.1 (р. Быстрая) и 25.3 (р. Большая Гнилуша). Створы 21.1 на реке Калитва и 28.2 на реке Северский Донец рассматриваться подробно не будут в связи с нулевым значением показателя загрязнения донных отложений и отсутствием аномальных значений содержания элементов.

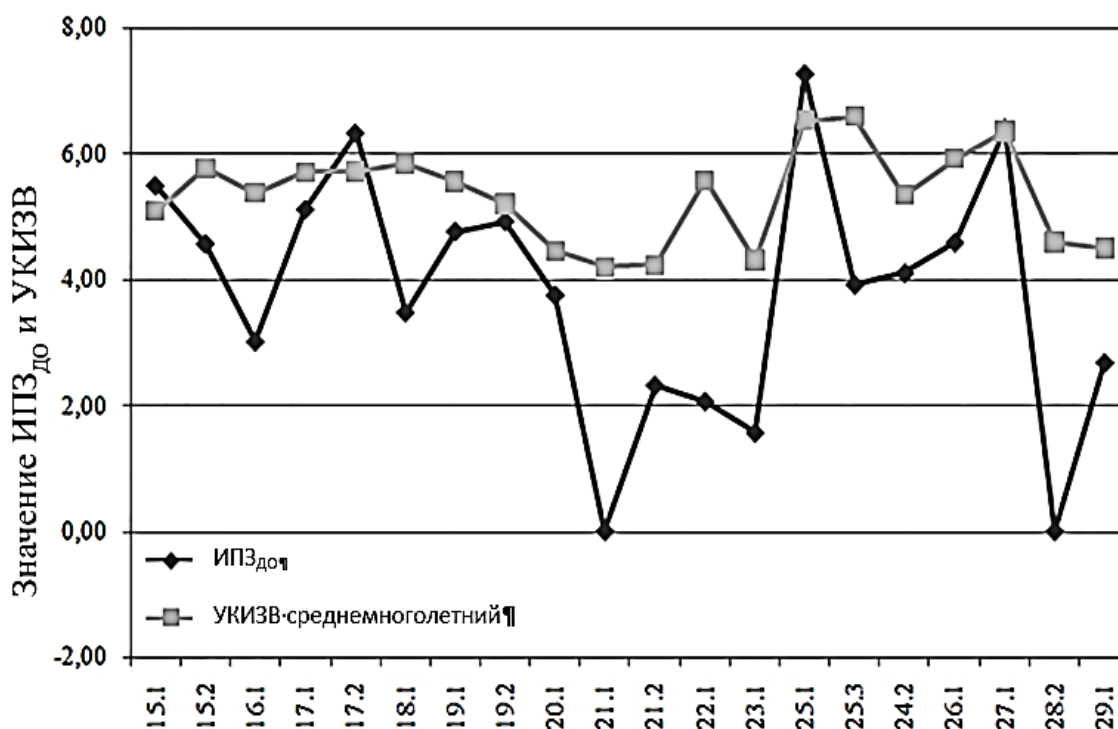


Рис. 2. Геохимические спектры уровней загрязненности воды (по УКИЗВ) и донных отложений (по ИПЗ_{до}) в бассейне Северского Донца / Fig. 2. Geochemical spectra of river water and sediments pollution levels in the Seversky Donets River basin

Для выделенных створов рек с наибольшим несоответствием уровней загрязненности воды и донных отложений проанализированы ассоциации металлов в донных отложениях рек и критические показатели загрязненности воды (табл. 3).

Обращает на себя внимание, что для донных отложений рек бассейна Северского Донца характерна преобладающая роль свинца в структуре геохимической ассоциации; практически во всех створах он занимает главенствующее положение. Кроме него, в геохимическую ассоциацию входят также никель, марганец и цинк.

Таблица 3 / Table 3

Основные загрязняющие элементы речных вод и донных отложений рек бассейна Северского Донца / The main contaminants of river waters and sediments in the Seversky Donets River basin

Река	Номер створа	ИПЗ _{до}	Значение УКИЗВ	Ассоциация металлов в ДО	КПЗ воды	
					макрокомпоненты	микрокомпоненты
Большая Каменка	15.2	4,57	5,77	Pb _{3,3} > Ni _{2,2} > Mn _{1,8}	SO ₄ , Fe	Al, Be, Mn, Cu, Sr
Малая Каменка	16.1	3,01	5,38	Pb _{2,5} > Zn _{1,9} > Ni _{1,5}	SO ₄ , Fe	Al, Mn, Cu, Sr
	17.1	5,12	5,71	Pb _{3,3} > Ni _{1,8}	SO ₄	Al, Mn, Cu, Sr
Лихая	18.1	3,48	5,85	Pb _{1,6}	SO ₄ , Fe	Al, Mn, Sr
Быстрая	22.1	2,06	5,58	Pb _{1,5}	SO ₄	Al, Mn, Sr
Большая Гнилуша	25.3	3,92	6,59	Pb _{3,0} > Mn _{1,7} > Ni _{1,5}	Na+K, SO ₄ , Fe	Al, Be, Mn, Cu, Sr

Макрокомпонентный состав речных вод на большинстве исследуемых участков рек характеризуется высоким содержанием сульфатов и соединений железа. Среди микрокомпонентов наибольшим содержанием относительно ПДК характеризуются Al, Be, Mn, Cu, Sr (табл. 3).

Для того чтобы получить более сопоставимые данные для сравнения между собой уровней содержания металлов в воде и донных отложениях, нами построены спектры концентрации и рассеяния элементов в изучаемых средах (рис. 3). При построении использованы данные по содержанию металлов в валовой пробе и пелитовой фракции донных отложений, а также в речной воде. Коэффициенты концентрации для валовых содержаний рассчитаны относительно кларков осадочных пород [11], для содержаний в пелитовой фракции – относительно кларков глин и глинистых сланцев [11], а для речной воды – относительно кларков речных вод [12].

Наибольшее несоответствие наблюдается для коэффициентов концентрации марганца – в воде его содержание на порядок выше. Коэффициенты концентрации меди в воде и донных отложениях отличаются незначительно (0,9–1,2). Что касается никеля и свинца, то их количество уменьшается в ряду пелитовая фракция – валовая проба – речная вода, что указывает на тесную взаимосвязь содержаний этих элементов с долей пелитовой фракции донных отложений.

Рассмотрим подробнее основные факторы накопления и распределения этих элементов в речных водах и донных отложениях рек.

Марганец в поверхностных водах ведет себя совершенно по-разному в зависимости от сочетания физико-химических факторов, среди которых окислительно-восстановительная обстановка (Eh), pH водной среды, наличие лигандов или других комплексообразователей, содержание взвешенных веществ и др. При снижении Eh и pH марганец способен накапливаться в водной толще. Способность марганца (II) к окислению, а также процессы адсорбции способствуют его накоплению в донных отложениях.

Согласно ранним исследованиям [13], для речных вод южных районов России доля взвешенной формы миграции марганца в речных водах достигает 90 % и более. Значительное количество марганца сорбируется на речной взвеси при высоком содержании пелитовой фракции и преобладании в составе последней глинистых минералов. Однако в малых реках, зарегулированных большим количеством плотин и водохранилищ и имеющих большую извилистость, процент взвешенных форм марганца будет снижаться за счет их осаждения в условиях замедленного стока.

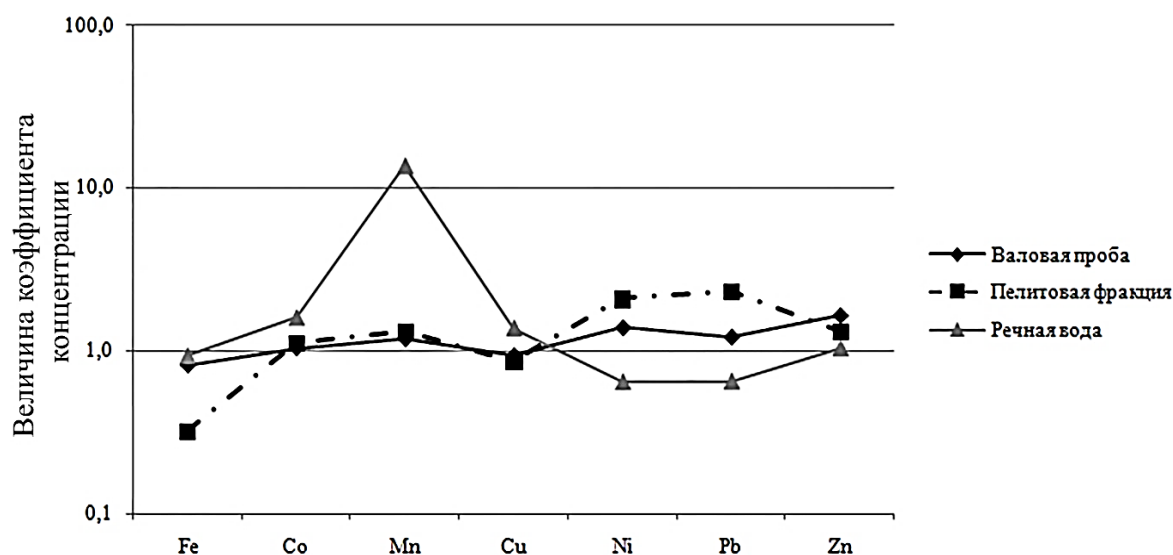


Рис. 3. Спектры концентрации и рассеяния элементов в воде и донных отложениях рек бассейна Северского Донца / Fig.3. Spectra of elements concentration and dispersion in river waters and sediments in the Seversky Donets River Basin

Как показывают наши исследования [1], аномальное содержание марганца в донных отложениях в основном приурочено к створам, в которых содержание пелитовой фракции более 80 %.

Несмотря на то что марганец способен накапливаться в донных отложениях и в реках бассейна Северского Донца, существуют условия, способствующие его адсорбции и осаждению, содержание этого элемента на порядок выше в воде. Это указывает на постоянный источник поступления марганца в речную сеть и особые окислительно-восстановительные условия, при которых марганец способен накапливаться в водной толще.

Высокое содержание марганца в речных водах бассейна Северского Донца в большей степени обусловлено влиянием шахтных вод. Как известно, с ними в речную сеть поступает значительное количество железа, марганца, сульфатов, меди и других микроэлементов.

Как показано в работе [14], подземные воды Гуковского района обогащены Mn по сравнению с фоновыми аналогами примерно в 6 раз. При этом в самих шахтных водах угледобывающих предприятий Восточного Донбасса концентрации марганца могут превышать ПДК более чем в 100 раз.

Для марганца характерна высокая скорость молекулярной диффузии в граничный слой между донными отложениями и придонной водой, что указывает на высокую вероятность вторичного загрязнения воды соединениями марганца. Согласно данным лабораторных экспериментов [15], посвященных изучению процессов десорбции металлов из донных отложений в речную воду рек Восточного Донбасса, в системе речная вода – донные отложения после перемешивания наибольшие изменения в содержании отмечены для марганца. Так, в зависимости от минерализации речной воды концентрация марганца в ней может увеличиваться в 16–20 раз в течение часа взаимодействия, тогда как для остальных металлов увеличение происходит в 1,5–2,5 раза.

Выполненный нами ранее расчет массы элементов, потенциально способной вовлекаться в процесс вторичного загрязнения речных вод [16], показал, что именно для марганца отмечена наибольшая масса элемента, которая потенциально доступна для перехода в речную воду, несмотря на то что и по валовым концентрациям, и по общей накопленной массе железо превалирует в ряду металлов. Значения составляют порядка десятка и сотен мг/км реки, в то время как для железа и цинка характерны величины на порядок меньше.

Таким образом, основными факторами, определяющими содержание марганца в донных отложениях, являются высокое содержание этого элемента в шахтных водах, высокое содержание пелитовой фракции в донных осадках и низкая скорость течения речных вод в бассейне Северского Донца. При этом, на наш взгляд, более высокое содержание соединений марганца в воде указывает на процессы самоочищения донных отложений и процессы вторичного загрязнения

водной толщии, а также на наличие постоянного источника поступления (например, шахтные воды или др.) либо на формирование условий, препятствующих осаждению соединений марганца (снижение Eh воды).

Медь в поверхностных водах бассейна Северского Донца характеризуется аномальным содержанием лишь эпизодически (в трех створах), причем коэффициент концентраций меди в целом колеблется в пределах от 1,0 до 1,6. Однако при расчете УКИЗВ медь во многих створах относится к критическим показателям загрязненности воды.

Разница величин коэффициента концентрации и кратности превышений ПДК меди в донных отложениях и воде вызвана не конкретными уровнями содержания, а разными критериями для оценки, существенно отличающимися друг от друга.

Так, в частности, кларк меди по речным водам [12] составляет 0,005 мг/дм³, в то время как ПДК_{рыбхоз} – 0,001 мг/дм³. Используемые при расчете УКИЗВ значения ПДК соединений меди в 5 раз меньше кларковых содержаний меди в речных водах, поэтому и результат, получаемый с помощью такой оценки, будет серьезно завышен.

В целом ярко выраженная способность меди сорбироваться взвешенными веществами путем ионного обмена с глинистыми минералами и взаимодействия с гумусовыми соединениями в совокупности с ранее упомянутой низкой скоростью течения рек исследуемого района создает предпосылки для осаждения меди из речных вод в донные отложения. В то же время, как указывают авторы работы [13], вторичное загрязнение речных вод медью является маловероятным. По данным упомянутого лабораторного эксперимента [15], из исследуемых металлов именно медь обладает наименьшей способностью к переходу в речную воду, что обуславливает низкий уровень загрязненности соединениями меди исследуемых участков рек.

Несмотря на перечисленные факторы, в донных отложениях рек бассейна Северского Донца аномальное содержание меди отмечено лишь в трех створах. Поэтому можно констатировать, что в бассейне Северского Донца уровень загрязненности соединениями меди речных вод и донных отложений низкий.

Свинец в поверхностных пресных водах мигрирует преимущественно во взвешенных формах. Как указывается в работе [13], для рек Черноморского бассейна доля взвешенных форм свинца может достигать 90–98 %. Этому способствует высокое сродство ионов свинца (II) к природным адсорбентам (гидроксиды металлов, глинистые частицы). Согласно данным [17], свинец способен практически полностью сорбироваться и осаждаться при значениях pH выше 6,0 и отсутствии растворимых комплексобразующих форм. Кроме того, большую роль в процессах сорбции свинца из водной толщи будут играть процессы комплексобразования с гуминовыми кислотами.

Поэтому в исследуемом районе, где речные воды характеризуются слабощелочной реакцией среды 8,0–8,5, свинец будет накапливаться преимущественно в донных отложениях за счет высокого содержания глинистых минералов пелитовой фракции, а также сорбции и осаждения свинца с гуминовыми кислотами.

Никель в реках исследуемого района в аномальном содержании отмечается в донных отложениях практически в половине створов, в то время как для водной толщи аномальное содержание никеля наблюдается лишь в 2 створах. Как указывают авторы работы [13], никель благодаря адсорбционным процессам способен накапливаться в донных отложениях рек, при этом он характеризуется средней подвижностью (ниже, чем у марганца и железа, но выше, чем у меди) и, соответственно, средней вероятностью вторичного загрязнения вод соединениями никеля. Авторы также указывают на существенную роль глинистых частиц в связывании никеля и его переносе. При этом взвешенная форма миграции никеля преобладает над растворенной. Таким образом, особенности накопления никеля и свинца представляются схожими: накопление в донных отложениях за счет связывания и осаждения с глинистым веществом пелитовой фракции и преобладание переноса этих элементов во взвешенной форме в речной воде.

Выводы

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Уровень загрязненности донных отложений рек бассейна Северского Донца определяется повышенным содержанием никеля и свинца – элементов, для которых характерен перенос преимущественно во взвешенном состоянии, в адсорбированной на глинистых минералах пелитовой

фракции форме. В силу гидрологических особенностей рек (большая извилистость, меандрированность рек, низкая скорость течения) указанные факторы способствуют накоплению этих элементов в донных отложениях.

2. Уровень загрязненности речных вод определяется рядом макро- и микрокомпонентов, среди которых соединения марганца и меди вносят значительный вклад. Так как при корреляционном анализе выявлена значимая взаимосвязь между ИПЗ_{до} и УКИЗВ, можно сделать вывод о существенном вкладе микрокомпонентов в общий уровень загрязненности речных вод (уровень загрязненности донных отложений рассчитывается относительно содержания микроэлементов, за исключением железа).

С нашей точки зрения, разные уровни загрязненности донных отложений и водной толщи рек бассейна Северского Донца вызваны процессами самоочищения донных отложений, когда определенное количество металлов переходит из донных отложений в водную толщу.

3. Таким образом, основные различия в уровнях загрязненности донных отложений и речных вод бассейна Северского Донца обусловлены процессами вторичного загрязнения речных вод, которые, с одной стороны, являются фактором самоочищения донных отложений, а с другой – служат постоянным источником поступления ряда элементов в речную воду. Кроме указанных процессов, немаловажным источником поступления соединений марганца и других элементов в реки исследуемого района являются шахтные воды.

4. Выявленные различия в уровнях загрязненности воды и донных отложений рек бассейна Северского Донца также могут быть вызваны физико-химическими особенностями элементов и условиями среды, способствующими либо их накоплению в донных отложениях (никель, свинец), либо переходу из донных отложений в водную толщу (марганец). Кроме этого, существенную разницу дает применение разных критериев для оценки уровней загрязненности (ПДК и кларковые величины), в результате чего оценка уровня загрязненности речной воды по УКИЗВ часто оказывается завышенной.

Список источников

1. *Закруткин В.Е., Складенко Г.Ю., Бакаева Е.Н., Решетняк О.С., Гибков Е.В., Фоменко Н.Е.* Поверхностные и подземные воды в пределах техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса: формирование химического состава и оценка качества. Ростов н/Д.: ЮФУ, 2016. 172 с.
2. *Красавцева Е.А., Сандимиров С.С.* Состояние водных объектов в зоне влияния горно-перерабатывающих предприятий на примере ООО «Ловозерский ГОК» // Вода и экология: проблемы и решения. 2021. № 2 (86). С. 3–13.
3. *Соколова О.В., Гричук Д.В., Шестакова Т.В., Пестова К.А.* Трансформация загрязнений в системе речная вода – поровый раствор – твердая фаза донных отложений в малых реках (на примере водотоков Национального парка «Лосиный остров») // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4: Геология. 2008. № 2. С. 46–57.
4. ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. М.: Изд-во стандартов, 2002. 5 с.
5. ГОСТ Р 51232-98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. М.: Изд-во стандартов, 1999. 241 с.
6. ГОСТ 17.1.3.07-82. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков. М.: Стандартиформ, 2010. 10 с.
7. *Саэт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
8. *Янин Е.П.* Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки). М.: ИМГРЭ, 2002. 52 с.
9. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: Приказ Минсельхоза России № 552 от 13 декабря 2016 г. (с изменениями на 10 марта 2020 г.). М., 2016. 91 с.
10. РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям / В.П. Емельянова, Е.Е. Лобченко. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. 49 с.
11. *Григорьев Н.А.* Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: Ин-т геологии и геохимии УРО РАН, 2009. 381 с.
12. *Виноградов А.П.* Введение в геохимию океана. М.: Наука, 1967. 215 с.
13. *Линник П.Н., Набиванец Б.И.* Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 270 с.

14. Закруткин В.Е., Скляренко Г.Ю., Гибков Е.В. Особенности химического состава и степень загрязненности подземных вод углепромышленных районов Восточного Донбасса // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2014. № 4 (182). С. 73–77.
15. Решетняк О.С., Закруткин В.Е. Донные отложения как источник вторичного загрязнения речных вод металлами (по данным лабораторного эксперимента) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2016. № 4 (192). С. 102–109.
16. Решетняк В.Н., Закруткин В.Е. Количественная оценка накопленной массы тяжелых металлов в донных отложениях рек Восточного Донбасса // Актуальные вопросы и инновационные технологии в развитии географических наук: сб. тр. Всерос. науч. конф. Ростов н/Д.: ЮФУ, 2020. С. 528–530.
17. Мур Дж., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах: контроль и оценка влияния: пер. с англ. М.: Мир, 1987. 288 с.

References

1. Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Yu., Bakaeva E.N., Reshetnyak O.S., Gibkov E.V., Fomenko N.E. *Surface and underground waters within the technogenically disturbed geosystems of the Eastern Donbass: formation of the chemical composition and quality assessment*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2016. 172 p. (In Russ.).
2. Krasavtseva E.A., Sandimirov S.S. The state of water bodies in the zone of influence of mining and processing enterprises on the example of OOO “Lovozerky GOK”. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya = Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2021;(2):3-13. (In Russ.).
3. Sokolova O.V., Grichuk D.V., Shestakova T.V., Pestova K.A. Transformation of pollution in the system river water-pore solution-solid phase of bottom sediments in small rivers (on the example of the watercourses of Losiny Ostrov National Park). *Vestn. Mosk. un-ta. Seriya 4: Geologiya = Bulletin of Moscow University. Series 4: Geology*. 2008;(2):46-57. (In Russ.).
4. GOST 17.1.5.01-80. *Protection of Nature. Hydrosphere. General requirements for sampling of bottom sediments of water bodies for pollution analysis*. Moscow: Publishing House of Standards; 2002. (In Russ.).
5. GOST R 51232-98. *Drinking water. General requirements for the organization and methods of quality control*. Moscow: Publishing House of Standards; 1999. (In Russ.).
6. GOST 17.1.3.07-82. *Protection of Nature. Hydrosphere. Water quality control rules for reservoirs and streams*. Moscow: Standartinform Publ.; 2010. (In Russ.).
7. Sayet Yu. E., Revich B.A., Yanin E.P. *Geochemistry of the environment*. Moscow: Nedra Publ.; 1990. 335 p. (In Russ.).
8. Yanin E.P. *Technogenic geochemical associations in bottom sediments of small rivers (composition, features, assessment methods)*. Moscow: IMGRE Publ., 2002. 52 p. (In Russ.).
9. *On approval of the water quality standards fishery water bodies, including the maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of fishery water bodies*: Order of the Russian Ministry of Agriculture No. 552 at December 13, 2016. Moscow, 2016. (In Russ.).
10. Emelyanova V.P., Lobchenko E.E. RD 52.24.643-2002. *The method of complex assessment of the degree of pollution of surface waters according to hydrochemical indicators*. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat Publ.; 2002. 49 p. (In Russ.).
11. Grigoriev N.A. *Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust*. Ekaterinburg: Institute of Geology and Geochemistry Press, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2009. 381 p. (In Russ.).
12. Vinogradov A.P. *Introduction to ocean geochemistry*. Moscow: Nauka Publ.; 1967. 215 p. (In Russ.).
13. Linnik P.N., Nabivanets B.I. *Forms of metal migration in fresh surface waters*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1986. 270 p. (In Russ.).
14. Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Yu., Gibkov E.V. Peculiarities of the chemical composition and the degree of pollution of underground waters in the coal-mining regions of the Eastern Donbass. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2014;(4):73-77. (In Russ.).
15. Reshetnyak O.S., Zakrutkin V.E. Bottom sediments as a source of secondary river water pollution with metals (according to laboratory experiment data). *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2016;(4):102-109. (In Russ.).
16. Reshetnyak V.N., Zakrutkin V.E. Quantitative assessment of the accumulated mass of heavy metals in the river sediments in the Eastern Donbass. *Topical issues and innovative technologies in the development of geographical sciences*. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2020:528-530. (In Russ.).
17. Moore J., Ramamoorthy S. *Heavy metals in natural waters: applied monitoring and impact assessment*. Moscow: Mir Publ.; 1987. 288 p. (In Russ.).

Информация об авторах

В.Н. Решетняк – аспирант, младший научный сотрудник, Институт наук о Земле.

В.Е. Закруткин – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле.

Information about the authors

V.N. Reshetnyak - Postgraduate, Junior Researcher, Institute of Earth Sciences.

V.E. Zakrutkin - Doctor of Science (Geology and Mineralogy), Professor of the Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences.

*Статья поступила в редакцию 01.06.2022; одобрена после рецензирования 20.06.2022; принята к публикации 30.08.2022.
The article was submitted 01.06.2022; approved after reviewing 20.06.2022; accepted for publication 30.08.2022.*

Научная статья

УДК 574.52(262.54)

doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-103-113

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В ВОДОРΟΣЛЕВЫХ МАТАХ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА НЕКОТОРЫЕ ГРУППЫ ГИДРОБИОНТОВ В ГИПЕРСОЛЁНЫХ ВОДОЁМАХ (НА ПРИМЕРЕ ЗАЛИВА СИВАШ, КРЫМ)

О.В. Соловьёва¹, Ю.В. Дорошенко², Е.А. Тихонова³, Н.В. Бурдиян⁴, Т.В. Витер⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Федеральный исследовательский центр "Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН", Севастополь, Россия

¹ kozl_ya_oly@mail.ru

² julia_doroshenko@mail.ru

³ tihonova@mail.ru

⁴ burdiyan@mail.ru

⁵ tatjana-viter@rambler.ru

Аннотация. Исследованы физико-химические условия (солёность, температура, рН) в водорослевых матах, формируемых в прибрежной полосе гиперсолёного залива Сиваш (Крым), и их влияние на некоторые группы гидробионтов. Отмечена достоверная тенденция к росту рН в направлении от берега к открытой воде, что является отображением улучшения кислородных условий в указанном направлении. Гетеротрофные и денитрифицирующие бактерии выделены повсеместно. Отмечено наличие достоверной отрицательной корреляции рН воды с численностью гетеротрофов и слабой отрицательной – с денитрификаторами. Таким образом, прослеживается тенденция к ингибированию повышенными показателями рН роста данных групп бактерий. Солёность в диапазоне её изменения (60,8–94,5 ‰) не оказывала значимого влияния на численность исследуемых групп бактерий. В зафиксированном диапазоне изменения температуры (23–32 °С) утверждать о наличии тесной связи данных параметров невозможно. В пределах водорослевых матов существовало скудное по разнообразию сообщество, макрокомпоненты которого были представлены *Artemia salina* (Linnaeus, 1758) и личинками *Chironomidae* sp. Солёность в исследуемом диапазоне значений не оказывала значимого влияния на численность и биомассу компонентов макрозоообщества. При этом отмечено положительное влияние изменения рН воды на численность и биомассу артемии. Подобного явления для личинок *Chironomidae* sp. не зафиксировано.

Ключевые слова: водорослевые маты, физико-химические параметры, галофильные бактерии, гидробионты, гиперсолёный водоём, залив Сиваш

Благодарности: авторы выражают благодарность ведущему инженеру отдела аквакультуры и морской фармакологии ФИЦ ИнБЮМ Т.А. Богдановой за определение солёности в исследуемых пробах, ведущему научному сотруднику лаборатории хемозологии ОРХБ ФИЦ ИнБЮМ С.В. Алёмову и старшему научному сотруднику лаборатории хемозологии ОРХБ ФИЦ ИнБЮМ О.А. Миронову за помощь в отборе проб.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (№ гос. регистрации 121031500515-8).

Для цитирования: Соловьёва О.В., Дорошенко Ю.В., Тихонова Е.А., Бурдиян Н.В., Витер Т.В. Физико-химические условия в водорослевых матах и их влияние на некоторые группы гидробионтов в гиперсолёных водоёмах (на примере залива Сиваш, Крым) // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 3. С. 103–113.

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

Original article

PHYSICAL AND CHEMICAL CONDITIONS IN ALGAE MATS AND THEIR INFLUENCE ON SOME GROUPS OF HYDROBIONTS IN HYPERSALT WATER BODIES (A CASE OF SIVASH BAY, CRIMEA)

O.V. Soloveva¹, Yu.V. Doroshenko²✉, E.A. Tikhonova³, N.V. Burdiyan⁴, T.V. Viter⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia

¹ kozl_ya_oly@mail.ru

² julia_doroshenko@mail.ru✉

³ tihonova@mail.ru

⁴ burdiyan@mail.ru

⁵ tatjana-viter@rambler.ru

Abstract. The physical and chemical characteristics (salinity, temperature, pH) in algae mats of hypersaline Sivash Bay (Crimea) were studied. They were formed in the coastal waters of the bay and influence alive community condition. A significant tendency of the pH increase in the direction of shore-clear water was noted. This represents an improvement of oxygen conditions in the said direction. Heterotrophic and denitrifying bacteria had been isolated ubiquitously. The presence of a significant negative correlation between pH of the water and the number of heterotrophic bacteria was noted. A slight negative correlation between pH of the water and the number of denitrifying bacteria was determined. Thus, there was a tendency for the inhibition of these bacteria groups' growth by high pH. Salinity, in the range of its change (60.8–94.5 ‰), hadn't a significant effect on the abundance of the studied groups of bacteria. In the detected range of temperature (23–32 °C), it was impossible to assert the presence of a close relationship between these parameters. In algal mats, there was a community of poor diversity. The macrocomponents were represented by *Artemia salina* (Linnaeus, 1758) and larvae of Chironomidae sp. Salinity in the studied range of values hadn't affected the abundance and biomass of the components of the macrozoocommunity significantly. At the same time, a positive effect of changes in water pH on the abundance and biomass of *A. salina* was noted. This phenomenon for the larvae of Chironomidae sp. not fixed.

Keywords: algae mats, physical and chemical parameters, halophilic bacteria, hydrobionts, hypersaline reservoir, Sivash Bay

Acknowledgments: the authors appreciate deeply the leading engineer of the Aquaculture and Marine Pharmacology Department (IBSS) T.A. Bogdanova for the determination of salinity in the studied samples, the leading researcher of the Laboratory of Chemoecology (IBSS) S.V. Alyomov and the senior researcher of the Laboratory of Chemoecology (IBSS) O.A. Mironov for help with sampling.

The present research was carried out within framework of the State assignment of the IBSS on the theme "Mollusimological and biogeochemical foundations of the marine ecosystems homeostasis" (No. 121031500515-8).

For citation: Soloveva O.V., Doroshenko Yu.V., Tikhonova E.A., Burdiyan N.V., Viter T.V. Physical and Chemical Conditions in Algae Mats and Their Influence on Some Groups of Hydrobionts in Hypersalt Water Bodies (a Case of Sivash Bay, Crimea). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2022;(3):103-113. (In Russ.).

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

Введение

В настоящее время, ввиду трансформации экосистемы Сиваша в результате роста его солёности, на поверхности прибрежных участков водоёма формируются плавучие маты, которые преи-

мущественно сформированы [1] зелёной нитчатой водорослью *Cladophora sivashensis* (С. Meyer, 1922). Причём увеличение матов кладофоры наблюдалось по мере осолонения залива [1]. Плавающие маты достигали биомассы 2–2,5 кг/м² [2–4], распространены, по нашим наблюдениям, преимущественно вдоль береговой линии и на мелководьях, являются субстратом для поселения различных групп организмов. В частности, подробно описаны цилиаты, обитающие на них [2], в 2014–2015 гг. в матах отмечалась высокая численность Herpacticoda. В целом в этот период средняя численность животных в матах составляла 210–613 тыс. экз/м². В составе сообщества присутствовали Ostracoda, Bivalvia, Gastropoda, Amphipoda, Chironomidae и Policheta, а также молодь бычка *Knipowitchia caucasica* (Berg, 1916), молодь *Atherina pontica* (Eichwald, 1831). В этот период солёность Сиваша не превышала 40 г/л [1].

За минувшие годы солёность Сиваша продолжала неуклонно расти [5], что неминуемо вызвало трансформацию всей его экосистемы [1, 6]. Отмечено сокращение видового разнообразия в водоёме, вплоть до полного выпадения отдельных звеньев экологической цепи [6]. В результате развития водорослевых матов происходит дополнительное поступление биогенных элементов в береговую зону, за этим следует аккумуляция органических веществ, вызывающая образование бескислородных условий [7]. При гниении водорослевых матов также создаются анаэробные условия, изменяющие протекание окислительно-восстановительных процессов [8]. Можно предположить, что в нашем случае различному состоянию матов соответствовали и различные кислородные условия, а следовательно, и различный водородный показатель. В этой связи закономерно ожидать изменение в гетеротрофном сообществе, регулируемое биогеохимическими циклами [7].

Галофильные и галотолерантные микроорганизмы способны к активной жизнедеятельности в широком диапазоне концентраций солей [9]. Они обнаруживаются в различных биотопах и антропогенных экосистемах с повышенным уровнем минерализации [10, 11]. Существует тесная зависимость между элементами окружающей среды и деятельностью микроорганизмов. Особенно чётко эти взаимоотношения выражаются в цикле круговорота азота, где большой интерес представляют истинные денитрификаторы, восстанавливающие нитраты до свободного азота [12, 13].

Солёность является одним из важных факторов окружающей среды, влияющих на состав живого, в том числе и бактериального, сообщества. Изменение солёности также вызвало постепенное уменьшение бентосных форм и населяющих водную толщу гидробионтов [14]. К настоящему времени существенно снизились показатели биоразнообразия донных сообществ, их таксономическая структура изменилась [6], хотя ранее макрозообентос Восточного Сиваша являлся кормовым объектом перелётных птиц [15]. Помимо солёности, большое влияние на развитие микробиологических процессов и качество среды обитания для бентосного сообщества оказывает также активная реакция среды (рН). Следует отметить и значительное влияние температурного фактора на скорость бактериального роста.

Целью работы стало изучение изменения физико-химических показателей воды и донных отложений при развитии водорослевых матов, а также влияния комплекса экологических факторов (степень развития матов, рН, солёность воды, температура) на состояние отдельных компонентов живого сообщества, обитающего в пределах водорослевых матов (численность гетеротрофных и денитрифицирующих групп бактерий, состав и показатели обилия макросообщества).

Материал и методы исследования

Материалом для работы послужили пробы воды, матов и прибрежных наносов, отобранные в акватории восточной части залива Сиваш (рис. 1) в июле 2021 г. на 10 станциях (ст.).

В свежееотобранных пробах воды и донных отложениях *in situ* проводили измерение величины водородного показателя рН-метром-термометром «Нейтрон-рН». В пробах воды определяли численность гетеротрофных (ГБ) и денитрифицирующих (ДНБ) групп бактерий. Определение численности бактерий проводили методом предельных десятикратных разведений с использованием элективных питательных сред [16] с учётом солёности воды. Солёность воды определялась аргентометрическим методом.

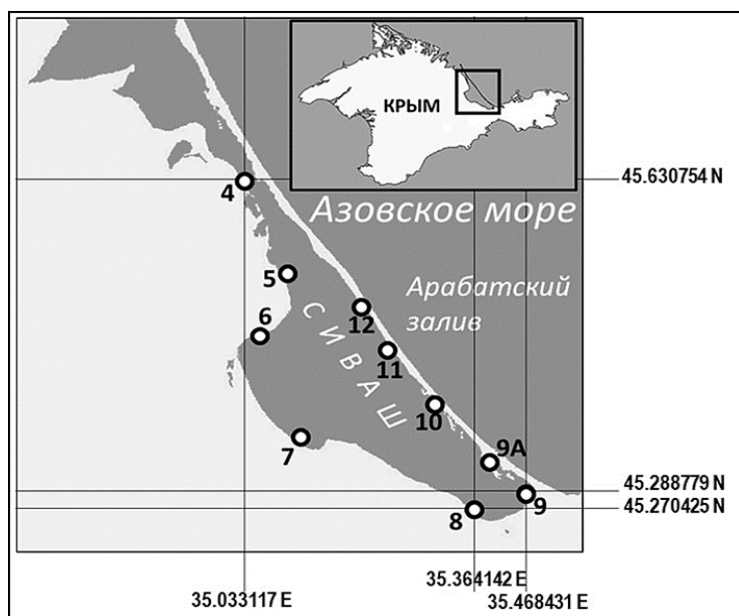


Рис. 1. Схема расположения станций пробоотбора, Восточный Сиваш, 2021 г.
 / Fig. 1. Study area and sampling sites, Eastern Sivash, 2021

Для оценки таксономического состава и количественных показателей макрозооперифитона водорослевые маты отбирали вручную в объёме 1 л и помещали в приготовленные сосуды. Пробы фитопланктона и перифитона фиксировали раствором Люголя и обрабатывали в лабораторных условиях под бинокляром МБС-9. Обнаруженных гидробионтов определяли с помощью [17, 18]. При описании количественного развития макрозооперифитона использованы показатели численности (экз/кг) и биомассы (г/кг). Определение сырой массы гидробионтов выполнено на электронных весах МЛ 0,11-П В1ЖА (0,01; D=83) «Ньютон» с точностью до 0,001 г. Для определения массы отобранных фрагментов водорослевых матов их предварительно высушивали до воздушно-сухого состояния. Относительную численность гидробионтов в матах устанавливали путём деления числа подсчитанных особей на массу фрагмента мата, относительную биомассу животных – делением массы обнаруженных особей на массу фрагмента мата. Обработка полученных количественных данных производилась в программе Excel.

Для статистической обработки полученных данных, ввиду малого объёма выборок и отсутствия подтверждения нормальности распределения исследуемых величин, использовались непараметрические статистические методы. В качестве критерия различия между выборками был использован критерий знаков ($p < 0,05$). В качестве критерия зависимости между переменными в случае оценки связи псевдоколичественной (степень развития матов) и количественной величин (рН, солёность) использовался гамма-критерий (γ , $p < 0,05$). Для исследования тесноты взаимосвязи двух количественных показателей использовался корреляционный анализ Спирмена (R , $p < 0,05$).

Результаты

Визуально обнаруженные водорослевые маты можно было разделить на три условные части. У самой кромки воды находились полуразложившиеся водоросли, застойная вода. В средней части матов водоросли были преимущественно живыми, образовывали плотные скопления. На границе мата и открытой воды он был разрежённым, вода достаточно подвижной, макрофиты не имели признаков разложения. Для условной параметризации характер развития водорослевых матов был описан по трёхбальной шкале: 1 – незначительные; 2 – достаточно развитые, плотные; 3 – обильные (рис. 2Б). Условия, при которых развивались водорослевые маты, описанные в настоящем исследовании, были следующими: температура воды в момент отбора проб варьировала от 23 до 32 °С, солёность колебалась от 60,8 до 94,5 ‰ (рис. 2А).

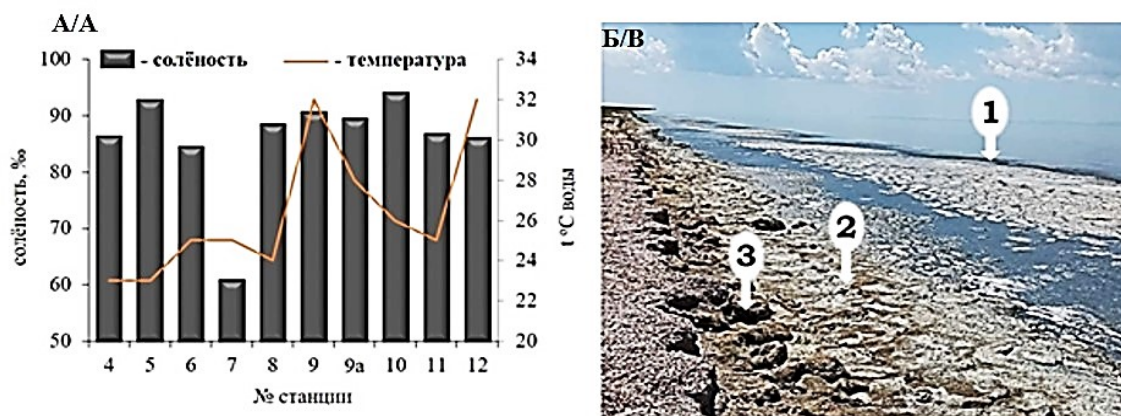


Рис. 2. Солёность, температура воды (А) и ранжирование матов по интенсивности их развития (Б): 1 – незначительные; 2 – достаточно развитые, плотные; 3 – обильные / Fig. 2. Salinity, temperature of the water (А) and ranking mats according to the intensity of their development (B): 1 - small; 2 - enough developed, dense; 3 - large

В пределах матов рН изменялся в широком диапазоне (рис. 3): особенно велик был размах его колебаний у берега, в зоне наличия максимального количества разлагающейся органики (6,8–8,5). Водородный показатель воды, по нашим наблюдениям, существенно зависел от плотности матов. В центральной части матов, где преобладали живые водоросли, рН колебался в диапазоне 6,7–8,2, однако большая часть зафиксированных значений была смещена в щелочную область. На границе мат – открытая вода диапазон колебаний рН был ниже, а значения находились в диапазоне 7,2–8,4, что в большей мере соответствует рН природных вод [13].

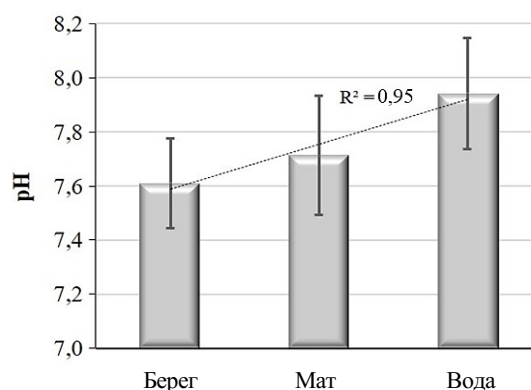


Рис. 3. Среднее значение рН (с указанием ошибки среднего) в различных частях водорослевых матов залива Сиваш / Fig. 3. The mean value pH (with error of mean) in different parts of the algae mats of the Sivash Bay

На рис. 4А представлены значения водородного показателя в центральной части матов и в донных отложениях под ними. Видно, что в большинстве случаев значение рН в воде было ниже, чем в донных отложениях. Только в отдельных случаях (ст. 4, 5, 6) кислородные условия в донных отложениях были благоприятнее, чем непосредственно в толще матов.

ГБ и ДНБ выделены повсеместно. Численность ГБ в исследуемых пробах варьировала от 10^6 до 10^8 кл./мл. В 67 % проб число ГБ составляло 10^8 кл./мл. Бактерии, осуществляющие в анаэробных условиях процесс денитрификации, выделены из всех проб воды – в диапазоне от 10^4 до 10^6 клеток в 1 мл воды. Наибольший показатель (10^6 кл./мл) высеян в 42 % проб. Высокие показатели численности ГБ (10^7 – 10^8 кл./мл) отмечены при диапазоне рН от 6,7 до 8,1. При рН выше 8,1 наблюдалось снижение числа ГБ на 1–2 порядка (рис. 5). Исходя из количественных показателей ДНБ, наиболее интенсивно процессы денитрификации протекали при показателях рН 6,7 и 8,0. В то же время минимальные значения ДНБ выделены при показателях рН 8,0 и 8,1. При увеличении показателя рН до 8,2 и 8,5 численность данной группы бактерий составляла 10^5 кл./мл.

В июне 2021 г. в составе макрозооообщества были обнаружены только *Artemia salina* (Linnaeus, 1758) и личинки *Chironomidae sp.*, численность которых колебалась в широких пределах (рис. 6А). Средняя численность артемии составляла 46 904 экз/кг с диапазоном значений от 0 до 390 898 экз/кг. Численность личинок хирономид была выше и в среднем составляла 558 957 экз/кг (от 4836 до 3 588 369 экз/кг).

Биомасса обнаруженных организмов (рис. 6Б) изменялась пропорционально численности и составляла для артемии в среднем 19 г/кг (разброс значений от 0 до 162 г/кг), для *Chironomidae sp.* – 128 (от 1 до 812 г/кг).

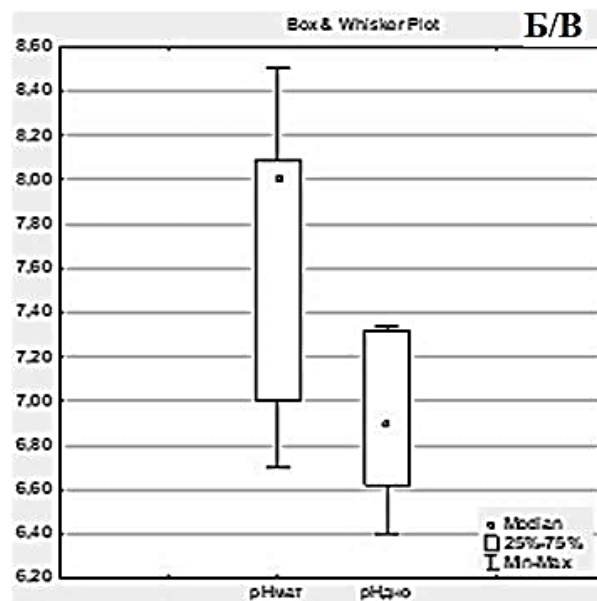
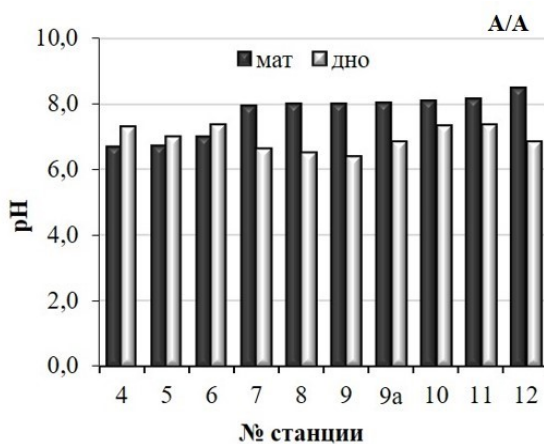


Рис. 4. Показатели pH в водорослевых матах и у дна (А): диаграмма размаха pH, медиана, квартальный размах (25 %, 75 % процентиля), размах (минимум, максимум) (Б) залива Сиваш / Fig. 4. The values pH in the algae mats and bottom sediments (A): pH range diagram, median, quarterly range (25 %, 75 % percentiles), range (minimum, maximum) (B) of Sivash Bay

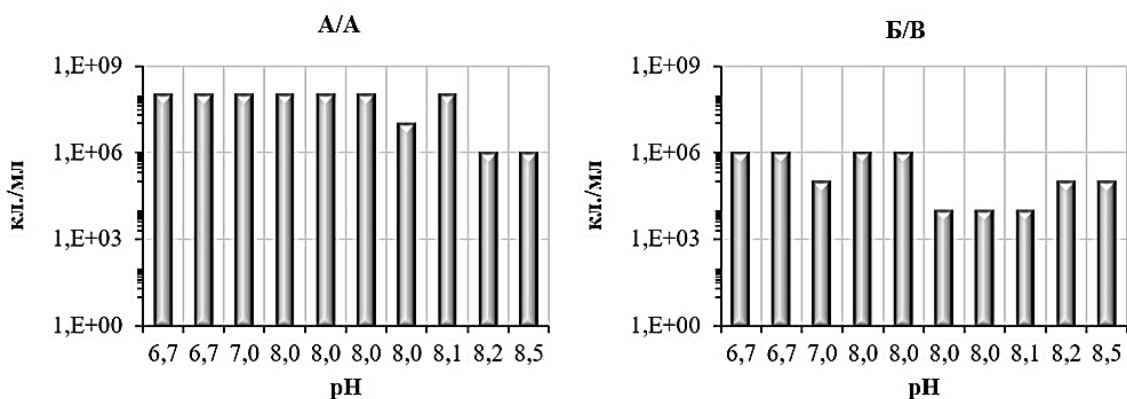


Рис. 5. Численность гетеротрофных (А) и денитрифицирующих (Б) бактерий (кл./мл) в воде матов при различных уровнях pH / Fig. 5. The abundance of the heterotrophic (A) and denitrifying (B) bacteria (cells/ml) at the water mats in different pH

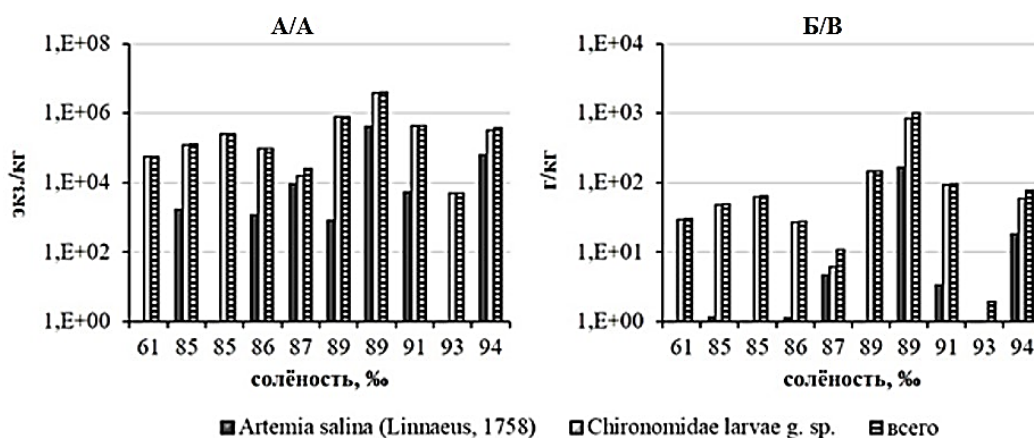


Рис. 6. Количественные показатели макрозооперифитона водорослевых матов залива Сиваш: А – численность, экз/кг; Б – биомасса, г/кг / Fig. 6. Quantitative parameters macrozooperiphyton of algal mats of Sivash Bay: A - number, ind/kg; B - biomass, g/kg

Обсуждение

По результатам проведённого экспедиционного исследования побережья залива Сиваш в июне 2021 г. установлено, что прибрежная полоса водоёма покрыта водорослевыми матами, образованными, судя по литературным данным [1], *Cladophora sivashensis* (С. Meyer, 1922). В литературе [19] указывается, что при наличии обширных матов в прибрежной зоне изменяются кислородные условия как внутри самих матов, так и воды под ними. Описано наличие чёрного зловонного ила в донных отложениях, который повсеместно присутствовал и в прибрежных донных отложениях Сиваша.

Поскольку характер матов при удалении от берега изменялся, вероятно, и кислородные условия имели разные значения. Сравнение выборок (рН), полученных у берега, в центре и у кромки воды, указало на достоверное различие значений водородного показателя в исследуемых частях матов ($p_v=0,51; 0,75; 1,0$).

На графике (рис. 3) также видна тенденция ($R^2=0,95$) к росту рН в направлении от берега к открытой воде, что является отображением улучшения кислородных условий в указанном направлении. Для оценки взаимосвязи уровня развития матов (выраженного в условных баллах), рН воды (в центральной части мата) и её солёности был проведен статистический тест с применением гамма-критерия. Наличие достоверной взаимосвязи исследуемых показателей на предложенном массиве данных установить не удалось ($\chi^2 = -0,44$ и $\chi^2 = -0,12$ соответственно). Таким образом, из исследованных экологических факторов от степени развития матов зависел только водородный показатель, изменчивость которого удалось проследить в направлении от берега к открытой воде.

Как указано выше, наличие водорослевых матов существенно влияет на бентосные условия [19]. Сравнение рН воды и донных отложений по критерию знаков показало статистическую значимость наблюдаемых отличий (рис. 4Б). Проведённая оценка взаимосвязи водородного показателя в верхнем слое донных отложений, отобранных под центральной частью мата, со степенью развития матов и рН в них не позволила выявить достоверной связи между исследуемыми величинами ($\chi^2 = -0,44$).

Изменения физико-химических показателей среды в районе развития водорослевых матов не могут не сказаться на состоянии микробного сообщества. Проведённый корреляционный анализ зависимости численности ГБ и ДНБ от физико-химических характеристик среды показал, что для водородного показателя удалось проследить наличие достоверной отрицательной корреляции с численностью ГБ ($R = -0,75$).

По всей видимости, оптимальное значение для активного роста ГБ в заливе находится в диапазоне рН от 6,7 до 8,1. Слабая корреляционная связь определена между ДНБ и значениями рН. Коэффициент корреляции у группы ДНБ составил $R = -0,58$. Таким образом, прослеживается тенденция к ингибированию повышенными показателями рН роста данных групп бактерий. В работе [11] показано, что штаммы галофильных ДНБ, выделенные из солёных озёр и солончаков Терско-Кумской и Терско-Сулакской низменностей, росли при рН 6–8 с оптимумом 7,2–7,4. Для справки: рН вод Азовского моря, с которым сообщается залив Сиваш, составляет от 7,8 до 8,1 [20].

Солёность в диапазоне её изменения (60,8–94,5 ‰) не оказывала значимого влияния на численность исследуемых групп бактерий ($R=0,08$ (ГБ) и $R = -0,46$ (ДНБ)). Активный бактериальный рост при высоких показателях солёности отмечен многими авторами. Так, средняя численность бактерий в Большом Солёном озере (США) в течение года составляла $7 \cdot 10^7$ кл./мл. Галобактерии, являясь наиболее распространёнными в воде Мёртвого моря, встречались в меньших количествах, чем в Большом Солёном озере. Самые высокие значения численности составляли $7 \cdot 10^6$ кл./мл [21]. Сходные данные были получены в работе [22], где отмечено активное развитие гетеротрофного бактериопланктона, выделенного из солёного озера, на средах с различным диапазоном солёности. Способность ДНБ к росту в экстремально галоалкалофильных условиях показана в [23].

Выявлена слабая положительная корреляция между температурой и численностью ГБ ($R=0,58$). Скорость роста ГБ в значительной мере зависит от температуры воды и наличия усвояемых (лабильных) органических веществ [24]. Ещё более слабая положительная корреляционная связь определена между температурой и численностью ДНБ ($R=0,38$). Таким образом, в зафиксированном диапазоне изменения температур хоть и прослеживается некая тенденция к увеличению численности микроорганизмов при увеличении температуры воды, однако утверждать

о наличии тесной связи данных параметров не представляется возможным. Данный факт можно объяснить как небольшим разбросом температурных условий, так и более значимым влиянием других экологических факторов.

По данным 2014–2015 гг., когда солёность Сиваша не превышала 40 г/л, средняя численность животных в матах составляла 210–613 тыс. экз/м². В этот период [1] в матах отмечалась высокая численность ракообразных, а также присутствовали некоторые моллюски, молодь бычка *Knipowitschia caucasica* (Berg, 1916) и молодь *Atherina pontica* (Eichwald, 1931). В настоящее время при солёности 60,8–94,5 ‰ в составе макрообитателей водорослевых матов были обнаружены только *Artemia salina* (Linnaeus, 1758) и личинки *Chironomidae sp.* Таким образом, можно констатировать сокращение биоразнообразия водоёма в связи с ростом его солёности. Данное явление уже описывалось в предшествующих исследованиях [6].

Проведена статистическая оценка влияния физико-химических параметров воды, таких как солёность и водородный показатель, на численность и биомассу компонентов макрозоообщества. При очевидном влиянии солёности на гидробионты водоёма установлено, что она в зафиксированном диапазоне значений не оказывала значимого влияния на численность и биомассу обнаруженных гидробионтов ($R=0,13-0,44$). Вероятно, это связано с тем, что в настоящих условиях остались только галотолерантные организмы, численность которых в данном диапазоне солёности не менялась. При этом установлено положительное влияние изменения водородного показателя воды на численность ($R=0,66$) и биомассу ($R=0,66$) артемии. Подобного явления для личинок *Chironomidae sp.* не зафиксировано ($R=-0,04-0,12$). Возможно, это обусловлено большей чувствительностью артемий к кислородным условиям.

Заключение

Функционирование водорослевых матов изменяет экологические условия в прибрежной полосе залива Сиваш. В зафиксированном диапазоне физико-химических условий ($pH=6,8-8,5$, $T=23-32$ °C, $S=60,8-94,5$ ‰) ведущим фактором, изменяющимся в результате функционирования водорослевых матов и влияющим на живое сообщество, судя по полученным данным, является показатель pH. Под матами прибрежной полосы формируется характерное для данных анаэробных условий сообщество гидробионтов.

Список источников

1. Шадрин Н.В., Сергеева Н.Г., Латушкин А.А., Колесникова Е.А., Киприянова Л.М., Ануфриева Е.В., Чепыженко А.А. Трансформация залива Сиваш (Азовское море) в условиях роста солёности: изменения мейобентоса и других компонент экосистемы (2013–2015 гг.) // Журн. СФУ. Биология. 2016. № 9 (4). С. 452–466. Doi: 10.17516/1997-1389-2016-9-4-452-466.
2. Sergeeva N., Shadrin N., Abibulaeva A., Dovgal I. Records of sessile ciliates (Ciliophora, Peritrichia) on the green filamentous algae *Cladophora sivashensis* in the Sivash Bay (the Sea of Azov) // Protistology. 2020. Vol. 14, № 2. P. 89–94. <https://doi.org/10.21685/1680-0826-2020-14-1-6>.
3. Anufrieva E., Kolesnikova E., Revkova T., Latushkin A., Shadrin N. Human-Induced Sharp Salinity Changes in the World's Largest Hypersaline Lagoon Bay Sivash (Crimea) and Their Effects on the Ecosystem // Water. 2022. Vol. 14, iss. 3. Article 403. <https://doi.org/10.3390/w14030403>.
4. Sergeeva N. G., Shadrin N. V., Anufrieva E. V. Long-term changes (1979–2015) in the nematode fauna in Sivash Bay (Sea of Azov), Russia, worldwide the largest hypersaline lagoon, during salinity transformations // Nematology. 2019. Vol. 21, № 4. P. 337–347. <https://doi.org/10.1163/15685411-00003217>.
5. Совга Е.Е., Ерёмкина Е.С., Латушкин А.А. Экспедиционные исследования, проведенные Морским гидрофизическим институтом в акватории залива Сиваш весной и осенью 2018 года // Морской гидрофиз. журн. 2020. Т. 36, № 2. С. 176–185. Doi: 10.22449/0233-7584-2020-2-176-185.
6. Soloveva O.V., Tikhonova E.A., Alemov S.V., Burdiyan N.V., Viter T.V., Guseva E.V., Kotelyanets E.A., Bogdanova T.A. Ecological State of the Southeastern Part of Sivash Bay (Sea of Azov) under Conditions of Changing Salinity // Contemporary Problems of Ecology. 2019. Vol. 12, № 2. P. 179–188. <https://doi.org/10.1134/S1995425519020070>.
7. Gubelit Y., Polyak Y., Dembska G., Pazikowska-Sapota G., Zegarowski L., Kochura D., Krivorotov D., Podgornaya E., Burova O., Maazouzi C. Nutrient and metal pollution of the eastern Gulf of Finland coastline: Sediments, macroalgae, microbiota // Science of The Total Environment. 2016. Vol. 550. P. 806–819. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.122.

8. Голубков С.М., Беляков В.П., Голубков М.С., Литвинчук Л.Ф., Петухов В.А., Губелин Ю.И. Поток энергии и круговорот фосфора в экосистеме мелководного водохранилища в условиях антропогенного стресса // *Экология*. 2019. № 6. С. 456–462. Doi: 10.1134/S0367059719060052.
9. Saccò M., White N.E., Harrod C., Salazar G., Aguilar P., Cubillos C.F., Meredith K., Baxter B.K., Oren A., Anufrieva E., Shadrin N., Marambio-Alfaro Y., Bravo-Naranjo V., Allentoft M.E. Salt to conserve: a review on the ecology and preservation of hypersaline ecosystems // *Biological Reviews*. 2021. Vol. 96, № 6. P. 2828–2850. <https://doi.org/10.1111/brv.12780>.
10. Oren A. Microbial life at high salt concentrations: phylogenetic and metabolic diversity // *Saline Systems*. 2008. Vol. 4, № 2. P. 1–13.
11. Халилова Э.А., Котенко С.Ц., Исламмагомедова Э.А., Абакарова А.А., Черных Н.А., Аливердиева Д.А. Галофильные бактерии солёных озёр и солончаковых почв Прикаспийской низменности (Республика Дагестан) и их биотехнологический потенциал // *Вавиловский журн. генетики и селекции*. 2021. № 25 (2). P. 224–233. Doi: 10.18699/VJ21.02.
12. Горленко В.М., Дубинина Г.А., Кузнецов С.И. *Экология водных микроорганизмов*. М.: Наука, 1977. 288 с.
13. Разумов В.А., Тотюнова Ф.И. Нитритное загрязнение р. Москвы: причины и следствия // *Водные ресурсы*. 2001. № 3. С. 356–366.
14. Ерёмин Е.С., Совга Е.Е., Станичный С.В., Михайлов В.А. Динамика площади тростниковых зарослей в заливе Сиваш (Азовское море) по спутниковым данным // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 4. С. 54–65.
15. Кирикова Т.А., Антоновский А.Г. Макрозообентос Восточного и Центрального Сиваша как кормовая база тундровых куликов в период миграции // *Сб. тр. Зоологического музея*. 2010. № 41. С. 210–235.
16. *Практикум по микробиологии* / под ред. А.И. Нетрусова. М.: Академия, 2005. 608 с.
17. *Определитель фауны Чёрного и Азовского морей* / сост. З.И. Баранова, М. Бэческу, А.Н. Голиков; под общ. рук. Ф.Д. Мордохай-Болтовского. К.: Наукова думка, 1969. Т. 2. 536 с.
18. WoRMS Editorial Board (2021). World Register of Marine Species. URL: <http://www.marinespecies.org/> (дата обращения: 01.02.2022).
19. Des Marais D. J. Biogeochemistry of Hypersaline Microbial Mats Illustrates the Dynamics of Modern Microbial Ecosystems and the Early Evolution of the Biosphere // *The Biological Bulletin*. 2003. Vol. 204, № 2. P. 160–167.
20. Зеленская О.В., Короленко С.В. Динамика гидрологических и гидрохимических параметров Азовского моря у берегов Керченского полуострова и ее влияние на состояние гидробионтов // *Экол. вестн. Северного Кавказа*. 2021. Т. 17 (1). С. 74–81.
21. Javor V. *Hypersaline Environments*. Springer-Verlag, 1989. 576 p.
22. Лаврентьева Е.В., Банзаракцаева Т.Г., Эрдынеева Е.Б., Биджоян А.М., Кабилов М.Р. Галофильные бактерии – первичные деструкторы в соленом озере Гуджирганское (Баргузинская долина, Северное Прибайкалье) // *Вестн. Бурятского гос. ун-та. Биология, география*. 2018. № 4. С. 46–50. Doi: 10.18101/2587-7143-2018-4-46-50.
23. Shapovalova A.A., Khijniak T.V., Tourova T.P., Muzyer G., Sorokin D.Y. Heterotrophic denitrification at extremely high salt and pH by haloalkaliphilic Gammaproteobacteria from hypersaline soda lakes // *Extremophiles*. 2008. Vol. 12. P. 619–625. Doi: 10.1007/s00792-008-0166-6.
24. Заварзин Г.А. Изучение микробного разнообразия в Институте микробиологии им. С.Н. Виноградского // *Микробиология*. 2004. Т. 73, № 5. С. 598–612. Doi: 10.1023/B:MICI.0000044242.93603.00.

References

1. Shadrin N., Sergeeva N., Latushkin A., Kolesnikova E., Kipriyanova L., Anufrieva E., Chepyzhenko A. Transformation of Gulf Sivash (the Sea of Azov) in Conditions of Growing Salinity: Changes of Meiobenthos and Other Ecosystem Components (2013-2015). *Zhurn. SFU. Biologiya = Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2016;(9):452-466, doi: 10.17516/1997-1389-2016-9-4-452-466. (In Russ.)
2. Sergeeva N., Shadrin N., Abibulaeva A., Dovgal I. Records of sessile ciliates (Ciliophora, Peritrichia) on the green filamentous algae *Cladophora sivashensis* in the Sivash Bay (the Sea of Azov). *Protistology*. 2020;14(2):89-94, <https://doi.org/10.21685/1680-0826-2020-14-1-6>.
3. Anufrieva E., Kolesnikova E., Revkova T., Latushkin A., Shadrin N. Human-Induced Sharp Salinity Changes in the World's Largest Hypersaline Lagoon Bay Sivash (Crimea) and Their Effects on the Ecosystem. *Water*. 2022;14(3):403, <https://doi.org/10.3390/w14030403>.
4. Sergeeva N.G., Shadrin N.V., Anufrieva E.V. Long-term changes (1979-2015) in the nematode fauna in Sivash Bay (Sea of Azov), Russia, worldwide the largest hypersaline lagoon, during salinity transformations. *Nematology*. 2019;21(4):337-347, <https://doi.org/10.1163/15685411-00003217>.

5. Sovga E., Eremina S., Latushkin A. Research Expeditions Performed by Marine Hydrophysical Institute in the Sivash Bay Waters in Spring and Autumn, 2018. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*. 2020;36(2):176-185, doi: 10.22449/0233-7584-2020-2-176-185. (In Russ.).
6. Soloveva O.V., Tikhonova E.A., Alemov S.V., Burdiyan N.V., Viter T.V., Guseva E.V., Kotelyanets E.A., Bogdanova T.A. Ecological State of the Southeastern Part of Sivash Bay (Sea of Azov) under Conditions of Changing Salinity. *Contemporary Problems of Ecology*. 2019;12(2):179-188, <https://doi.org/10.1134/S1995425519020070>.
7. Gubelit Y., Polyak Y., Dembska G., Pazikowska-Sapota G., Zegarowski L., Kochura D., Krivorotov D., Podgornaya E., Burova O., Maazouzi C. Nutrient and metal pollution of the eastern Gulf of Finland coastline: Sediments, macroalgae, microbiota. *Science of The Total Environment*. 2016;550:806-819, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.122.
8. Golubkov S. M., Belyakov V. P., Golubkov M. S., Litvinchuk L. F., Petukhov V.A., Gubelit Y. I. Energy Flows and Phosphorus Turnover in the System of Shallow Reservoir under Anthropogenic Stress. *Ekologiya = Ecology*. 2019;(6):456-462, doi: 10.1134/S0367059719060052. (In Russ.).
9. Saccò M., White N. E., Harrod C., Salazar G., Aguilar P., Cubillos C. F., Meredith K., Baxter B. K., Oren A., Anufrieva E., Shadrin N., Marambio-Alfaro Y., Bravo-Naranjo V., Allentoft M. E. Salt to conserve: a review on the ecology and preservation of hypersaline ecosystems. *Biological Reviews*. 2021;96(6):2828-2850, <https://doi.org/10.1111/brv.12780>.
10. Oren A. Microbial life at high salt concentrations: phylogenetic and metabolic diversity. *Saline Systems*. 2008;4(2):1-13.
11. Khalilova E. A., Kotenko S. T., Islammagomedova E. A., Abakarova A. A., Chernyh N. A., Aliverdiyeva D. A. Halophilic bacteria of salt lakes and saline soils of the Peri-Caspian lowland (Republic of Dagestan) and their biotechnological potential. *Vavilovskii zhurn. genetiki i seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021;(25):224-233, doi: 10.18699/VJ21.026. (In Russ.).
12. Gorlenko V. M., Dubinina G. A., Kuznetsov S. I. *Ecology of aquatic microorganisms*. Moscow: Nauka Publ.; 1977. 288 p. (In Russ.).
13. Razumov V.A., Tyutyunova F.I. Nitrite pollution of the river Moscow: causes and consequences. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2001;(3):356-366. (In Russ.).
14. Eremina E. S., Sovga E. E., Stanichny S. V., Mikhailov V. A. Dynamics of the area of reed beds in the Sivash Bay (Sea of Azov) according to satellite data. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shelf'ovoi zony moray = Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*. 2020;(4):54-65. (In Russ.).
15. Kirikova T. A., Antonovsky A. G. Macrozoobenthos of the Eastern and Central Sivash as a food base for tundra waders during the migration period. *Sbornik trudov Zoologicheskogo muzeya = Collection of Works of the Zoological Museum*. 2010;(41):210-235. (In Russ.).
16. Netrusov A.I., ed. *Workshop on microbiology*. Moscow: Akademiya Publ.; 2005. 608 p. (In Russ.).
17. Baranov Z.I., Becescu M., Golikov A.N., comp. Mordukhai-Boltovsky F.D., ed. *Key to the fauna of the Black and Azov seas*. Kyiv: Naukova dumka Publ.; 1969. Ch. 2. 536 p. (In Russ.).
18. *WoRMS Editorial Board* (2021). World Register of Marine Species. Available from: <http://www.marinespecies.org/> [Accessed 1th February 2022].
19. Des Marais D. J. Biogeochemistry of Hypersaline Microbial Mats Illustrates the Dynamics of Modern Microbial Ecosystems and the Early Evolution of the Biosphere. *The Biological Bulletin*. 2003;204(2):160-167.
20. Zelenskaya O.V., Korolenko S.V. Dynamics of hydrological and hydrochemical parameters of the Azov Sea near the coast of the Kerch Peninsula and its influence on the state of hydrobionts. *Ekologicheskii vestnik Severnogo Kavkaza = The North Caucasus Ecological Herald*. 2021;17(1):74-81. (In Russ.).
21. Javor B. *Hypersaline Environments*. Springer-Verlag, 1989. 576 p.
22. Lavrentieva E.V., Banzaraksheva T.G., Erdyneeva E.B., Bidzhoyan A.M., Kabilov M.R. Halophilic bacteria are primary decomposers in the salt lake Gudzhirganskoe (Barguzinskaya valley, northern Baikal region). *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya, geografiya = Bulletin of the Buryat State University. Biology, geography*. 2018;(4):46-50, doi: 10.18101/2587-7143-2018-4-46-50. (In Russ.).
23. Shapovalova A.A., Khijniak T.V., Tourova T.P., Muyzer G., Sorokin D.Y. Heterotrophic denitrification at extremely high salt and pH by haloalkaliphilic Gammaproteobacteria from hypersaline soda lakes. *Extremophiles*. 2008;12:619-625, doi: 10.1007/s00792-008-0166-6.
24. Zavarzin G.A. The study of microbial diversity at S.N. Vinogradsky Institute Microbiology. *Mikrobiologiya = Microbiology*. 2004;73(5):598-612, doi: 10.1023/B:MICI.0000044242.93603.00. (In Russ.).

Информация об авторах

Ольга Викторовна Соловьёва – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.

Юлия Валерьевна Дорошенко – кандидат биологических наук, научный сотрудник.

Елена Андреевна Тихонова – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.

Наталья Витальевна Бурдиян – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.

Татьяна Вадимовна Витер – младший научный сотрудник.

Information about the authors

Olga V. Soloveva - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher.

Yuliya V. Doroshenko - Candidate of Science (Biology), Researcher.

Elena A. Tikhonova - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher.

Nataliya V. Burdiyan - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher.

Tatyana V. Viter - Junior Researcher.

Статья поступила в редакцию 31.05.2022; одобрена после рецензирования 27.06.2022; принята к публикации 30.08.2022.

The article was submitted 31.05.2022; approved after reviewing 27.06.2022; accepted for publication 30.08.2022.

Научная статья

УДК 56:551.41+564.1

doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-114-119

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД В ПАЛЕОРЕКОНСТРУКЦИЯХ ХАЗАРСКИХ ТРАНСГРЕССИЙ КАСПИЯ

Марина Владимировна Хлопкова¹, **Елена Владимировна Тулышева²**

¹ Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

² Институт геологии Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

¹ hlopkovam@mail.ru

² tulyshevae@mail.ru

Аннотация. Наряду с малакофаунистическим методом, являющимся основным для изучения главных палеособытий плейстоцена, на котором основана система диагностики трансгрессий, их корреляция на разных побережьях Каспия, в работе применялись геоморфологический и морфометрический методы. Малые реки очень чувствительны к небольшим и кратковременным изменениям уровня моря, что позволяет применять геоморфологический метод для палеорекопекции. Комплексный подход позволяет диагностировать ряд палеогеографических изменений: флуктуации уровня моря, прохождение холодных или теплых течений, проливов, изменение температуры морской воды. По изученному ископаемому комплексу можно получить сведения о параметрах среды обитания дидакн, при сравнении его с предыдущими и последующими можно судить о направлении палеогеографических событий. Чередование различных комплексов двустворок, применение морфометрических характеристик раковин моллюсков в качестве индикатора экологической обстановки в четвертичном периоде помогают подробно стратифицировать отложения. Об изменении температуры и солености палеокаспийских вод свидетельствует встречаемость в плейстоценовых отложениях представителей дидакн одной из трех групп (*catillus*, *crassa*, *trigonooides*). Нами проведены корреляции разрезов хазарских отложений дагестанского района.

Ключевые слова: двустворчатые моллюски, палеорекопекции, трансгрессии, Каспий, речные и морские террасы

Для цитирования: Хлопкова М.В., Тулышева Е.В. Комплексный подход в палеорекопекциях хазарских трансгрессий Каспия // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 3. С. 114–119.

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

Original article

AN INTEGRATED APPROACH TO THE PALEORECONSTRUCTIONS OF THE KHAZAR TRANSGRESSIONS OF THE CASPIAN SEA

Marina V. Khlopkova¹, **Elena V. Tulysheva²**

¹ Precaspian Institute of Biological Resources, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

² Institute of Geology, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

¹ hlopkovam@mail.ru

² tulyshevae@mail.ru

Abstract. Along with the malacofaunistic method, which is the main one for studying the paleo events of the Pleistocene, on which the system for diagnosing transgressions and their correlation on different coasts of the

Caspian Sea is based, geomorphological and allometric methods were used in the work. Small rivers are very sensitive to small and short-term changes in sea level, which makes it possible to apply the geomorphological method for paleoreconstruction. An integrated approach makes it possible to diagnose a number of paleogeographic changes: fluctuations in sea level, passage of cold or warm currents, straits, changes in sea water temperature. According to the studied fossil complex, it is possible to obtain information about the parameters of the habitat of didacn, when comparing it with previous and subsequent ones, it is possible to judge the direction of paleogeographic events. The alternation of different complexes of bivalves, the use of morphometric characteristics of mollusk shells as an indicator of the ecological situation in the Quaternary period help to stratify the deposits in detail. The change in temperature and salinity of Paleocaspian waters is evidenced by the occurrence in Pleistocene sediments of representatives of didacnas of one of three groups (catillus, crassa, trigonoides). We have correlated the sections of the Khazar deposits of the Dagestan region.

Key words: Bivalves, paleoreconstructions, transgressions, the Caspian Sea, river and sea terraces

For citation: Khlopkova M.V., Tulysheva E.V. An Integrated Approach to the Paleoreconstructions of the Khazar Transgressions of the Caspian Sea. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(3):114-119. (In Russ.).

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

Медленные поднятия передовых хребтов Кавказа в плейстоцене приводили к образованию абразионно-аккумулятивных морских террас при трансгрессиях у их подножий. Кроме четкой выраженности плейстоценовых террас в рельефе на дагестанском побережье Каспия, отмечена насыщенность этих отложений палеонтологическим материалом [1–5]. Целью исследований было использование комплексного подхода к воссозданию условий хазарского палеобассейна.

Методы исследований

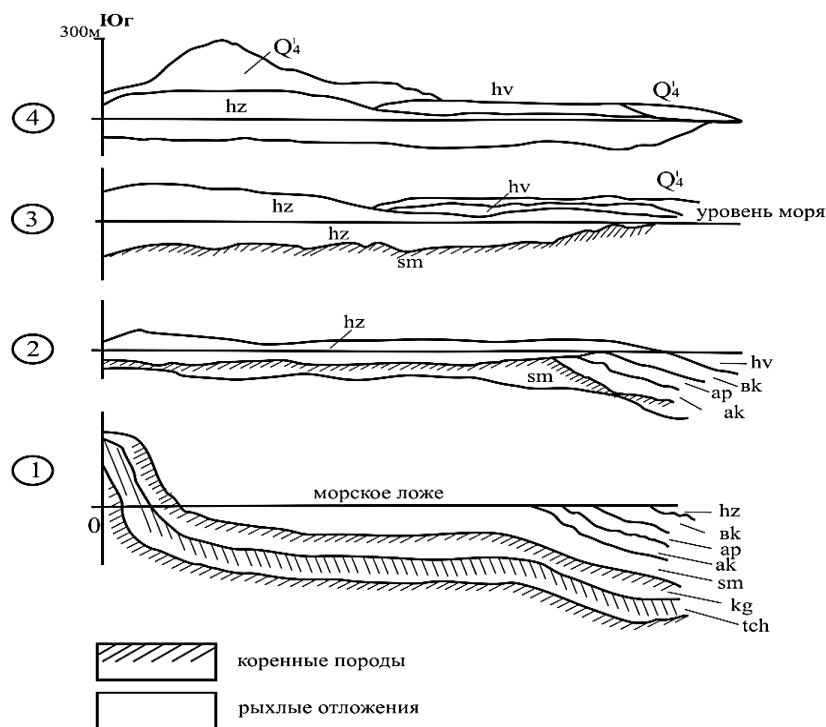
Материал собирался на разрезах хазарских отложений Дагестана в долинах рек Черкес-озень, Шура-озень, Манас-озень. Наиболее используемые малакофаунистические данные мы дополнили в работе геоморфологическим и морфометрическим методами. При исследовании дидакн (более 600 раковин) измерялись длина (Д), высота (В), выпуклость (вып.), годовые приросты (прир.), коэффициент прироста ($K_{пр}$), подсчитывались аллометрические коэффициенты удлинения ($K_{уд}$), выпуклости ($K_{вып}$), роста (k , год⁻¹) и средний возраст моллюсков ($T_{0,98}$) согласно пространственным методикам [3, 5, 6].

Результаты и обсуждение

Исследования долин рек, впадающих в море, помогли рассмотреть палеогеографические события Каспия в условиях колебания уровня под новым углом. Г.И. Рычаговым был разработан новый метод решения задач, связанных с малоамплитудными колебаниями уровня Каспия, основанный на детальном изучении строения приустьевых участков долин малых рек, впадающих в Каспий [1]. Особенностью малых рек является то, что их твердый сток небольшой, мощность современного аллювиального слоя незначительная. Такие реки очень чувствительны к небольшим и кратковременным изменениям уровня моря: при его понижении долины рек углубляются, при поднятии уровня – в их долинах происходит формирование ингрессионных террас, в строении которых принимают участие аллювиальные и морские отложения. Абсолютные высоты этих террас соответствуют абсолютной высоте моря во время трансгрессии.

Формирование долины реки Шура-озень на приморской низменности происходило в условиях опускания. Река прорезала коренные породы, врезалась в сарматские глины и по ним на приморской низменности переносила аллювиальные отложения, отлагая их в устьевой части, образуя акчагыльские, апшеронские, бакинские толщи (рис. 1.1). На современном побережье Каспия обнажаются сарматские известняки-ракушечники. В период подъема морского уровня (хазарская трансгрессия) формировалась морская толща, составляющая хазарскую террасу (рис. 1.2, рис. 2). В этот период море подходило к склону Нарат-Тюбинского хребта, что способствовало образованию устья реки, впадающей в хазарское море [7]. Затем происходил спад морских вод

(рис. 1.3). Хазарские отложения выходят из-под их уровня, образуя поверхность хазарской морской террасы. Отложения представлены в виде хорошо выровненных террас – высотой до 3–5 м, сложенных тонкодисперсным материалом песчано-илисто-суглинистого состава. Такая же картина отмечается в устьевой части долины р. Черкес-озень, но там мощность хазарских отложений значительно сокращается до 1–2 м. В последующий период в результате морских трансгрессий-регрессий формируются террасы хвалынской, новокаспийской. В голоцене в результате сложившихся геолого-геоморфологических, климатических условий (аридность, ветровой режим), эоловых процессов, при участии фумарольно-гейзерной деятельности голоценового вулканизма [8] формируется крупнейшая дюна Евроазиатского континента – Сарыкум (рис. 1.4).



Условные обозначения:

tch – чокрак; kg – караган; sm – сармат; ak – акчагыл; ap – апшерон; vk – бакинский ярус;
 hz – хазарские отложения; hv – хвалынские отложения; Q¹₄ – новокаспийские отложения, дюна Сарыкум

Рис. 1. Схема трансгрессивного развития побережья Каспия (долина реки Шура-озень)
 / Fig. 1. Scheme of transgressive development of the Caspian littoral (valley of the Shura-Ozen river)

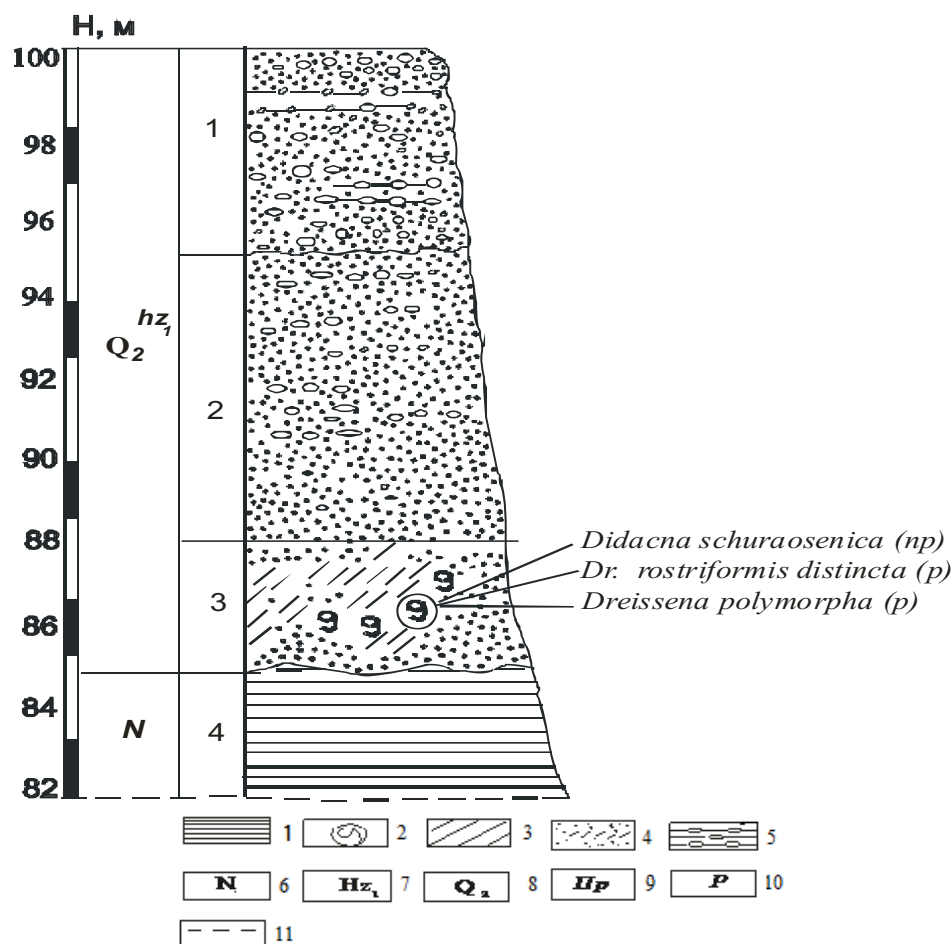
В устьевой части долины р. Шура-озень хазарские отложения, что подтверждено находками хазарской фауны (рис. 2), залегают на контакте рыхлых морских отложений и коренных глинистых пород верхнего сармата, с угловым несогласием, что показывает отсутствие здесь бакинских отложений. Существенным различием между орогенными и низменными террасами является то, что формирование первых происходит в коренных породах (глинистые сланцы, известняки), а террасы прикаспийской низменности образуются в рыхлых морских отложениях (песчаники, галечники). В разрезе устья р. Шура-озень доминируют морские отложения с незначительной примесью речных аллювиальных отложений. В период подъема морского уровня (хазарская трансгрессия) формируется морская толща преимущественно песчаного состава, составляющая хазарскую террасу.

На побережье Дагестана абразионно-аккумулятивные террасы с отметками 80–85, 100–105, 120–130 м абсолютной высоты содержат раковины крассоидных дидакн. Биостратиграфический анализ дидакн указывает на возможность выделения трех стадий раннего хазара и двух стадий трансгрессии позднего хазара.

Исследования конхилиофауны раннехазарской трансгрессии (H_{z1}) показали, что в поздних слоях наблюдался расцвет тригоноидной группы дидакн с крупными, высокими раковинами. Преобладает *D. paleotrigonoides* с ежегодными приростами 3,5 мм до половой зрелости и коэф-

фициентом прироста 0,11 после половой зрелости (таблица). Большие приросты и крупные размеры раковин свидетельствуют об оптимальных для этой группы дидакн условиях, теплом водоеме, хорошей аэрации и солености воды около 10 ‰, что подтверждается также исследованиями ряда авторов [1–6].

В отложениях позднехазарской трансгрессии (Hz₂) преобладают крассоидные дидакны *D. surachanica*, с массивными толстыми раковинами, средний возраст 14 лет (сейчас дидакны живут до 7–8 лет), ежегодные приросты у молодых – 2,9 мм, у взрослых коэффициент прироста – 0,12, что говорит о повышенной температуре и солености (15–17 ‰) водоема, аридизации климата, ксерофитизации растительности, что подтверждается данными спорово-пыльцевого метода анализа [8–10].



Литология и стратиграфия: 1 – глина; 2 – местоположение раковин моллюсков; 3 – суглинок; 4 – переслаивание супеси и песка; 5 – конгломераты; 6 – плиоцен; 7 – нижнехазарские отложения; 8 – средний плейстоцен; относительное количество раковин вида в слое: 9 – преобладают; 10 – редкие; 11 – нечеткие границы

Рис. 2. Разрез хазарских отложений в долине реки Шура-озень
 / Fig. 2. Section of Khazar deposits in Shura-ozen river valley

Наши исследования по фаунистическому анализу (таблица) подтверждаются биогеографическими, минералогическими данными, спорово-пыльцевым методом анализа ряда исследователей [1–4, 9]. Полученные данные по вариабельности температуры и солености в изученном периоде, на основании исследования изменения видового состава, морфологических и аллометрических характеристик раковин разных видов, хорошо согласуются с палинологическими данными Т.А. Абрамовой [9], указывающими, что в разрезе по реке Шура-озень в начале верхнехазарского времени намечился переход от лесной к травянистой ксерофитизированной растительности. Позднее, к концу верхнехазарской трансгрессии, произошла резкая аридизация климата и началось повсеместное развитие растительного покрова пустынно-степного типа. В раннехазарской

трансгрессии (Hz₁) существовала продолжительная трансгрессивная стадия (рис. 2, таблица). Отмечается выраженное изменение соотношения пыльцы травянистых и древесных пород, проходящее по границе верхнехазарских отложений, – это свидетельство воздействия разных климатических условий в период формирования различных уровней террас. Спорово-пыльцевые спектры из осадков, образующих террасу 80–85 м, состав и морфология конхилиофауны говорят о формировании осадков в морском бассейне при теплой воде в межледниковом периоде [1, 4, 9].

Палеорекострукция хазарских трансгрессий Каспия на основе малакологического и морфологического анализа / Paleoreconstruction of the Khazar transgressions the Caspian Sea based on malacological and morphological analyses

Эпоха	Плейстоцен Q				
	Раннехазарская трансгрессия Hz ₁			Позднехазарская Hz ₂	
Абс. возраст, тыс. лет	250(ур.и.) 144			91–130	
Слои, высота, м	Ранние 140–150	Средние 125–130	Поздние 100–105	Ранние 80–85	Поздние до 50
Фауна, доминирующая в осадках	<i>D. subpyramidata</i>	<i>D. schuraosenica</i>	<i>D. paleotrigonoides</i>	<i>D. nalivkini</i>	<i>D. surachanica</i>
Ежегодные приросты 1-й стадии роста, мм	1,9	2,2	3,5	2,6	2,9
*Аллометрические параметры на 2-й стадии роста					
K _{пр}	0,07	0,10	0,11	0,11	0,12
K _{уд}	0,88	0,78	0,86	0,80	0,79
K _{вып}	0,48	0,37	0,39	0,42	0,40
k, год ⁻¹	0,34	0,21	0,36	0,34	0,21
T _{0,98}	9	14	8	9	14
Руководящая группа дидакн	Trigonoides	Crassa	Trigonoides	Crassa	Crassa
Соленость воды S, ‰	5–8	12–14	10	15–16	15–17
Климат, флора	Мезофильная	Лесостепная	Прохладный, засушливый	Теплый, влажные леса	Аридизация, ксерофитизация

Примечание. K_{пр} – коэффициент прироста; K_{уд} – коэффициент удлинения; K_{вып} – коэффициент выпуклости; k, год⁻¹ – коэффициент роста; T_{0,98} – средний возраст моллюска.

Заключение

В разрезах морских отложений состав конхилиофауны меняется в зависимости от экологических условий, что дает возможность использовать их для периодизации отложений и смены разнофациальных комплексов.

Наши выводы по основным палеособытиям в хазарских трансгрессиях, сделанные на основании исследования видового состава малакофауны, геоморфологических и биостратиграфических исследований разрезов долин рек, в которых были обнаружены раковины моллюсков, хорошо согласуются с палинологическими данными. Климат изменялся от влажного к сухому, следовательно, в начале трансгрессии полноводные реки вносили в море большое количество минеральных веществ, а к концу трансгрессий с повышением температуры увеличивалась испаряемость и, соответственно, происходил рост солености и концентрации минеральных веществ, что отражается в общем габитусе раковин дидакн и подтверждается аллометрическими и морфологическими характеристиками.

Список источников

1. Рычагов Г.И. К методике геоморфологических исследований (геоморфологические уроки Каспия) // Геоморфология. 2019. № 4. С. 27–39.
2. Тулышева Е.В., Хлопкова М.В., Мацапулин В.У. Соотношение речных и морских отложений в прибрежной равнине Дагестана // Тр. Ин-та геологии Дагестанского науч. центра РАН. 2013. № 62. С. 158–161.

3. Yanina T.A. Ponto-Caspian and Mediterranean basins under conditions of the last glacial epoch // *Limnology and Freshwater Biology*. 2020. № 4. P. 536–537. Doi: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-536.
4. Svitoch A.A., Markova A.K., Yanina T.A. Stratigraphy and the small mammal fauna of the Late Pleistocene sections in the south of the middle reaches of the Volga River // *Quaternary Int.* 2020. № 540. P. 1–15.
5. Рычагов Г.И., Янина Т.А. К вопросу о хазарских террасах Дагестана // *Геология и полезные ископаемые Кавказа*. 2011. № 57. С. 98–100.
6. Абдурахманов Г.М., Хлопкова М.В. Реконструкция среды обитания в плейстоцене на основе фаунистического и морфометрического анализов дидакн как составляющая в исследовании уровня Каспия // *Юг России. Экология, развитие*. 2007. № 3. С. 32–39.
7. Тулышева Е.В. К дискуссии о природе орографического парадокса осевой зоны Восточного Кавказа // *Геоморфология*. 1996. № 4. С. 19–24.
8. Matsapulin V.U., Tulysheva E.V., Khlopkova M.V. Geological Conditions of Sandy Sarykum Barkhan Formation and Geochemical Features of its Carbonate Deposits // *Arid Ecosystems*. 2013. Vol. 3, № 1. P. 10–15.
9. Абрамова Т.А. Методические вопросы палинологического изучения четвертичных отложений Западного Прикаспия и дна Каспийского моря // *Комплексные исследования Каспийского моря*. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1976. Вып. 5. С. 87–98.
10. Хлопкова М.В., Гасанова А.Ш., Гусейнов К.М. Конхилиофауна хазарских комплексов дагестанского побережья Каспия // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2022. № 1. С. 89–94.

References

1. Rychagov G.I. To the methodology of geomorphological research (geomorphological lessons of the Caspian Sea). *Geomorfologiya = Geomorphology*. 2019;(4):27-39. (In Russ.).
2. Tulysheva E.V., Khlopkova M.V., Matsapulin V.U. The ratio of river and marine sediments in the coastal plain of Dagestan. *Tr. In-ta geologii Dagestanskogo nauch. tsentra RAN = Proceedings of the Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013;(62):158-161. (In Russ.).
3. Yanina T. A. Ponto-Caspian and Mediterranean basins under conditions of the last glacial epoch. *Limnology and Freshwater Biology*. 2020;(4):536-537, doi: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-536.
4. Svitoch A.A., Markova A.K., Yanina T. A. Stratigraphy and the small mammal fauna of the Late Pleistocene sections in the south of the middle reaches of the Volga River. *Quaternary International*. 2020;(540):1-15.
5. Rychagov G.I., Yanina T.A. On the question of the Khazar terraces of Dagestan. *Geologiya i poleznye iskopaemye Kavkaza = Geology and minerals of the Caucasus*. 2011;(57):98-100. (In Russ.).
6. Abdurakhmanov G. M., Khlopkova M. V. Reconstruction of the habitat in the Pleistocene on the basis of faunal and morphometric analyses of didacn, as a component in the study of the Caspian Sea level. *Yug Rossii. Ekologiya, razvitiye = South of Russia. Ecology, Development*. 2007;(3):32-39. (In Russ.).
7. Tulysheva E.V. On the discussion of the nature of the orohydrographic paradox of the axial zone of the Eastern Caucasus. *Geomorfologiya = Geomorphology*. 1996;(4):19-24. (In Russ.).
8. Matsapulin V.U., Tulysheva E.V., Khlopkova M.V. Geological Conditions of Sandy Sarykum Barkhan Formation and Geochemical Features of its Carbonate Deposits. *Arid Ecosystems*. 2013;3(1):10-15.
9. Abramova T.A. Methodological issues of palynological study of quaternary deposits of the Western Caspian Sea and the bottom of the Caspian Sea. *Complex studies of the Caspian Sea*. Moscow: Moscow University Press; 1976;(5):87-98. (In Russ.).
10. Khlopkova M.V., Gasanova A.Sh., Guseynov K.M. Conchyliofauna of Khazar Complexes of the Dagestan Coast of the Caspian Sea. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2022;(1):89-94. (In Russ.).

Информация об авторах

М.В. Хлопкова – кандидат биологических наук, научный сотрудник, лаборатория морской биологии.
Е.В. Тулышева – кандидат географических наук, доцент, старший научный сотрудник, лаборатория региональной геологии и минерального сырья.

Information about the authors

M.V. Khlopkova - Candidate of Science (Biology), Researcher, Marine Biology Laboratory.
E.V. Tulysheva - Candidate of Science (Geography), Associate Professor, Senior Researcher, Laboratory of Regional Geology and Mineral Raw Materials.

Статья поступила в редакцию 13.05.2022; одобрена после рецензирования 23.06.2022; принята к публикации 30.08.2022.
The article was submitted 13.05.2022; approved after reviewing 23.06.2022; accepted for publication 30.08.2022.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

BIOLOGICAL SCIENCES

Научная статья

УДК 631.46;57.044

doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-120-128

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТОКСИЧНОСТИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ЧИСЛЕННОСТИ БАКТЕРИЙ В СЕРОПЕСКАХ

**Н.А. Евстегнеева¹, С.И. Колесников², Т.В. Минникова^{3✉}, А.Н. Тимошенко⁴, Н.И. Цепина⁵,
К.Ш. Казеев⁶**

1, 2, 3, 4, 5, 6 Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ natalja.evstegneewa@yandex.ru

² kolesnikov1970@list.ru

³ loko261008@yandex.ru✉

⁴ aly9215@mail.ru

⁵ cepinanatalia@yandex.ru

⁶ kazeev@sfedu.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований оценки экотоксичности 28 тяжелых металлов, металлоидов и неметаллов по степени влияния на общую численность бактерий в серопесках. Загрязнение почвы моделировали в лабораторных условиях. Тяжелые металлы и металлоиды вносили в форме оксидов в концентрациях 10 и 100 мг элемента на 1 кг почвы. Общую численность бактерий определяли методом прямой люминесцентной микроскопии. По снижению численности бактерий в серопесках при внесении 10 мг/кг почвы исследованные химические элементы образуют следующую последовательность: $Te > Se > Ag > Cr > Ge > Hg > Bi > Yb > Tl > Sn > Ni = Cd > W = Cu = Sc > Sb > Nb = Co > Y > B = Ga > Sr > Pb > V > Mo > Zn > F > Mn$. Ряд токсичности тяжелых металлов, металлоидов и неметаллов для серопесков при внесении элементов в концентрации 100 мг/кг почвы выглядит следующим образом: $Ag > Cr > Hg > Se > Te > Ge > Bi > Yb = Tl > W > Sn = Cd > Cu = Sc > Sb = Ni > Co > B > Nb > Y > Sr = Ga > V > Zn > Mo > Pb > F > Mn$. Наибольшую токсичность по отношению к общей численности почвенных бактерий в серопесках проявили Ag, Cr, Hg, Se и Te.

Ключевые слова: почва, тяжелые металлы, металлоиды, неметаллы, химическое загрязнение, биостирование, биологическая активность

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-24-01041 в Южном федеральном университете.

Для цитирования: Евстегнеева Н.А., Колесников С.И., Минникова Т.В., Тимошенко А.Н., Цепина Н.И., Казеев К.Ш. Сравнительная оценка токсичности химических элементов по численности бактерий в серопесках // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 3. С. 120–128.

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

Original article

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE TOXICITY OF CHEMICAL ELEMENTS BY THE NUMBER OF BACTERIA IN SIEROSANDS

*N.A. Evstegneeva*¹, *S.I. Kolesnikov*², *T.V. Minnikova*^{3✉}, *A.N. Timoshenko*⁴, *N.I. Tsepina*⁵,
*K.Sh. Kazeev*⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

¹ natalja.evstegneewa@yandex.ru

² kolesnikov1970@list.ru

³ loko261008@yandex.ru✉

⁴ aly9215@mail.ru

⁵ cepinanatalia@yandex.ru

⁶ kazeev@sfnedu.ru

Abstract. The results of studies on the assessment of the ecotoxicity of 28 heavy metals, metalloids and non-metals by the degree of influence on the total number of bacteria in sulfur sands are presented. Soil pollution was modeled in laboratory conditions. Heavy metals and metalloids were introduced in the form of oxides at concentrations of 10 and 100 mg of the element per 1 kg of soil. The total number of bacteria was determined by direct luminescence microscopy. According to the decrease in the number of bacteria in sulfur sands with the addition of 10 mg/kg of soil, the studied chemical elements form the following sequence: $Te > Se > Ag > Cr > Ge > Hg > Bi > Yb > Tl > Sn > Ni = Cd > W = Cu = Sc > Sb > Nb = Co > Y > B = Ga > Sr > Pb > V > Mo > Zn > F > Mn$. The toxicity series of heavy metals, metalloids and non-metals for sulfur sands when elements are introduced at a concentration of 100 mg/kg of soil is as follows: $Ag > Cr > Hg > Se > Te > Ge > Bi > Yb = Tl > W > Sn = Cd > Cu = Sc > Sb = Ni > Co > B > Nb > Y > Sr = Ga > V > Zn > Mo > Pb > F > Mn$. Ag, Cr, Hg, Se, and Te showed the highest toxicity in relation to the total number of soil bacteria in sierosands.

Keywords: soils, heavy metals, metalloids, non-metals, chemical pollution, biotesting, biological activity

Acknowledgments: the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 22-24-01041 at the Southern Federal University.

For citation: Evstegneeva N.A., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Timoshenko A.N., Tsepina N.I., Kazeev K.Sh. Comparative Assessment of the Toxicity of Chemical Elements by the Number of Bacteria in Sierosands. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2022;(3):120-128. (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

Почвы в последнее время все сильнее подвергаются антропогенной нагрузке и загрязнению. Большой вклад в загрязнение вносят тяжелые металлы, металлоиды, а также некоторые неметаллы [1–3]. Они сохраняются в почве в течение многих лет, так как практически не подвергаются биологическому и химическому разложению, и оказывают постоянное негативное воздействие на почвенную экосистему [4, 5].

Человек контактирует с почвой обычно опосредованно, через сельскохозяйственную продукцию. В связи с этим считается, что опасность тяжелых металлов, металлоидов и неметаллов в почве необходимо оценивать на основе экотоксикологического принципа, сравнивая действие разных токсикантов на биоту и растения [6]. К тому же в предыдущих исследованиях удалось установить, что тяжелые металлы и металлоиды по влиянию на состояние почвы не совпадают с классами опасности, используемыми в настоящий момент для мониторинга и нормирования почвенного покрова в России [7–9].

Экологическое состояние почвы целесообразно определять по ее биологическим и биохимическим свойствам, которые считаются индикаторами качества и здоровья почвы [10]. Существенным преимуществом биологических показателей является их быстрый ответ на антропогенное загрязнение [11, 12].

Численность микроорганизмов – важнейший объективный и доступный экологический индикатор состояния почвенного биоценоза [13]. Жизнедеятельность почвенных микроорганизмов является диагностическим показателем изменения состояния почв в результате воздействия разных антропогенных факторов, и в том числе дает понять, как изменяются состав и численность почвенного микробиоценоза под влиянием различных химических элементов. Многие исследования показывают, что загрязнение тяжелыми металлами уменьшает разнообразие почвенных микроорганизмов [14, 15]. Тяжелые металлы токсичны почти для всех бактерий. Они влияют на рост, морфологию и метаболизм и подавляют важные клеточные функции, такие как синтез белка и целостность клеточных мембран. Например, повышенная концентрация тяжелых металлов отрицательно сказывается на общей популяции бактерий и актиномицетов, а также на ферментативной активности почвенных экосистем [16]. Загрязнение почвы тяжелыми металлами приводит к сокращению количества *Bacillus* spp., *Clostridium* spp. Длительное загрязнение Cd, Pb, Zn и Hg оказывает негативный эффект на рост *Ralstonia*, *Gemmatimonas*, *Rhodanobacter* и *Mizugakiibacter* [17, 18].

Цель исследования – сравнительная оценка экотоксичности химических элементов по степени влияния на численность бактерий в серопесках.

Объект и методы исследования

Объект исследования – серопески. По классификации World Reference Base for Soil Resources (WRB) [19] серопески – это *Naptic Arenosols Eutric*. Уникальные песчаные почвы Ростовской области (тоже серопески) относят к самостоятельному типу почв вне зональности почвообразования [20]. Для серопесков характерен легкий гранулометрический состав, из-за чего токсичность поллютантов в этой почве проявляется более ярко, чем у почв с тяжелым гранулометрическим составом [21].

Образцы почвы отбирали на южном въезде в станицу Верхнекундрюченскую, Усть-Донецкий район, Ростовская область. Место отбора: разнотравно-злаковая степь. Для модельного эксперимента почву отбирали из верхнего горизонта (0–10 см). Загрязнение моделировали в лабораторных условиях в течение 10 сут. При оценке химического воздействия на почву этот срок является наиболее информативным [22]. Инкубацию проводили при комнатной температуре 20–22 °C и с поддержанием влажности почвы на уровне 40 % от полевой влагоемкости. Контролем служила незагрязненная почва.

Исследовали загрязнение 28 химическими элементами (тяжелые металлы, металлоиды и неметаллы): Ag₂O, B₂O₃, Bi₂O₃, CdO, CoO, Cr₂O₃, CuO, Ga₂O₃, Ge₂O₃, HgO, MnO₂, MoO₃, NbO₂, Ni₂O₃, PbO, Sb₂O₅, Sc₂O₃, SeO₂, SnO, SrO, TeO₂, Tl₂O₃, V₂O₅, WO₂, Y₂O₃, Yb₂O₃, ZnO. Для загрязнения использовали оксиды элементов, так как загрязнение почвы тяжелыми металлами и металлоидами обычно происходит в форме оксидов [23], а также для исключения токсического воздействия на биологические показатели почвы сопутствующих анионов, как это бывает при внесении растворимых солей химическими элементами [24]. Исключение представлял фтор, вносимый в форме фторида натрия – NaF, так как эта форма чаще всего присутствует в загрязненной среде [25].

Для сравнения экотоксичности тяжелых металлов, металлоидов и неметаллов между собой были взяты одинаковые дозы для всех элементов – 10 и 100 мг на 1 кг почвы. Использовали такие концентрации, так как из-за разных фоновых концентраций на меньших дозах (менее 10 мг элемента на 1 кг почвы) большинство исследуемых химических элементов не проявили бы токсичность (например, марганец), а на больших – слишком высокую (например, кадмий).

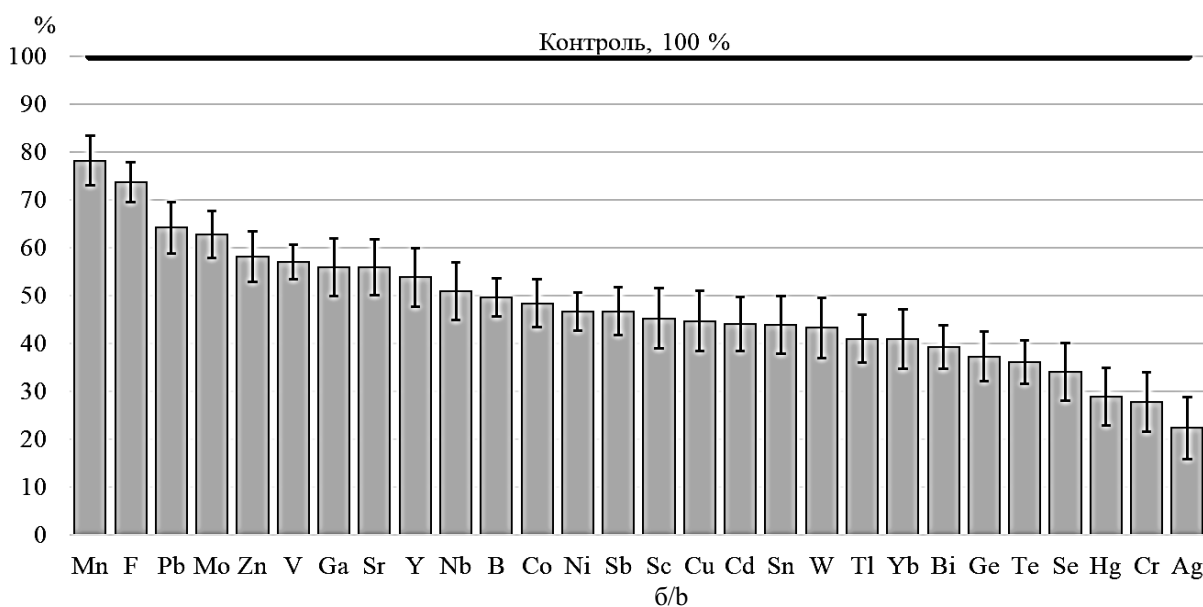
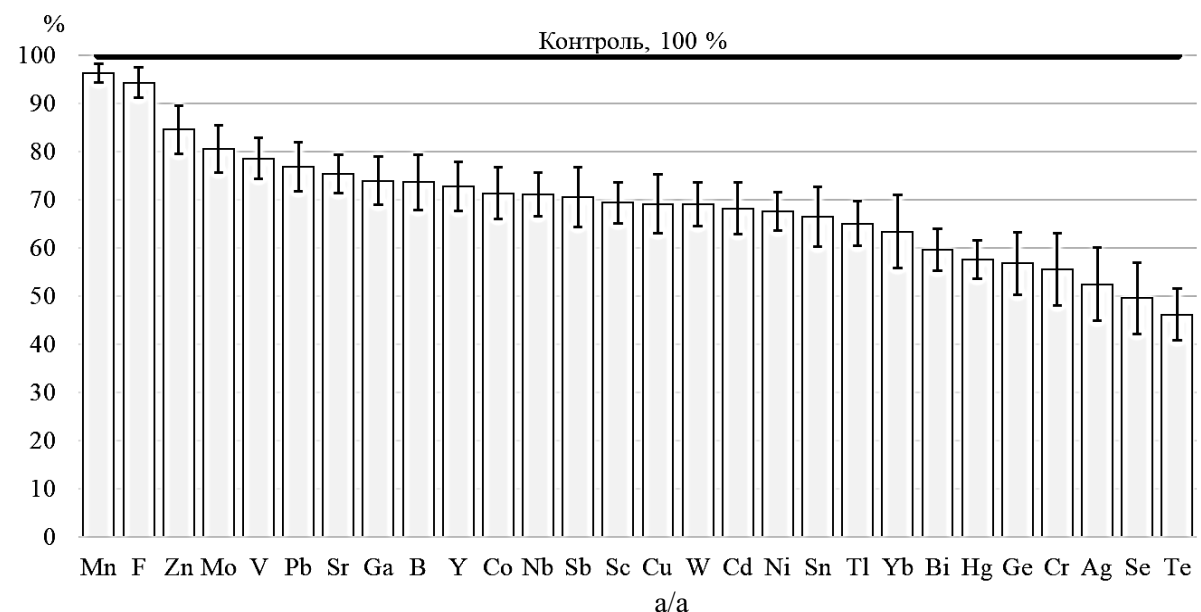
Общую численность бактерий определяли точным и легковыполняемым методом прямой люминесцентной микроскопии в падающем свете. Метод модифицирован Д.Г. Звягинцевым и П.А. Кожевиным [26–28]. Определение численности бактерий основано на оптическом исследовании бактерий, окрашенных акридиновым оранжевым. При использовании данного метода достигается точный подсчет количества бактерий в почве. Микроскопирование осуществляли на микроскопе HBO 100 Microscope Illuminating System (Zeiss).

Результаты анализа численности почвенных бактерий подвергали статистической обработке: вариационному и дисперсионному анализу. Статистическая обработка данных проводилась с использованием программы Statistica 12.0.

Результаты и обсуждение

Загрязнение серопесков тяжелыми металлами, металлоидами и неметаллами привело к снижению численности почвенных бактерий во всех вариантах опыта. Степень снижения показателя находится в прямой зависимости от количества загрязняющего вещества.

Ранжирование химических элементов по степени снижения численности почвенных бактерий показано на рисунке.



Изменение общей численности бактерий в серопесках при загрязнении химическими элементами в концентрации: а – 10 мг/кг почвы, % от контроля; б – 100 мг/кг почвы, % от контроля
 / Change in number of soil bacteria induced in sierosands by pollution by chemical elements in concentration: a - 10 mg/kg soils, % of control; b - 100 mg/kg soils, % of control

Ряд токсичности тяжелых металлов, металлоидов и неметаллов при внесении элементов в размере 10 мг/кг почвы выглядит следующим образом: $Te > Se > Ag > Cr > Ge > Hg > Bi > Yb > Tl > Sn > Ni = Cd > W = Cu = Sc > Sb > Nb = Co > Y > B = Ga > Sr > Pb > V > Mo > Zn > F > Mn$.

При внесении 10 мг химических элементов на 1 кг почвы наибольший негативный эффект на численность бактерий оказали *Te*, *Se* и *Ag* – на 48–54 % ниже контроля. Наиболее устойчивыми по численности бактерий оказались *Mn* (на 4 % ниже контроля) и *F* (на 6 % ниже контроля).

При повышении дозы загрязняющих веществ до 100 мг/кг почвы численность бактерий снижалась сильнее, чем при внесении 10 мг.

Ряд токсичности тяжелых металлов, металлоидов и неметаллов при внесении элементов в размере 100 мг/кг почвы: $Ag > Cr > Hg > Se > Te > Ge > Bi > Yb = Tl > W > Sn = Cd > Cu = Sc > Sb = Ni > Co > B > Nb > Y > Sr = Ga > V > Zn > Mo > Pb > F > Mn$.

Наибольшую токсичность проявили *Ag*, *Cr* и *Hg*. Численность бактерий снизилась на 71–78 % по сравнению с незагрязненной почвой. Наиболее устойчивыми по численности бактерий оказались марганец и фтор. При внесении 100 мг/кг почвы эти элементы снизили численность почвенных микроорганизмов на 22–24 % относительно контроля. Наименьшую токсичность, как и при внесении 10 мг/кг, проявили *Mn* и *F* (на 21–26 % ниже контроля соответственно).

Таким образом, к наиболее токсичным химическим элементам по степени снижения численности почвенных бактерий можно отнести *Ag*, *Cr*, *Hg*, *Se* и *Te*. Эти элементы относятся к разным химическим группам: тяжелые металлы (*Ag*, *Cr*), металлоиды (*Te*) и неметаллы (*Se*).

Хром, являясь окислительно-восстановительным металлом, легко переходит из одной степени окисления (III) в другую (VI), более токсичную [29]. Хром (III) является высокотоксичным, биодоступным и канцерогенным для всех живых организмов [30].

Токсичность *Ag* доказана предыдущими исследованиями [31]. Серебро, связываясь с белками, способно ингибировать ферменты и снижать проницаемость биологических мембран [32].

Причины негативного влияния *Te* на биологические свойства почв, также как и *Se*, выражаются в угнетении почвенных ферментов и снижении проницаемости биологических мембран с последующим нарушением обмена веществ [33].

Похожие ряды были получены ранее при изучении биологических и биохимических показателей чернозема обыкновенного тяжелосуглинистого [34–37].

Используемая для оценки плодородия и мониторинга экологической безопасности почв нормативная база требует доработки. Необходима дальнейшая работа по изучению влияния действия тяжелых металлов, металлоидов и неметаллов на эколого-биологические показатели состояния почв, так как критерии оценки почв должны учитывать научно обоснованный безопасный уровень концентрации химических элементов [38].

Заключение

Численность почвенных бактерий в серопесках снижается при внесении в почву 10 и 100 мг тяжелых металлов, металлоидов и неметаллов. Сравнительная оценка экотоксичности 28 тяжелых металлов, металлоидов и неметаллов позволила установить, что по степени снижения численности бактерий в серопесках при внесении 10 мг/кг почвы исследованные элементы располагаются следующим образом: $Te > Se > Ag > Cr > Ge > Hg > Bi > Yb > Tl > Sn > Ni = Cd > W = Cu = Sc > Sb > Nb = Co > Y > B = Ga > Sr > Pb > V > Mo > Zn > F > Mn$. Ряд токсичности тяжелых металлов, металлоидов и неметаллов для серопесков при внесении элементов в концентрации 100 мг/кг почвы выглядит следующим образом: $Ag > Cr > Hg > Se > Te > Ge > Bi > Yb = Tl > W > Sn = Cd > Cu = Sc > Sb = Ni > Co > B > Nb > Y > Sr = Ga > V > Zn > Mo > Pb > F > Mn$. К наиболее токсичным химическим элементам, влияющим на численность почвенных бактерий, относятся *Cr*, *Hg*, *Se* и *Te*. Необходимы дальнейшие исследования влияния действия химических элементов на эколого-биологические показатели состояния почв.

Список источников

1. *Adimalla N.* Heavy metals contamination in urban surface soils of Medak province, India, and its risk assessment and spatial distribution // *Environmental Geochemistry and Health*. 2020. Vol. 42, № 1. P. 59–75. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00270-1>.

2. Sun L., Guo D., Liu K., Meng H., Zheng Y., Yuan F., Zhu G. Levels, sources, and spatial distribution of heavy metals in soils from a typical coal industrial city of Tangshan, China // *Catena*. 2019. Vol. 175. P. 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.014>.
3. Mishra S., Bharagava R.N., More N., Yadav A., Zainith S., Man S., Chowdhary P. Heavy metal contamination: an alarming threat to environment and human health // *Environmental biotechnology: For sustainable future*. Singapore: Springer, 2019. P. 103–125. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7284-0_5.
4. Joseph L., Jun B.M., Flora J.R., Park C.M., Yoon Y. Removal of heavy metals from water sources in the developing world using low-cost materials: A review // *Chemosphere*. 2019. Vol. 229. P. 142–159. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.198>.
5. Rinklebe J., Antoniadis V., Shaheen S.M., Rosche O., Altermann M. Health risk assessment of potentially toxic elements in soils along the Central Elbe River, Germany // *Environment International*. 2019. Vol. 126. P. 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.011>.
6. Водяницкий Ю. Н. Об опасных тяжелых металлах/металлоидах в почвах // Бюл. Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2011. № 68. С. 56–82. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2011-68-56-82>.
7. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F., Ponomareva S.V. Ranking of Chemical Elements According to Their Ecological Hazard for Soil // *Russian Agricultural Sciences*. 2010. Vol. 36, № 1. P. 32–34. <https://doi.org/10.3103/S1068367410010106>.
8. Vodyanitskii Y.N. Standards for the contents of heavy metals and metalloids in soils // *Eurasian Soil Science*. 2012. Vol. 45, № 3. P. 321–328. <https://doi.org/10.1134/S1064229312030131>.
9. Xiong T., Zhang T., Dumat C., Sobanska S., Dappe V., Shahid M., Xian Y., Li X., Li S. Airborne foliar transfer of particular metals in *Lactuca sativa* L.: translocation, phytotoxicity, and bioaccessibility // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26, № 20. P. 20064–20078. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3084-x>.
10. Nunes M.R., Karlen D.L., Veum K.S., Moorman T.B., Cambardella C.A. Biological soil health indicators respond to tillage intensity: A US meta-analysis // *Geoderma*. 2020. Vol. 369. P. 114335. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114335>.
11. Романов В.Н., Заушищана А.В., Кожевников Н.В. Применение показателей активности ферментов для оперативной диагностики экологического состояния агрогенных почв // *Достижения науки и техники АПК*. 2019. Т. 33, № 7. С. 44–47. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10711>.
12. Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019. Vol. 191, № 9. P. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7718-3>.
13. Song B., Zhang C., Zeng G., Gong J., Chang Y., Jiang Y. Antibacterial properties and mechanism of graphene oxide-silver nanocomposites as bactericidal agents for water disinfection // *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 2016. Vol. 604. P. 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2016.04.018>.
14. Feng G., Xie T., Wang X., Bai J., Tang L., Zhao H., Zhao Y. Metagenomic analysis of microbial community and function involved in cd-contaminated soil // *BMC Microbiology*. 2018. Vol. 18, № 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.1186/s12866-018-1152-5>.
15. Wu B., Hou S., Peng D., Wang Y., Wang C., Xu F., Xu H. Response of soil micro-ecology to different levels of cadmium in alkaline soil // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018. Vol. 166. P. 116–122. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.09.076>.
16. Гусева Т.М. Использование микробных ценозов с участием *Bacillus* spp. и *Clostridium* spp. для оценки загрязнения почвы тяжелыми металлами // *Вестн. современных исследований*. 2017. № 9-1(12). P. 19–23.
17. Guo H., Nasir M., Lv J., Dai Y., Gao J. Understanding the variation of microbial community in heavy metals contaminated soil using high throughput sequencing // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2017. Vol. 144. P. 300–306. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.048>.
18. Lin Y., Ye Y., Hu Y., Shi H. The variation in microbial community structure under different heavy metal contamination levels in paddy soils // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019. Vol. 180. P. 557–564. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.057>.
19. IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106.
20. Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Почвы Юга России. Ростов н/Д.: Эверест, 2008. 276 с.
21. 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. <https://doi.org/10.1155/2020/1207210>. URL: <https://hindawi.com/journals/aess/2020/1207210/> (дата обращения: 24.06.2022).
22. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Экологическое состояние и функции почв в условиях химического загрязнения. Ростов н/Д.: Ростиздат, 2006. 385 с.

23. Dutta S., Datta A., Zaid A., Bhat J. A. Metalloids and Their Impact on the Environment // *Metalloids in Plants: Advances and Future Prospects*. 2020. P. 19–26. <https://doi.org/10.1002/9781119487210.ch2>.
24. Kolesnikov S.I., Yaroslavtsev M.V., Spivakova N.A., Kazeev K.S. Comparative assessment of the biological tolerance of chernozems in the south of Russia towards contamination with Cr, Cu, Ni, and Pb in a model experiment // *Eurasian Soil Science*. 2013. Vol. 46, № 2. P. 176–181. <https://doi.org/10.1134/S1064229313020087>.
25. Ropelewska E., Dziejowski J., Zapotoczny P. Changes in the microbial activity and thermal properties of soil treated with sodium fluoride // *Applied Soil Ecology*. 2016. Vol. 98. P. 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.10.013>.
26. 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.
27. Звягинцев Д.Г., Кожевин П.А. Изучение динамики популяции клубеньковых бактерий в почвах с помощью иммунофлуоресценции // *Микробиология*. 1974. Т. 43, № 5. С. 888–891.
28. Звягинцев Д.Г., Дмитриев Е.А., Кожевин П.А. О люминесцентно-микроскопическом изучении почвенных микроорганизмов // *Микробиология*. 1978. Vol. 47, № 6. P. 1091–1096.
29. Ao M., Chen X., Den, T., Sun S., Tang Y., Morel J. L., Wang S. Chromium biogeochemical behaviour in soil-plant systems and remediation strategies: A critical review // *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 424. P. 127233. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127233>.
30. Pavesi T., Moreira J.C. Mechanisms and individuality in chromium toxicity in humans // *J. of Applied Toxicology*. 2020. Vol. 40, № 9. P. 1183–1197. <https://doi.org/10.1002/jat.3965>.
31. Michels C., Perazzoli S., Soares H.M. Inhibition of an enriched culture of ammonia oxidizing bacteria by two different nanoparticles: Silver and magnetite // *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 586. P. 995–1002. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.080>.
32. Kolesnikov S.I. Impact of contamination with tellurium on biological properties of ordinary chernozem // *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*. 2019. Vol. 28, № 8. P. 792–800. <https://doi.org/10.1080/15320383.2019.1666793>.
33. Ярославцев М.В., Колесников С.И. Оценка устойчивости черноземов Юга России к загрязнению тяжелыми металлами по биологическим показателям // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2011. № 4 (164). С. 83–86.
34. Евстегнеева Н.А., Колесников С.И. Сравнительная оценка активности каталазы в черноземе обыкновенном при загрязнении Ni, Pb, Zn, Cd // *Актуальные проблемы экологии и природопользования*. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2020. С. 27–29.
35. Евстегнеева Н.А. Сравнительная оценка фитотоксичности тяжелых металлов, неметаллов и металлоидов // *Экология и природопользование: темат. сб.* Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2020. С. 21–23.
36. 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 Pollut.* 2022. Vol. 233, № 18. P. 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05496-3>.
37. Karlen D. L., Veum K. S., Sudduth K. A., Obrycki J. F., Nunes M. R. Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities // *Soil and Tillage Research*. 2019. Vol. 195. P. 104365. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104365>.

References

1. Adimalla N. Heavy metals contamination in urban surface soils of Medak province, India, and its risk assessment and spatial distribution. *Environmental Geochemistry and Health*. 2020;42(1):59-75, <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00270-1>.
2. Sun L., Guo D., Liu K., Meng H., Zheng Y., Yuan F., Zhu G. Levels, sources, and spatial distribution of heavy metals in soils from a typical coal industrial city of Tangshan, China. *Catena*. 2019;(175):101-109, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.014>.
3. Mishra S., Bharagava R. N., More N., Yadav A., Zainith S., Mani S., Chowdhary P. Heavy metal contamination: an alarming threat to environment and human health. *Environmental biotechnology: For sustainable future*. Singapore: Springer Publ.; 2019:103-125, https://doi.org/10.1007/978-981-10-7284-0_5.
4. Joseph L., Jun B.M., Flora J.R., Park C.M., Yoon Y. Removal of heavy metals from water sources in the developing world using low-cost materials: A review. *Chemosphere*. 2019;(229):142-159, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.198>.
5. Rinklebe J., Antoniadis V., Shaheen S.M., Rosche O., Altermann M. Health risk assessment of potentially toxic elements in soils along the Central Elbe River, Germany. *Environment International*. 2019;(126):76-88, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.011>.
6. Vodianitsky Yu. On dangerous heavy metals/metalloids in soils. *Byul. Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva = Dokuchaev Soil Bulletin*. 2011;(68):56-82, <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2011-68-56-82>. (In Russ.).

7. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F., Ponomareva S.V. Ranking of Chemical Elements According to Their Ecological Hazard for Soil. *Russian Agricultural Sciences*. 2010;36(1):32-34, <https://doi.org/10.3103/S1068367410010106>.
8. Vodyanitskii Y. N. Standards for the contents of heavy metals and metalloids in soils. *Eurasian Soil Science*. 2010;45(3):321-328, <https://doi.org/10.1134/S1064229312030131>.
9. Xiong T., Zhang T., Dumat C., Sobanska S., Dappe V., Shahid M., Xian Y., Li X., Li S. Airborne foliar transfer of particular metals in *Lactuca sativa* L.: translocation, phytotoxicity, and bioaccessibility. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019;26(20):20064-20078, <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3084-x>.
10. Nunes M.R., Karlen D.L., Veum K.S., Moorman T.B., Cambardella C.A. Biological soil health indicators respond to tillage intensity: A US meta-analysis. *Geoderma*. 2020;(369):114335, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114335>.
11. Romanov V.N., Zaushintsena A.V., Kozhevnikov N.V. Application of enzyme activity indicators for rapid diagnostics of the ecological status of agrogenic soils. *Achievements of Science and Technology of AICis*. 2019;33(7):44-47, <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10711>. (In Russ.).
12. Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019;191(9):1-10, <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7718-3>.
13. Song B., Zhang C., Zeng G., Gong J., Chang Y., Jiang Y. Antibacterial properties and mechanism of graphene oxide-silver nanocomposites as bactericidal agents for water disinfection. *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 2016;(604):167-176, <https://doi.org/10.1016/j.abb.2016.04.018>.
14. Feng G., Xie T., Wang X., Bai J., Tang L., Zhao H., Zhao Y. Metagenomic analysis of microbial community and function involved in cd-contaminated soil. *BMC Microbiology*. 2018;18(1):11, <https://doi.org/10.1186/s12866-018-1152-5>.
15. Wu B., Hou S., Peng D., Wang Y., Wang C., Xu F., Xu H. Response of soil micro-ecology to different levels of cadmium in alkaline soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018;(166):116-122, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.09.076>.
16. Guseva T. M., Evdokimova O.V. The use of microbial cenoses involving *Bacillus* spp. and *Clostridium* spp. for assessing soil pollution with heavy metals. *Vestn. sovremennykh issledovaniy = Bulletin of Modern Research*. 2017;(9-1):19-23. (In Russ.).
17. Guo H., Nasir M., Lv J., Dai Y., Gao J. Understanding the variation of microbial community in heavy metals contaminated soil using high throughput sequencing. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2017;(144):300-306, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.048>.
18. Lin Y., Ye Y., Hu Y., Shi H. The variation in microbial community structure under different heavy metal contamination levels in paddy soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019;180:557-564, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.057>.
19. IUSS Working Group WRB. 2015. *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015*. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports no. 106.
20. Val'kov V.F., Kazeev K.S., Kolesnikov S.I. *Soils in South of Russia*. Rostov-on-Don: Everest Publ.; 2008. 276 p. (In Russ.).
21. 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. Available from: <https://hindawi.com/journals/aess/2020/1207210/> [Accessed 24th June 2022], <https://doi.org/10.1155/2020/1207210>.
22. Kolesnikov S.I., Kazeev K. Sh., Valkov V.F. *Ecological condition and functions of soils in conditions of chemical pollution*. Rostov-on-Don: Rostizdat Publ.; 2006. 385 p. (In Russ.).
23. Dutta S., Datta A., Zaid A., Bhat J.A. Metalloids and Their Impact on the Environment. *Metalloids in Plants: Advances and Future Prospects*. 2022:19-26, <https://doi.org/10.1002/9781119487210.ch2>.
24. Kolesnikov S.I., Yaroslavtsev M.V., Spivakova N.A., Kazeev K.S. Comparative assessment of the biological tolerance of chernozems in the South of Russia towards contamination with Cr, Cu, Ni, and Pb in a model experiment. *Eurasian Soil Science*. 2013;46(2):176-181, <https://doi.org/10.1134/S1064229313020087>.
25. Ropelewska E., Dziejowski J., Zapotoczny P. Changes in the microbial activity and thermal properties of soil treated with sodium fluoride. *Applied Soil Ecology*. 2016;98:159-165, <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.10.013>.
26. 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.).
27. Zvyagintsev D.G., Kozhevin P.A. Studying the dynamics of population of nodule bacteria in soils using immunofluorescence. *Mikrobiologiya = Microbiology*. 1974;43(5):888-891. (In Russ.).
28. Zvyagintsev D.G., Dmitriev E.A., Kozhevin P.A. On the luminescent-microscopic study of soil microorganisms. *Mikrobiologiya = Microbiology*. 1978;47(6):1091-1096. (In Russ.).

29. Ao M., Chen X., Deng T., Sun S., Tang Y., Morel J. L., Wang S. Chromium biogeochemical behaviour in soil-plant systems and remediation strategies: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*. 2022;424:127233, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127233>.
30. Pavesi T., Moreira J. C. Mechanisms and individuality in chromium toxicity in humans. *Journal of Applied Toxicology*. 2020;40(9):1183-1197, <https://doi.org/10.1002/jat.3965>.
31. Michels C., Perazzoli S., Soares H. M. Inhibition of an enriched culture of ammonia oxidizing bacteria by two different nanoparticles: silver and magnetite. *Science of the Total Environment*. 2017;(586):995-1002, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.080>.
32. Kolesnikov S. I. Impact of contamination with tellurium on biological properties of ordinary chernozem. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*. 2019;28(8):792-800, <https://doi.org/10.1080/15320383.2019.1666793>.
33. Yaroslavtsev M.V., Kolesnikov S.I. Assessment of the stability of the chernozems of Southern Russia to contamination by heavy metals in biological indicators. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2011;(4):83-86. (In Russ.).
34. Evstegneeva N. A. Comparative assessment of catalase activity in ordinary chernozem with contamination of Ni, Pb, Zn, Cd. *Actual problems of Ecology and Nature Management*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2020:27-29. (In Russ.).
35. Evstegneeva N. A. Comparative assessment of phytotoxicity of heavy metals, nonmetals and metalloids. *Ecology and nature management: A thematic collection*. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press; 2020:21-23. (In Russ.).
36. 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 Pollut*. 2022;233(1):1-18, <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05496-3>.
37. Karlen D.L., Veum K. S., Sudduth K. A., Obrycki J. F., Nunes M. R. Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities. *Soil and Tillage Research*. 2019;195:104365, <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104365>.

Информация об авторах

Наталья Андреевна Евстегнеева – аспирант, 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.
Наталья Игоревна Цепина – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник, Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.
Камиль Шагидуллович Казеев – доктор географических наук, профессор, директор Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского.

Information about the authors

Natalia A. Evstegneeva – Postgraduate, Academy of Biology and Biotechnologies.
Sergey I. Kolesnikov - Doctor of Science (Agriculture), 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.
Natalia. I. Tsepina - Candidate of Science (Biology), Junior 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 01.07.2022; одобрена после рецензирования 15.07.2022; принята к публикации 30.08.2022.
The article was submitted 01.07.2022; approved after reviewing 15.07.2022; accepted for publication 30.08.2022.

Научная статья

УДК 663.125/663.252.4

doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-129-138

НЕКОТОРЫЕ БИОХИМИЧЕСКИЕ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРОЖЖЕЙ *SACCHAROMYCES CEREVISIAE* В УСЛОВИЯХ СТРЕССА (ОБЗОР)

Эльвира Ахмедовна Исламмагомедова^{1✉}, Эсланда Абдурахмановна Халилова²,
Аида Алевдиновна Абакарова³

^{1, 2, 3} Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского федерального исследовательского центра РАН, Махачкала, Республика Дагестан, Россия

¹ islammagomedova@mail.ru✉

² eslanda61@mail.ru

³ aida.abacarva@rambler.ru

Аннотация. В обзоре проанализированы процессы адаптации дрожжей *Saccharomyces* к экстремальным условиям. Интерес к изучению стрессовых воздействий на метаболизм дрожжей связан с использованием экстремофильных штаммов в различных биотехнологиях. Рассмотрены основные биохимические процессы, фундаментальные по своей природе и происходящие в клетках дрожжей при критических значениях температуры, этанола, pH, NaCl и глюкозы. Приводятся морфологические характеристики клеток и гигантских колоний дрожжей, закономерности образования которых отражают изменения в клеточном метаболизме в экстремальных условиях. Обобщены исследования промышленных штаммов, проводимые для улучшения кинетики ферментации, выхода продукта и устойчивости клеток в условиях стресса. Несмотря на большое количество публикаций в этой области, очевидна перспективность дальнейшего изучения физиологического состояния клеток *S. cerevisiae* в экстремальных условиях, что важно для понимания регуляции метаболизма дрожжей и решения технологических задач.

Ключевые слова: дрожжи, экстремофильные штаммы, клетки, гигантские колонии, биохимия, морфология, биотехнология

Для цитирования: Исламмагомедова Э.А., Халилова Э.А., Абакарова А.А. Некоторые биохимические и морфологические свойства дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* в условиях стресса (обзор) // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 3. С. 129–138.

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

Original article

SOME BIOCHEMICAL AND MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF YEAST *SACCHAROMYCES CEREVISIAE* UNDER STRESS CONDITIONS (REVIEW)

Elvira A. Islammagomedova^{1✉}, Eslanda A. Khalilova², Aida A. Abakarova³

^{1, 2, 3} Caspian Institute of Biological Resources, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Republic of Dagestan, Russia

¹ islammagomedova@mail.ru✉

² eslanda61@mail.ru

³ aida.abacarva@rambler.ru

© Исламмагомедова Э.А., Халилова Э.А., Абакарова А.А., 2022

Abstract. This review analyzes the processes of adaptation of yeast *Saccharomyces* to extreme conditions. Interest in the study of stress effects on yeast metabolism is associated with the use of extremophilic strains in various biotechnologies. The main biochemical processes that are fundamental in nature and occur in yeast cells at critical temperatures, ethanol, pH, NaCl and glucose are considered. The morphological characteristics of cells and giant colonies of yeast are given, the patterns of formation of which reflect changes in cellular metabolism under extreme conditions. The studies of industrial strains conducted to improve the fermentation kinetics, product yield and cell resistance under stress are summarized. Despite the large number of publications in this field, it is obvious that further study of the physiological state of *S. cerevisiae* cells under extreme conditions is promising, which is important for understanding the regulation of yeast metabolism and solving technological problems.

Keywords: yeast, extremophilic strains, cells, giant colonies, biochemistry, morphology, biotechnology

For citation: Islammagomedova E.A., Khalilova E.A., Abakarova A.A. Some Biochemical and Morphological Properties of Yeast *Saccharomyces Cerevisiae* under Stress Conditions (Review). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2022;(3):129-138. (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

Изучение стрессовых воздействий на метаболизм дрожжей имеет важное значение для поиска экстремофильных штаммов – перспективных объектов различных биотехнологий [1, 2]. Известно, что в определенных экологических нишах микроорганизмы располагают комплексом адаптационных механизмов. Так, определенной популяцией дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* приобретена резистентность к кратковременному максимуму температуры [3]. В естественных условиях дрожжи *Debaryomyces hansenii* способны находиться в гиперсоленых водах; в сильно засоленных почвах доминируют галотолерантные и экстремальные галофилы, поддерживающие активность и структурную целостность фермента в условиях высокой концентрации соли [4, 5], что позволяет клеткам сохранять высокую скорость размножения.

На основе генного транскрипционного и функционального анализа накоплены новые знания о биохимических и молекулярных механизмах толерантности дрожжей к стрессу. Известно, что одним из механизмов адаптации дрожжей является полиплоидия, обеспечивающая в условиях стресса преимущество определенного фенотипа. Генетические различия штаммов *S. cerevisiae* предопределяют их жизнеспособность и специфическую адаптацию в экстремальных условиях [6, 7].

Биохимические механизмы адаптации дрожжей к стрессу

Основные биохимические процессы, происходящие в экстремальных условиях в клетке, фундаментальны по своей природе. Это индукция стресс-белков, накопление полифосфатных и липидных гранул, появление в составе липидов жирных кислот с длинной цепью, однотипные изменения ультраструктуры клеток дрожжей (увеличение размеров митохондрий, повышение численности и размеров пероксисом) [1, 8]. Одним из наиболее важных факторов, влияющих на активность дрожжей, является температура. Температурная адаптация сопровождается, помимо общих закономерных биохимических процессов, модуляциями в изомерном составе жирных кислот и длине их цепей, различиями в микровязкости полярных и нейтральных липидов и корреляцией степени их ненасыщенности; повышением уровня трегалозы среди углеводов цитозоля. Трегалоза стабилизирует структуру мембран, предохраняя их от обезвоживания при повышении температуры. Содержание трегалозы в клетке определяется длительностью теплового шока и особенностями штамма дрожжей [1, 8, 9]. Универсальным биохимическим механизмом адаптации к низкотемпературному стрессу является торможение жизненной активности, связанное со снижением уровня метаболических процессов. В клетках изменяется содержание субстратов энергетического обмена, происходит замена основных белков вегетативной клеточной стенки на маннопротеины [1, 8, 10].

При осмотическом стрессе происходят однотипные биохимические процессы и изменения ультраструктуры клеток (синтез белков и трегалозы, изменения в жирнокислотном составе липидов, увеличение размеров митохондрий и пероксисом) [1, 8, 11]. В процессе восстановления индуцированных клеточных повреждений в результате осмостресса важная роль принадлежит мультипротеиновым комплексам или мембранным белкам, при этом реакция на повышенное содержание глюкозы зависит от конкретных белков. Восприимчивость дрожжей к высоким концентрациям глюкозы в среде определяется ферментативной системой и является индивидуальной характеристикой штамма. Защитная роль резервных углеводов заключается в выравнивании осмотического давления внутри и вне клеток и поддержании тургора цитоплазмы; она обусловлена взаимодействием между реакциями аккумуляции и утилизации трегалозы и гликогена [12, 13]. Эволюционная адаптация дрожжей *S. cerevisiae* к солевому стрессу связана с увеличением размера генома и умеренными изменениями экспрессии некоторых генов. Устойчивость к солевому стрессу развивается при помощи ионного гомеостаза и осмотической регуляции, достигаемой за счет накопления растворенных веществ внутри клетки. В условиях солевого стресса снижается объем клеток. Обнаружена корреляция между солетолерантностью ферментов и долей кислых аминокислот в общем клеточном белке; увеличивается содержание гликолитических соединений; в цитозоли накапливается глицерин, синтез которого является ключевым фактором, обеспечивающим рост популяций дрожжей при высоких уровнях соли; изменяется потенциал плазматической мембраны и внутриклеточного рН [11, 14, 15].

В некоторых экосистемах высокие концентрации солей достаточно часто сочетаются с критическими значениями рН. В данных уникальных природных условиях процесс адаптации заключается в накоплении заряженных ионов из окружающей среды или синтезе цитоплазматических осморегуляторов; стабилизации липидного состава митохондриальных мембран; накоплении ионов натрия, свободных жирных кислот и аминокислот, что дает возможность клетке нейтрализовать повышенное содержание соли в среде культивирования [1, 16].

Известно, что рН среды является важным фактором, влияющим на степень диссоциации компонентов среды, систему транспорта питательных веществ, стрессоустойчивость и ферментативную активность дрожжей [16–19]. Каждый фермент проявляет максимальное действие при определенной для него концентрации водородных ионов, однако рН-оптимум для некоторых ферментов может варьировать в широких пределах. Изменение электрического заряда фермента под влиянием рН влечет изменение структуры и пространственного расположения полипептидной цепи и, соответственно, скорости ферментного действия. В поддержании ионного гомеостаза дрожжевой клетки важную роль играют ключевые ферменты энергетического обмена, генерирующие электрохимический градиент протонов на плазматической мембране, а также эффективные буферные системы, включающие фосфаты, бикарбонат и аминокислоты [19, 20]. Известна зависимость активации транскрипции стрессовых генов от изменения поляризации внутренней мембраны митохондрий. Специфические различия штаммов дрожжей *S. cerevisiae*, толерантных к различным рН, генетически предопределены. В ответ на стресс при низких значениях рН происходит изменение клеточного метаболизма дрожжей *S. cerevisiae*: перегруппировка липидов и уменьшение фосфатидилхолина, одного из основных компонентов клеточной мембраны; перераспределение углеводов в клеточной стенке; значительное изменение белков агрегации, ответственных за снижение темпов роста клеток [20, 21]. Одним из механизмов адаптации некоторых культур микроорганизмов, существующих в природе при низких рН, являются изменения в последовательности нуклеотидов в хромосомной ДНК [8, 22]. В щелочной среде культивирования важную роль в адаптации к рН-стрессу играют митохондрии: происходит увеличение содержания их белков относительно белков цитоплазмы, адаптация дрожжей сопровождается повышенной экспрессией гена митохондриального фермента альфакетоглутаратдегидрогеназы. Проявляется способность ферментов функционировать при высоких значениях рН. Так, оптимумы рН большинства ферментов галоалкалофильных микроорганизмов находятся в области щелочных значений. При значениях рН, угнетающе действующих на рост дрожжей, наблюдается снижение липогенной активности дрожжей [1, 8, 11].

В условиях этанольного стресса дрожжи развивают различные адаптационные механизмы, включающие синтез трегалозы и белков теплового шока; изменения липидного состава плазматической мембраны, обусловленные более низкой текучестью мембраны, вызывающей повы-

шенную толерантность к этанолу [23]. Высокие концентрации этанола ингибируют активное поглощение питательных веществ, что тормозит рост клеток; происходит увеличение проницаемости и пористости клеточной мембраны; наблюдается дефицит доступной цитоплазме воды. Физиологические изменения выражаются в увеличении потребления аммонийного азота, метаболические – в высокой активности малатдегидрогеназы, в азотном обмене – в возрастании активности реакций переаминирования [24–26]. Поэтому исследование механизмов адаптации дрожжей на биохимическом и молекулярном уровнях, использование генной инженерии [27] могут обеспечить основу для селекции штаммов с повышенной толерантностью к этанолу.

Морфологические особенности клеток и гигантских колоний дрожжей *S. cerevisiae* в экстремальных условиях

Биохимические механизмы адаптации к экстремальным условиям оказывают влияние и на морфологические свойства дрожжей [28, 29], в том числе на характеристики гигантских колоний, закономерности образования которых отражают изменения в клеточном метаболизме и среде культивирования [30]. Определенное влияние на размер и форму клеток гигантских колоний дрожжей *Saccharomyces* оказывает температурный стресс [8, 29]. Гиперосмотический шок способствует преобразованию поверхности дрожжевых клеток и впоследствии вызывает быстрое сокращение их размера, восстанавливаемое во время адаптации, замедление клеточных диффузионных процессов и деформацию мембран [9, 11]. Индивидуальные свойства клеток влияют на способность колоний адаптировать свою внутреннюю организацию к осмотическому стрессу. Так, увеличение концентрации глюкозы способствует росту колонии. При этом экспрессия генов, участвующих в метаболизме углеводов, зависит от источника и концентрации глюкозы [31]. В результате воздействия высокой концентрации NaCl и критических значений pH клетки приобретают более округлую форму [32], при этом происходит регулируемое изменение их объема, корректировка поверхности, морфогенеза и роста дрожжей [29]. В условиях этанольного стресса для клеток характерно наличие ярко выраженных глубоких инвагинаций цитоплазматической мембраны [1].

Толерантность отдельных штаммов к различным видам стресса зависит от их функционального состояния и плоидности [6, 33, 34]. При повышенной (37 °C) и низкой (4 °C) температуре, значениях pH 3,0–11,0, критических концентрациях NaCl и этанола в среде культивирования изменяется форма клеток полиплоидного штамма *S. cerevisiae* Y-503 и характерно сохранение сферической формы гаплоидного штамма *S. cerevisiae* DAW-3а. Размеры клеток обоих штаммов уменьшаются, при этом в популяции Y-503 средний размер клеток в 1,5 раза больше по сравнению с DAW-3а при всех режимах культивирования. В клетках накапливаются метакроматин, гликоген, липидные гранулы, позволяющие дрожжам легче переносить последствия стресса. Гигантские колонии обоих штаммов в данных экстремальных условиях реагируют идентично – изменяются их формы, размеры и структуры [35, 36]. При различных pH и оптимальной температуре 30 °C колонии полиплоида Y-503 отличаются более крупными размерами.

В результате влияния высоких концентраций глюкозы (20 %) обнаружена способность исследуемых дрожжей адаптироваться к данному стрессу. В условиях одновременного влияния глюкозы (20 %) и этанола (18 %) наблюдается утолщение внешней оболочки и наличие запасных питательных веществ в клетках, небольшое уменьшение размера и изменение цвета, поверхности и профиля колоний [37]. Результаты исследования морфофизиологических свойств дрожжей в условиях стресса могут быть использованы для их дальнейшего применения в биотехнологических процессах.

Использование стрессоустойчивых штаммов дрожжей в биотехнологических процессах

Изучение стрессовых воздействий и механизмов регуляции метаболизма клеток в процессе адаптации, уникальных особенностей, связанных с экстремофильным характером дрожжей, синтеза биологически активных вторичных метаболитов, важно для поиска штаммов – перспективных объектов различных биотехнологий, где дрожжи часто подвергаются одновременному действию нескольких стресс-факторов. В зависимости от времени и условий культивирования

дрожжи растут с различной скоростью и имеют специфику, характер которой отражает определенные физиологические изменения [8, 9]. Научные и промышленные исследования дрожжей необходимы для улучшения кинетики ферментации, выхода продукта и устойчивости клеток в условиях стресса [38, 39]. В спиртовой промышленности в настоящее время актуальным является применение технологии сбраживания высококонцентрированного сусла, однако при этом дрожжи испытывают повышенные уровни осмотического и этанольного стрессов [25, 40]. Получение толерантных к стрессовым состояниям штаммов дрожжей *S. cerevisiae* может быть достигнуто с помощью генной инженерии путем регулирования энергетического баланса и процессов детоксикации, иммобилизации дрожжевых клеток [41, 42], повышения термостабильности дрожжей. Клетки, пережившие воздействие высоких температур, приобретают не только термо-, но также спирто- и осмоустойчивость [43, 44]. На основе молекулярной идентификации и филогенетического анализа выделены штаммы дрожжей, способные продуцировать большое количество этанола при высоких температурах с использованием глюкозы в качестве субстрата. Применение термотолерантных дрожжей не только увеличивает скорость превращения глюкозы в этанол, но и снижает эксплуатационные расходы [44–47]. В процессе приготовления шампанского в условиях вторичной ферментации тиражной смеси клетки должны быть адаптированы к этанолу, кислотности, давлению и температуре, поэтому в настоящее время актуальны исследования по селекции толерантных штаммов винных дрожжей для производства игристых вин [48]. В различных промышленных биотехнологиях востребованы солеустойчивые штаммы дрожжей. Методы эволюционной инженерии, комплексные и систематизированные знания о механизмах, используемых осмо- и галотолерантными дрожжами для противодействия стрессам, способствуют разработке и получению высококачественных экстремофильных штаммов [49, 50].

Заключение

Процессы адаптации дрожжей *Saccharomyces* к экстремальным значениям температуры, этанола, pH, NaCl и глюкозы проанализированы в данном обзоре с точки зрения фундаментального и прикладного значения. Несмотря на большое количество публикаций в этой области, очевидна перспективность дальнейшего изучения физиологического состояния клеток *S. cerevisiae* в экстремальных условиях. Результаты данных исследований послужат основанием для изучения адаптации дрожжей к различным факторам стресса, что важно для понимания регуляции клеточного метаболизма и решения технологических задач.

Список источников

1. Аринбасарова А.Ю., Бирюкова Е.Н., Меденцев А.Г. Антистрессовые системы дрожжей *Yarrowia lipolytica* (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2015. Т. 51, № 2. С. 122–131.
2. Siedlarz P., Sroka M., Dylag M., Nawrot U., Gonclar M., Kus-Liskiewicz M. Preliminary physiological characteristics of thermotolerant *Saccharomyces cerevisiae* clinical isolates identified molecular biology techniques // Letters in Applied Microbiology. 2015. Vol. 62. P. 277–282.
3. Калюжин В.А. Терморезистентность у дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* // Журн. общ. биологии. 2011. Т. 72, № 2. С. 140–150.
4. Квеситадзе Э. Галофильность мицелиальных грибов, выделенных из солончаков Южного Кавказа // Biotechnologia Acta. 2015. Т. 8, № 3. С. 56–66.
5. Weissgram M, Gstöttner J., Lorantfy B., Tenhaken R., Herwig C., Weber H.K. Generation of PHB from Spent Sulfite Liquor Using Halophilic Microorganisms // Microorganisms. 2015. Vol. 3. P. 268–289. Doi: 10.3390/microorganisms3020268.
6. Zadrąg-Tecza R., Kwolek-Mirek M., Alabrudzińska M., Skoneczna A. Cell size influences the reproductive potential and total lifespan of the *Saccharomyces cerevisiae* yeast as revealed by the analysis of polyploid strains // Oxidative Medicine and Cellular Longevity. 2018. Vol. 2018. P. 1–17. <https://doi.org/10.1155/2018/1898421>.
7. Zhu Y.O., Sherlock G., Petrov D.A. Whole Genome Analysis of 132 Clinical *Saccharomyces cerevisiae* Strains Reveals Extensive Ploidy Variation // G3: Genes|Genomes|Genetics. 2016. Vol. X. P. 1–13. Doi: 10.1534/g3.116.029397.
8. Brown A.J.P., Cowen L.E., Pietro A. Di., Quinn J. Stress adaptation // Microbiol. Spectr. 2017. Vol. 5, № 4. P. 1011–1021.

9. Caspeta L., Nielsen J. Thermotolerant yeast strains adapted by laboratory evolution show trade-off at ancestral temperatures and preadaptation to other stresses // *MBio*. 2015. Vol. 6 (4). P. 431–446. Doi: 10.1128/mBio.00431-15.
10. Sanfelice D., Temussi P.A. Cold denaturation as a tool to measure protein stability // *Biophys. Chem*. 2016. Vol. 208. P. 4–8. Doi: 10.1016/j.bpc.2015.05.007.
11. Chae Y.K., Kim S.H., Ellinger J.E., Markley J.L. Dosage Effects of Salt and pH Stresses on *Saccharomyces cerevisiae* as Monitored via Metabolites by Using Two Dimensional NMR Spectroscopy // NIH Public Access Author Manuscript. 2015. Vol. 34 (12). P. 3602–3608.
12. Sipiczki M. Yeast two and three species hybrids and high sugar fermentation // *Microbial Biotechnology*. 2019. Vol. 12 (6). P. 1101–1108. Doi: 10.1111/1751-7915.13390.
13. Oshima H., Kinoshita M. Effects of sugars on the thermal stability of a protein // *J. Chem. Phys*. 2013. Vol. 138 (24). P. 245–261. Doi: 10.1063/1.4811287.
14. Gao Q., Liou L.-C., Ren Q., Bao X., Zhang Z. Salt stress causes cell wall damage in yeast cells lacking mitochondrial DNA // *Microbial. Cell*. 2014. Vol. 1 (3). P. 94–99.
15. Stratford M., Steels H., Novodvorska M., Archer D.B., Avery S.V. Extreme Osmotolerance and Halotolerance in Food-Relevant Yeast and the Role of Glycerol-Dependent Cell Individuality // *Front Microbiol*. 2018. Vol. 9. P. 32–38. Doi: 10.3389/fmicb.2018.03238.
16. Секова В.Ю., Гесслер Н.Н., Исакова Е.П., Антупов А.Н., Дергачева Д.И., Дерябина Ю.И., Трубникова Е.В. Окислительно-восстановительный статус экстремофильных дрожжей *Yarrowia lipolytica* при адаптации к pH-стрессу // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2015. Т. 51, № 6. С. 570–577. Doi: 10.7868/S0555109915060136.
17. Serra-Cardona A., Canadell D., Ariño J. Coordinate responses to alkaline pH stress in budding yeast // *Microb Cell*. 2015. Vol. 2 (6). P. 182–196. Doi: 10.15698/mic2015.06.205.
18. Liu X., Jia B., Sun X., Ai J., Wang L., Wang C., Zhao F., Zhan J., Huang W. Effect of initial pH on growth characteristics and fermentation properties of *Saccharomyces cerevisiae* // *Food Sci*. 2015. Vol. 80 (4). P. 800–808. Doi: 10.1111/1750-3841.12813.
19. Peña A., Norma S.S., Helber Á., Martha C., Jorge R. Effects of high medium pH on growth, metabolism and transport in *Saccharomyces cerevisiae* // *FEMS Yeast Research*. 2015. Vol. 15, № 2. <https://doi.org/10.1093/femsyr/fou005>.
20. Berterame N.M., Porro D., Ami D., Branduardi P. Protein aggregation and membrane lipid modifications under lactic acid stress in wild type and *OPI1* deleted *Saccharomyces cerevisiae* strains // *Microbial. Cell Factories*. 2016. Vol. 15 (39). P. 1–12. Doi: 10.1186/s12934-016-0438-2.
21. Tekarlan-Sahin S.H., Alkim C., Sezgin T. Physiological and transcriptomic analysis of a salt-resistant *Saccharomyces cerevisiae* mutant obtained by evolutionary engineering // *Bosn. J. Basic Med. Sci*. 2018. Vol. 18 (1). P. 55–65. Doi: 10.17305/bjbms.2017.2250.
22. Maruyama Y., Toshiyuki I., Kodama H., Matsuura A. Availability of amino acids extends chronological lifespan by suppressing hyper-acidification of the environment in *Saccharomyces cerevisiae* // *PLoS ONE*. 2016. Vol. 11 (3). P. 1–19. Doi: 10.1371/journal.pone.0151894.
23. Ishmayana S., Kennedy U.J., Learmonth R.P. Further investigation of relationships between membrane fluidity and ethanol tolerance in *Saccharomyces cerevisiae* // *World J. Microbiol. Biotechnol*. 2017. Vol. 33 (12). P. 218. Doi: 10.1007/s11274-017-2380-9.
24. Techaparin A., Thanonkeo P., Klanrit P. High-temperature ethanol production using thermotolerant yeast newly isolated from Greater Mekong Subregion // *Braz. J. Microbiol*. 2017. Vol. 48 (3). P. 461–475. Doi: 10.1016/j.bjm.2017.01.006.
25. Reis V.R., Faraco Antonangelo A.T.B., Bassi A.P.G., Colombi D., Ceccato-Antonini S.R. Bioethanol strains of *Saccharomyces cerevisiae* characterised by microsatellite and stress resistance // *Biotechnology and Industrial Microbiology*. 2017. Vol. 48, № 2. P. 268–274. Doi: 10.1016/j.bjm.2016.09.017.
26. Mohd Azhar S.H., Abdulla R., Jambo A., Marbawi H., Gansau J.A., Faik A.A.M., Rodrigues K.F. Yeast unsustainable bioethanol production: A review // *Biochemistry and Biophysics Reports*. 2017. Vol. 10. P. 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2017.03.003>.
27. Morard M., Macías L.G., Adam A.C., Lairón-Peris M., Pérez-Torrado R., Toft C., Barrio E. Aneuploidy and Ethanol Tolerance in *Saccharomyces cerevisiae* // *Front Genet*. 2019. Vol. 10, № 82. P. 1–12. <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.00082>.
28. Peris D., Pérez-Torrado R., Hittinger C.T., Barrio E., Querol A. On the origins and industrial applications of *Saccharomyces cerevisiae* × *Saccharomyces kudriavzevii* hybrids // *Yeast*. 2018. Vol. 35 (1). P. 51–69. Doi: 10.1002/yea.3283.
29. Zemančíková J., Kodedova M., Papoušková K., Sychrova H. Four *Saccharomyces* species differ in their tolerance to various stresses though they have similar basic physiological parameters // *Folia Microbiol*. 2018. Vol. 63. P. 217–227. <https://doi.org/10.1007/s12223-017-0559-y>.

30. Viana N.C., Portugal C., Cruz S.H. Morphophysiological and molecular characterization of wild yeast isolates from industrial ethanol process // African J. of Microbiology Research. 2017. Vol. 11 (37). P. 1422–1430. Doi: 10.5897/AJMR2017.8691.
31. Marinkovic Z.S., Vulin C., Acman M., Song M., Meglio J.-M.D., Lindner A.B., Hersen P. A micro fluidic device for inferring metabolic landscapes in yeast monolayer colonies // eLife. 2019. Vol. 8. P. 1–21. <https://doi.org/10.7554/eLife.47951>.
32. Секова В.Ю., Исакова Е.П., Дерябина Ю.И. Применение экстремофильных дрожжей *Yarrowia lipolytica* в биотехнологии (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2015. Т. 51 (3). С. 290–304. Doi: 10.7868/S0555109915030150.
33. Исламмагомедова Э.А., Халилова Э.А., Гасанов Р.З., Абакарова А.А., Аливердиева Д.А. Устойчивость дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* к экстремальным условиям // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2021. № 2. С. 113–118. Doi: 10.18522/1026-2237-2021-2-113-118.
34. Халилова Э.А., Исламмагомедова Э.А., Котенко С.Ц., Гасанов Р.З., Абакарова А.А., Аливердиева Д.А. Морфологические свойства штамма *S. cerevisiae* Y-503 в условиях осмотического, температурного и кислотного стресса // Изв. Самарского науч. центра Российской академии наук. 2019. Т. 21, № 2 (2). С. 132–140. Doi: 10.24411/1990-5378-2019-00026.
35. Исламмагомедова Э.А., Халилова Э.А., Котенко С.Ц., Гасанов Р.З., Абакарова А.А., Аливердиева Д.А. Влияние различных значений температуры на морфологические свойства дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* // Хранение и переработка сельхозсырья. 2020. № 2. С. 59–72. Doi: 10.36107/spfr.2020.322.
36. Халилова Э.А., Исламмагомедова Э.А., Котенко С.Ц., Абакарова А.А., Аливердиева Д.А. Адаптация дрожжей *S. cerevisiae* Y-503, *S. cerevisiae* DAW-3а, *S. oviformis* M-12X к различным значениям этанола: твердые питательные среды // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2020. № 4. С. 128–140. Doi: 10.18522/1026-2237-2020-4-128-140.
37. Исламмагомедова Э.А., Халилова Э.А., Котенко С.Ц., Абакарова А.А., Аливердиева Д.А. Морфологические особенности дрожжей рода *Saccharomyces* в процессе адаптации к экстремальным значениям глюкозы и этанола // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2020. № 1 (205). С. 95–101. Doi: 10.18522/1026-2237-2020-1-95-101.
38. Zhang Q., Jin Y.F., Fang Y., H. Zhao H. Adaptive evolution and selection of stress-resistant *Saccharomyces cerevisiae* for very high-gravity bioethanol fermentation // Electronic Journal of Biotechnology. 2019. Vol. 41. P. 88–94. <http://doi.org/10.1016/j.ejbt.2019.06.003>.
39. Joshi J., Dhungana P., Prajapati B., Maharjan P., Poudyal P., Yadav M., Mainali M., Yadav A.P., Bhattarai T., Sreerama L. Enhancement of Ethanol Production in Electrochemical Cell by *Saccharomyces cerevisiae* (CDBT2) and *Wickerhamomyces anomalus* (CDBT7) // Front. Energy Res. 2019. Doi: [10.3389/fenrg.2019.00070](https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00070).
40. Muñoz-Bernal E., Deery M.J., Rodríguez M.E., Cantoral J.M., Howard J., Feret R., Natera R., Lilley K.S., Fernández-Acero F.J. Analysis of temperature-mediated changes in the wine yeast *Saccharomyces bayanus var. uvarum*. An omic study of how the protein content influences wine quality // Proteomics. 2016. Vol. 16 (4). P. 576–92. Doi: 10.1002/pmic.201500137.
41. Velázquez R., Zamora E., Álvarez M., Álvarez M.L., Ramírez M. Using mixed inocula of *Saccharomyces cerevisiae* killer strains to improve the quality of traditional sparkling-wine // Food Microbiology. 2016. Vol. 59. P. 150–160.
42. Jansen M.L.A., Bracher J.M., Papapetridis I., Verhoeven M.D., Bruijn H., Waal P.P., Maris A.J.A., Klaassen P., Pronk J.T. *Saccharomyces cerevisiae* strains for second-generation ethanol production: from academic exploration to industrial implementation // FEMS Yeast Res. 2017. Vol. 17 (5). Doi: 10.1093/femsyr/fox044.
43. Helalat S.H., Bidaj S., Samani S., Moradi M. Producing alcohol and salt stress tolerant strain of *Saccharomyces cerevisiae* by heterologous expression of ppr1 gene // Enzyme Microb. Technol. 2019. Vol. 124. P. 17–22. Doi: 10.1016/j.enzmictec.2019.01.008.
44. Li H., Wu M., Xu L., Hou J., Guo T., Bao X., Shen Y. Evaluation of industrial *Saccharomyces cerevisiae* strains as the chassis cell for second-generation bioethanol production // Microbial Biotechnology. 2015. Vol. 8. P. 266–274.
45. Saini P., Beniwal A., Kokkiligadda A., Vij S. Response and tolerance of yeast to changing environmental stress during ethanol fermentation // Proc. Biochem. 2018. Vol. 72. P. 1–12. Doi: 10.1016/j.procbio.2018.07.001.
46. Chamnipa N., Thanonkeo S., Klanrit P., Thanonkeo P. The potential of the newly isolated thermotolerant yeast *Pichia kudriavzevii* RZ8-1 for high-temperature ethanol production // Braz. J. Microbiol. 2018. Vol. 49 (2). P. 378–391. Doi: 10.1016/j.bjm.2017.09.00278.
47. Ortiz-Tovar G., Pérez-Torrado R., Adam A.C., Barrio E., Querol A. A comparison of the performance of natural hybrids *Saccharomyces cerevisiae* × *Saccharomyces kudriavzevii* at low temperatures reveals the crucial role of their *S. kudriavzevii* genomic contribution // Int. J. Food Microbiol. 2018. Vol. 274. P. 12–19. Doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.

48. Borrull A., Lopez-Martinez G., Miro-Abella E., Salvado Z., Poblet M., Cordero-Otero R., Rozes N. New insights into the physiological state of *Saccharomyces cerevisiae* during ethanol acclimation for producing sparkling wines // *Food Microbiology*. 2016. Vol. 54. P. 20–29.
49. Dakal T.C., Lisa Solieri L., Giudici P. Adaptive response and tolerance to sugar and salt stress in the food yeast *Zygosaccharomyces rouxii* // *Int. J. Food Microbiol.* 2014. Vol. 185. P. 140–57. Doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.
50. Tekarslan-Sahin S.H., Alkim C., Sezgin T. Physiological and transcriptomic analysis of a salt-resistant *Saccharomyces cerevisiae* mutant obtained by evolutionary engineering // *Bosn. J. Basic Med. Sci.* 2018. Vol. 18 (1). P. 55–65. Doi: 10.17305/bjbm.2017.2250.

References

1. Arinbasarova A.Yu., Biryukova E.N., Medentsev A.G. Anti-stress systems of yeast *Yarrowia lipolytica* (review). *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya = Applied Biochemistry and Microbiology*. 2015;51(2):122-131. (In Russ.).
2. Siedlarz P., Sroka M., Dylag M., Nawrot U., Gonclar M., Kus-Liskiewicz M. Preliminary physiological characteristics of thermotolerant *Saccharomyces cerevisiae* clinical isolates identified molecular biology techniques. *Letters in Applied Microbiology*. 2015;62:277-282.
3. Kalyuzhin V.A. Thermal resistance in the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Zhurn. obshch. biologii = Journal of General Biology*. 2011;72(2):140-150. (In Russ.).
4. Kvesitadze E. Halophilicity of mycelial fungi isolated from salt marshes of the South Caucasus. *Biotechnologia Acta*. 2015;8(3):56-66. (In Russ.).
5. Weissgram M., Gstöttner J., Lorantfy B., Tenhaken R., Herwig C., Weber H.K. Generation of PHB from Spent Sulfite Liquor Using Halophilic Microorganisms. *Microorganisms*. 2015;3:268-289, doi: 10.3390/microorganisms3020268.
6. Zdrag-Tecza R., Kwolek-Mirek M., Alabrudzińska M., Skoneczna A. Cell size influences the reproductive potential and total lifespan of the *Saccharomyces cerevisiae* yeast as revealed by the analysis of polyploid strains. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2018;2018:1-17, doi: org/10.1155/2018/1898421.
7. Zhu Y.O., Sherlock G., Petrov D.A. Whole Genome Analysis of 132 Clinical *Saccharomyces cerevisiae* Strains Reveals Extensive Ploidy Variation. *G3: Genes|Genomes|Genetics*. 2016;X:1-13, doi: 10.1534/g3.116.029397.
8. Brown A.J.P., Cowen L.E., Pietro A. Di., Quinn J. Stress adaptation. *Microbiol. Spectr.* 2017;5(4):10, doi: 10.1128/microbiolspec.FUNK-0048-2016.
9. Caspeta L., Nielsen J. Thermotolerant yeast strains adapted by laboratory evolution show trade-off at ancestral temperatures and preadaptation to other stresses. *MBio*. 2015;6(4):431-446, doi: 10.1128/mBio.00431-15.
10. Sanfelice D., Temussi P.A. Cold denaturation as a tool to measure protein stability. *Biophys. Chem.* 2016;208:4-8, doi: 10.1016/j.bpc.2015.05.007.
11. Chae Y.K., Kim S.H., Ellinger J.E., Markley J.L. Dosage Effects of Salt and pH Stresses on *Saccharomyces cerevisiae* as Monitored via Metabolites by Using Two Dimensional NMR Spectroscopy. *NIH Public Access Author Manuscript*. 2015;34(12):3602-3608.
12. Sipiczki M. Yeast two and three species hybrids and high sugar fermentation. *Microbial Biotechnology*. 2019;12(6):1101-1108, doi: 10.1111/1751-7915.13390.
13. Oshima H., Kinoshita M. Effects of sugars on the thermal stability of a protein. *J. Chem. Phys.* 2013;138(24):245-261, doi: 10.1063/1.4811287.
14. Gao Q., Liou L.-C., Ren Q., Bao X., Zhang Z. Salt stress causes cell wall damage in yeast cells lacking mitochondrial DNA. *Microbial. Cell*. 2014;1(3):94-99.
15. Stratford M., Steels H., Novodvorska M., Archer D.B., Avery S.V. Extreme Osmotolerance and Halotolerance in Food-Relevant Yeast and the Role of Glycerol-Dependent Cell Individuality. *Front Microbiol.* 2018;9:32-38, doi: 10.3389/fmicb.2018.03238.
16. Sekova V.Yu., Gessler N.N., Isakova E.P., Antipov A.N., Dergacheva D.I., Deryabina Yu.I., Trubnikova E.V. Oxidative-reduction status of the extremophilic yeast *Yarrowia lipolytica* during adaptation to pH stress. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya = Applied Biochemistry and Microbiology*. 2015;51(6):570-577, doi: 10.7868/S0555109915060136. (In Russ.).
17. Serra-Cardona A., Canadell D., Ariño J. Coordinate responses to alkaline pH stress in budding yeast. *Microb Cell*. 2015;2(6):182-196, doi: 10.15698/mic2015.06.205.
18. Liu X., Jia B., Sun X., Ai J., Wang L., Wang C., Zhao F., Zhan J., Huang W. Effect of initial pH on growth characteristics and fermentation properties of *Saccharomyces cerevisiae*. *Food Sci.* 2015;80(4):800-808, doi: 10.1111/1750-3841.12813.
19. Peña A., Norma S.S., Helber Á., Martha C., Jorge R. Effects of high medium pH on growth, metabolism and transport in *Saccharomyces cerevisiae*. *FEMS Yeast Research*. 2015;15(2), https://doi.org/10.1093/femysr/fou005.

20. Berterame N.M., Porro D., Ami D., Branduardi P. Protein aggregation and membrane lipid modifications under lactic acid stress in wild type and *OPII* deleted *Saccharomyces cerevisiae* strains. *Microbial Cell Factories*. 2016;15(39):1-12, doi: 10.1186/s12934-016-0438-2.
21. Tekarslan-Sahin S.H., Alkim C., Sezgin T. Physiological and transcriptomic analysis of a salt-resistant *Saccharomyces cerevisiae* mutant obtained by evolutionary engineering. *Bosn. J. Basic Med. Sci.* 2018;18(1):55-65, doi: 10.17305/bjms.2017.2250.
22. Maruyama Y., Toshiyuki I., Kodama H., Matsuura A. Availability of amino acids extends chronological lifespan by suppressing hyper-acidification of the environment in *Saccharomyces cerevisiae*. *PLoS ONE*. 2016;11(3):1-19, doi: 10.1371/journal.pone.0151894.
23. Ishmayana S., Kennedy U.J., Learmonth R.P. Further investigation of relationships between membrane fluidity and ethanol tolerance in *Saccharomyces cerevisiae*. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 2017;33(12):218, doi: 10.1007/s11274-017-2380-9.
24. Techaparin A., Thanonkeo P., Klanrit P. High-temperature ethanol production using thermotolerant yeast newly isolated from Greater Mekong Subregion. *Braz. J. Microbiol.* 2017;48(3):461-475, doi: 10.1016/j.bjm.2017.01.006.
25. Reis V.R., Antonangelo A.T.B.F., Bassi A.P.G., Colombi D., Ceccato-Antonini S. Bioethanol strains of *Saccharomyces cerevisiae* characterized by microsatellite and stress resistance. *Braz. J. Microbiol.* 2017;48(2):268-274, doi org/10.1016/j.bjm.2016.09.017.
26. Mohd Azhar S.H., Abdulla R., Jambo A., Marbawi H., Gansau J.A., Faik A.A.M., Rodrigues K.F. Yeast unsustainable bioethanol production: A review. *Biochemistry and Biophysics Reports*. 2017;10:52-61, doi: org/10.1016/j.bbrep.2017.03.003.
27. Morard M., Macías L.G., Adam A.C, Lairón-Peris M., Pérez-Torrado R., Toft C., Barrio E. A new ploidy and Ethanol Tolerance in *Saccharomyces cerevisiae*. *Front Genet.* 2019;10(82):1-12, doi: org/10.3389/fgene.2019.00082.
28. Peris D., Pérez-Torrado R., Hittinger C.T., Barrio E., Querol A. On the origins and industrial applications of *Saccharomyces cerevisiae* × *Saccharomyces kudriavzevii* hybrids. *Yeast*. 2018;35(1):51-69, doi: 10.1002/yea.3283.
29. Zemančíkova J., Kodedova M., Papoušková K., Sychrova H. Four *Saccharomyces* species differ in their tolerance to various stresses though they have similar basic physiological parameters. *Folia Microbiol.* 2018;63:217-227, doi org/10.1007/s12223-017-0559-y.
30. Viana N.C., Portugal C., Cruz S.H. Morphophysiological and molecular characterization of wild yeast isolates from industrial ethanol process. *African Journal of Microbiology Research*. 2017;11(37):1422-1430, doi: 10.5897/AJMR2017.8691.
31. Marinkovic Z.S., Vulin C., Acman M., Song M., Meglio J.-M.D., Lindner A.B., Hersen P. A micro fluidic device for inferring metabolic landscapes in yeast monolayer colonies. *eLife*. 2019;8:1-21, doi: org/10.7554/eLife.47951.
32. Sekova V.Yu., Isakova E.P., Deryabina Yu.I. Application of extremophilic yeast *Yarrowia lipolytica* in biotechnology (review). *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya = Applied Biochemistry and Microbiology*. 2015;51(3):290-304, doi: 10.7868/s0555109915030150. (In Russ.).
33. Islammagomedova E.A., Khalilova E.A., Hasanov R.Z., Abakarova A.A., Aliverdieva D.A. Resistance of yeast *Saccharomyces cerevisiae* to extreme conditions. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2021;(2):113-118, doi: 10.18522/1026-2237-2021-2-113-118. (In Russ.).
34. Khalilova E.A., Islammagomedova E.A., Kotenko S.C., Hasanov R.Z., Abakarova A.A., Aliverdieva D.A. Morphological properties of *S. cerevisiae* strain Y-503 under osmotic, temperature and acid stress. *Izv. Samar-skogo nauch. tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019;21(2):132-140, doi: 10.24411/1990-5378-2019-00026. (In Russ.).
35. Islammagomedova E.A., Khalilova E.A., Kotenko S.C., Hasanov R.Z., Abakarova A.A., Aliverdieva D.A. The influence of different temperature values on the morphological properties of yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya = Storage and Processing of Farm Products*. 2020;(2):59-72, doi: 10.36107/spfp.2020.322. (In Russ.).
36. Khalilova E.A., Islammagomedova E.A., Kotenko S.C., Abakarova A.A., Aliverdieva D.A. Adaptation of yeast *S. cerevisiae* Y-503, *S. cerevisiae* DAW-3a, *S. oviformis* M-12X to various ethanol values: solid nutrient media. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2020;(4): 128-140, doi 10.18522/1026-2237-2020-4-128-140. (In Russ.).
37. Islammagomedova E.A., Khalilova E.A., Kotenko S.C., Abakarova A.A., Aliverdieva D.A. (2020). Morfologicheskie osobennosti drozhzhej roda *Saccharomyces* v processe adaptacii k ekstremalnym znacheniyam glyukozy i etanola. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2020;(1):95-101, doi: 10.18522/1026-2237-2020-1-95-101. (In Russ.).

38. Zhang Q., Jin Y.F., Fang Y., Zhao H. Adaptive evolution and selection of stress-resistant *Saccharomyces cerevisiae* for very high-gravity bioethanol fermentation. *Electronic Journal of Biotechnology*. 2019;41:88-94, <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2019.06.003>.
39. Joshi J., Dhungana P., Prajapati B., Maharjan P., Poudyal P., Yadav M., Mainali M., Yadav A.P., Bhattarai T., Sreerama L. Enhancement of Ethanol Production in Electrochemical Cell by *Saccharomyces cerevisiae* (CDBT2) and *Wickerhamomyces anomalus* (CDBT7). *Front. Energy Res.* 2019, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00070>.
40. Muñoz-Bernal E., Deery M.J., Rodríguez M.E., Cantoral J.M., Howard J., Feret R., Natera R., Lilley K. S., Fernández-Acero F.J. Analysis of temperature-mediated changes in the wine yeast *Saccharomyces bayanus var. uvarum*. An oenological study of how the protein content influences wine quality. *Proteomics*. 2016;16(4):576-92, doi: 10.1002/pmic.201500137.
41. Velázquez R., Zamora E., Álvarez M., Álvarez M.L., Ramírez M. Using mixed inocula of *Saccharomyces cerevisiae* killer strains to improve the quality of traditional sparkling-wine. *Food Microbiology*. 2016;59:150-160.
42. Jansen M.L.A., Bracher J.M., Papapetridis I., Verhoeven M.D., Bruijn H., Waal P.P., Maris A.J.A., Klaassen P., Pronk J.T. *Saccharomyces cerevisiae* strains for second-generation ethanol production: from academic exploration to industrial implementation. *FEMS Yeast Res.* 2017;17(5), doi: 10.1093/femsyr/fox044.
43. Helalat S.H., Bidaj S., Samani S., Moradi M. Producing alcohol and salt stress tolerant strain of *Saccharomyces cerevisiae* by heterologous expression of pprI gene. *Enzyme Microb. Technol.* 2019;124:17-22, doi: 10.1016/j.enzmictec.2019.01.008.
44. Li H., Wu M., Xu L., Hou J., Guo T., Bao X., Shen Y. Evaluation of industrial *Saccharomyces cerevisiae* strains as the chassis cell for second-generation bioethanol production. *Microbial Biotechnology*. 2015;8:266-274.
45. Saini P., Beniwal A., Kokkiligadda A., Vij S. Response and tolerance of yeast to changing environmental stress during ethanol fermentation. *Proc. Biochem.* 2018;72:1-12, doi: 10.1016/j.procbio.2018.07.001.
46. Chamnipa N., Thanonkeo S., Klanrit P., Thanonkeo P. The potential of the newly isolated thermotolerant yeast *Pichia kudriavzevii* RZ8-1 for high-temperature ethanol production. *Braz. J. Microbiol.* 2018;49(2):378-391, doi: 10.1016/j.bjm.2017.09.00278.
47. Ortiz-Tovar G., Pérez-Torrado R., Adam A.C., Barrio E., Querol A. A comparison of the performance of natural hybrids *Saccharomyces cerevisiae* × *Saccharomyces kudriavzevii* at low temperatures reveals the crucial role of their *S. kudriavzevii* genomic contribution. *Int. J. Food Microbiol.* 2018;274:12-19, doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.
48. Borrull A., Lopez-Martínez G., Miro-Abella E., Salvado Z., Poblet M., Cordero-Otero R., Rozes N. New insights into the physiological state of *Saccharomyces cerevisiae* during ethanol acclimation for producing sparkling wines. *Food Microbiology*. 2016;54:20-29.
49. Dakal T.C., Lisa Solieri L., Giudici P. Adaptive response and tolerance to sugar and salt stress in the food yeast *Zygosaccharomyces rouxii*. *Int. J. Food Microbiol.* 2014;185:140-57, doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.
50. Tekarслан-Sahin S.H., Alkim C., Sezgin T. Physiological and transcriptomic analysis of a salt-resistant *Saccharomyces cerevisiae* mutant obtained by evolutionary engineering. *Bosn. J. Basic Med. Sci.* 2018;18(1):55-65, doi: 10.17305/bjbm.2017.2250.

Информация об авторах

Э.А. Исламмагомедова – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория биохимии и биотехнологии.

Э.А. Халилова – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория биохимии и биотехнологии.

А.А. Абакарова – старший лаборант, лаборатория биохимии и биотехнологии.

Information about the authors

E.A. Islammagomedova - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Biochemistry and Biotechnology.

E.A. Khalilova - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Biochemistry and Biotechnology.

A.A. Abakarova - Senior Assistant, Laboratory of Biochemistry and Biotechnology.

Статья поступила в редакцию 24.03.2022; одобрена после рецензирования 11.05.2022; принята к публикации 30.08.2022.
The article was submitted 24.03.2022; approved after reviewing 11.05.2022; accepted for publication 30.08.2022.

Научная статья

УДК 631.41

doi: 10.18522/1026-2237-2022-3-139-150

ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ГУМУСА И БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ АГРОТЕМНОГУМУСОВЫХ ПОДБЕЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ АГРОТЕХНИЧЕСКИХ ПРИЕМАХ ОБРАБОТКИ ПОЧВ

Л.Н. Пуртова^{1✉}, И.В. Киселева², Я.О. Тимофеева³, А.Н. Емельянов⁴, Р.В. Тимошинов⁵

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

Владивосток, Россия

^{4, 5} Федеральный научный центр агробιοтехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, Тимирязевский, Россия

¹ Purtova@biosoil.ru✉

² Kiseleva-iv@inbox.ru

³ timofeeva@biosoil.ru

⁴ Emelyanov.prim@yandex.ru

⁵ o.zemledelia@yandex.ru

Аннотация. Установлены различия в содержании гумуса, микрофлоре и каталазной активности агротемногумусовых подбелов с различным уровнем агротехнического воздействия и применением экологически чистых (фитомелиоративных) приемов повышения плодородия. В почвах залежей установлено более высокое содержание гумуса, показателей биогенности и обогащенность каталазой (Ка). В составе микрофлоры доминировали бактерии, использующие минеральный азот и олигонитрофиллы. Запасы гумуса в метровом слое характеризовались как низкие. В условиях фитомелиоративного опыта в составе микрофлоры сохранялась та же закономерность. Содержание и запасы гумуса снижались по сравнению с почвой залежи. В связи с процессом образования ортитейнов в горизонте ЕLпп зафиксирован высокий уровень каталазной активности (до 9,9 см³ О₂/за 1 мин 1 г почвы). Это привело к увеличению средних показателей внутрипрофильного распределения каталазной активности и запасов Ка. В варианте с длительным применением органических удобрений зафиксированы низкие показатели содержания гумуса. При этом запасы гумуса в метровом слое возрастали относительно остальных вариантов опыта. В составе микрофлоры доминировали олигонитрофилы и аммонификаторы, а доля актиномицетов резко сокращалась. Значение Ка и ее запасы уменьшались. Для вариантов с внесением минеральных удобрений характерно преобладание в составе микрофлоры бактерий, использующих минеральный азот, и олигонитрофилов. Усиление микробиологической деятельности вызвало возрастание обогащенности почв Ка и повышение ее запасов. Отсутствие поступления свежего органического вещества привело к усилению процессов минерализации специфических органических соединений почвы. Для этого варианта свойственно наименьшее содержание гумуса и низкие его запасы.

Ключевые слова: почва, содержание гумуса, запасы гумуса, микрофлора, каталазная активность

Для цитирования: Пуртова Л.Н., Киселева И.В., Тимофеева Я.О., Емельянов А.Н., Тимошинов Р.В. Изменение содержания гумуса и биологической активности агротемногумусовых подбелов при различных агротехнических приемах обработки почв // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 3. С. 139–150.

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

Original article

CHANGES IN THE HUMUS CONTENT AND BIOLOGICAL ACTIVITY OF AGRO-DARK-HUMUS PODBEL UNDER VARIOUS AGROTECHNICAL METHODS OF TILLAGE

L.N. Purtova^{1✉}, I.V. Kiseleva², Ya.O. Timofeeva³, A.N. Emelyanov⁴, R.V. Timoshinov⁵

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

^{4, 5} Federal Scientific Center of Agrobiotechnology of the Far East named after A.K. Chaika, Timiryazevsky, Russia

¹ Purtova@biosoil.ru✉

² Kiseleva-iv@inbox.ru

³ timofeeva@biosoil.ru

⁴ Emelyanov.prim@yandex.ru

⁵ o.zemledelia@yandex.ru

Abstract. Differences in the content of humus, microflora and catalase activity in agro-dark-humus podbels soils with different levels of agrotechnical impact and the use of environmentally friendly (phytomeliorative) methods of increasing soil fertility were established. The higher content of humus, indicators of biogenicity and enrichment in catalase were established in the soils of abandoned field. Bacteria using mineral nitrogen and oligonitrophils was dominated in composition of microflora. The reserves of humus in the meter layer of soils have been characterized as low. The composition of the microflora showed the same regularity under the conditions of the phytomeliorative experiment. The content and reserves of humus decreased in comparison with the soil of abandoned field. Due to the process of nodule formation in the ELnn horizon, a high level of catalase activity was recorded (up to 9.9 cm³ O₂/1 min 1 g of soil). This led to an increase in the average intraprofile distribution of catalase activity (Ka) and Ka reserves. Low levels of humus content were recorded in the variant with long-term use of organic fertilizers. At the same time, the humus reserves in the meter layer increased relative to the other variants of the experiment. Oligonitrophils and ammonifiers was dominated in the composition of the microflora, by while the proportion of actinomycetes sharply decreased. The value of Ka and its reserves decreased. Bacteria using mineral nitrogen and oligonitrophils are predominance in variants with with long-term use of mineral fertilizers. The intensification of microbiological activity caused an increase enrichment catalase and an increase in its reserves in soil. The lack of fresh organic matter input led to increased mineralization processes of specific soil organic compounds. This variant is characterized by the lowest humus content.

Keywords: soil, humus content, humus reserves, microflora, catalase activity

For citation: Purtova L.N., Kiseleva I.V., Timofeeva Ya.O., Emelyanov A.N., Timoshinov R.V. Changes in the Humus Content and Biological Activity of Agro-Dark-Humus Podbel under Various Agrotechnical Methods of Tillage. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science.* 2022;(3):139-150. (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

Оценка биологической активности почв при изучении природных и антропогенно нарушенных экосистем в настоящее время приобретает все большую актуальность. Предложены интегральные показатели, позволяющие на основе комплекса биотических и физико-химических параметров оценивать экологическое состояние почв [1]. Из параметров биологической активности, наряду с исследованием микрофлоры почв, наиболее широко используются биохимические показатели – ферментативная активность [2, 3]. Активность почвенных ферментов затрагивает циклы превращения углерода, фосфора, серы, окислительно-восстановительные процессы. К одному из таких ферментов, участвующих в этих процессах, относится каталаза (Ka). Каталазная активность широко используется в качестве диагностического показателя при оценке экологиче-

ского состояния почв и четко отражает степень воздействия антропогенеза. Ка – фермент, относящийся к классу оксидоредуктаз. Эти ферменты катализируют окислительно-восстановительные реакции и играют ведущую роль в биохимических процессах как в клетках живых организмов, так и в почве. Каталаза разлагает ядовитую для клеток перекись водорода, образующуюся в процессе дыхания живых организмов и в результате различных биохимических реакций окисления органических веществ, на воду и молекулярный кислород [4].

Активность ферментов связана с физико-химическими параметрами почв – pH, содержанием гумуса. Вопросам исследования каталазной активности почв посвящен довольно обширный ряд публикаций [5–10]. Методические вопросы определения показателей каталазной активности изложены в ряде статей [1, 7, 11]. Значительное количество работ посвящено вопросам формирования ферментативной активности и факторам, на неё влияющим [12–15].

В географическом плане каталазная активность исследована в довольно широком спектре: в почвах Северного Кавказа [16], в черноземе выщелоченном в лесостепной зоне Зауралья [17], в черноземах Русской равнины [5], в подзолистых текстурно-дифференцированных почвах среднетаежных лесов Коми [18]. Данными по каталазной активности почв дальневосточного (ДВ) региона установлено, что их особенностью является низкая и средняя обогащенность поверхностных горизонтов Ка [19–21].

Между тем не уделялось должного внимания изучению активности каталазы Ка с учетом морфологических характеристик почвенных горизонтов и функционирования микрофлоры при различных видах агротехнического воздействия, влияющих на интенсивность и направленность процессов разложения микрофлорой органического вещества почв и протекания процессов гумусообразования. Это весьма затрудняет объективную оценку уровня плодородия и оптимизации гумусного и экологического состояния пахотных почв региона. На территории юга Дальнего Востока подобные работы не проводились.

Цель работы – исследование изменений содержания гумуса, состава микрофлоры и каталазной активности агротемногумусовых подбелов при различной системе агротехнической обработки. В задачи исследований входили:

1. Изучение содержания и запасов гумуса.
2. Исследование микрофлоры почв.
3. Определение каталазной активности, запасов и среднепрофильного распределения Ка.

Объект и методы исследований

Объектом исследований служили агротемногумусовые подбелы, сформированные на пашне стационарного опыта ФНЦ агробιοтехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, п. Тимирязевский Уссурийского района Приморского края. В работе использованы названия почв согласно [22]. Ниже приведены местоположение и формулы строения профиля исследуемых почв.

Разрез № 1 расположен на поле в условиях длительного фитомелиоративного опыта в течение 15-летнего периода с посевом костреца безостого (*Bromus inermis*). Почва характеризовалась следующим набором генетических горизонтов: PU (0–11 см) – PUel,nn (11–27 см) – ELnn (27–49 см) – VTnn,g (49–83 см) – VTg (83–112 см) – Cg (112 см и ниже). Почва – агротемногумусовый подбел глееватый.

Разрез № 2 заложен на залежи (возраст 85 лет, ведется покос трав). Почва сформирована под травянистой растительностью, представленной преимущественно пыреем ползучим (*Elytrigia répens*) с примесью полыни, одуванчика. Почва характеризовалась следующим строением: PU₀ (0–4 см), PU (4–11 см) – PU-ELnn (11–35 см) – ELnn (35–55 см) – VTnn (55–111) – VT (111–153 см) – C (153 см и ниже). Почва – агротемногумусовый подбел типичный.

Разрез № 3 заложен на поле после вспашки с длительным применением органических удобрений (в течение 62 лет удобряется навозом). Морфологический профиль характеризовался следующим набором генетических горизонтов: PU (0–27 см) – ELnn,g (27–42) – VTnn,g (42–91) – G (91–132) – CG (132 см и ниже). Почва – агротемногумусовый подбел глеевый типичный.

Разрез № 4 заложен на пашне с применением минеральных удобрений на протяжении 80 лет, вносимых в форме суперфосфата, хлористого калия и аммиачной селитры. Почвенный профиль дифференцирован на горизонты: PU (0–30 см) – ELnn,g (30–46) – VTnn,g (46–83) – G (83–119 см и ниже). Почва – агротемногумусовый подбел глеевый типичный.

Почвы имели различия в мощности генетических горизонтов и характеризовались различным содержанием почвенных железомарганцевых новообразований – ортштейнов. Учёт количества ортштейнов был проведен по генетическим горизонтам почв всех исследованных вариантов опыта методом мокрого просеивания с учётом массы и объема почвенного монолита, отобранного для выделения ортштейнов [21].

При исследовании физико-химических свойств почв использовали общепринятые методы в почвоведении. Кислотность (pH_{H_2O} , pH_{KCl}) определяли потенциометрически на рН-метре ОР-264, содержание углерода исследовали по методу Тюрина [23]. Каталазную активность почв оценивали газометрически [4]. Оценка содержания и запасов гумуса проведена в соответствии с рекомендациями в [24]. Запасы активности Ка по профилю почв рассчитывали с учетом активности Ка (a), мощности горизонта (b), плотности сложения исследуемого горизонта (d) по методике из [7] по формуле запасы $Ka=a \times b \times d$.

Данный метод расчета позволяет получить более корректное представление об обогащенности почв ферментами Ка в исследуемом горизонте (слое) почв с учетом его морфологических характеристик. Плотность сложения почв определялась весовым методом [25].

Численность микроорганизмов различных эколого-трофических групп определяли классическим методом посева почвенной суспензии на агаризованные питательные среды различного состава: мясо-пептонный агар (МПА) – микроорганизмы-аммонификаторы, разлагающие органические соединения азота (белки), использующие органический азот; крахмало-аммиачный агар (КАА) – амилолитические микроорганизмы (актиномицеты и бактерии), деструкторы безазотистых органических соединений, использующие для своей жизнедеятельности минеральные формы азота; среда Эшби – олигонитрофильные микроорганизмы – способны расти в условиях незначительного количества доступного азота в почвенном растворе и разлагать гумусовые соединения почвы; среда Чапека – микроскопические грибы. Численность микроорганизмов выражали в колониеобразующих единицах (КОЕ) на 1 г образца.

Математическую обработку данных проводили по общепринятым методикам с применением программ Statistica (версия 13.3) и Microsoft Excel 2007.

Результаты и обсуждение

Согласно схеме географического районирования, исследуемая территория приурочена к лесостепной зоне [26]. Резко континентальный с муссонными чертами климат характеризуется влажным и теплым летом и довольно суровой и малоснежной зимой, что определяет глубокое промерзание почв. Юго-восточные ветра, господствующие летом, обуславливают максимум осадков, которые приходятся на июль-август [27]. Неравномерное выпадение осадков в течение года вызывает сильное переувлажнение почв летом, создавая в них большие контрасты окислительно-восстановительных процессов [28]. Исследуемые почвы приурочены к Приморской юго-западной гидротермической провинции [29], для которой характерны высокие показатели выпадения осадков (до 800 мм), радиационного баланса ($52,2$ ккал/см² в год) и затрат энергии на почвообразование ($44,9$ ккал/см² в год) [30]. Основной объем осадков выпадает в период вегетации растений (315–780 мм), что нередко вызывает переувлажнение почв и накладывает отпечаток на их биологическую активность и протекание процесса гумусообразования.

Наличие контрастной смены окислительно-восстановительных режимов в почвах способствует активному образованию ортштейнов (табл. 1). Вертикальное распределение ортштейнов по профилю почв всех вариантов опыта характеризуется увеличением их содержания от верхней части профиля (горизонт PU) к средней (горизонт ELnn/Elnn,g) с последующим резким снижением в нижележащих горизонтах, что связано с более контрастной сменой окислительно-восстановительных условий в двух верхних горизонтах. Обилие ортштейнов в почвах в значительной степени определяет проявление каталазной активности почв в целом и, как следствие, оказывает влияние на общий ход протекания процессов гумусообразования [21].

Гумусообразование в варианте фитомелиоративного опыта, судя по данным рН, протекало в условиях близкой к нейтральной реакции среды (табл. 1). Высокие значения рН, на наш взгляд, связаны с проведенным ранее известкованием почв при посеве трав. Как показали ре-

зультаты исследований, содержание гумуса в агротемногумусовом подбеле глееватом, сформированном в условиях длительного фитомелиоративного опыта с посевом костреча безостого, низкое в горизонте PU и очень низкое – в нижележащих горизонтах (табл. 2).

Таблица 1

**Показатели кислотности и содержание ортштейнов в агротемногумусовых подбелах
 / The indicators acidity and content nodules of agro-dark-humus podbel**

Горизонт	Глубина, см	pH _{H2O}	pH _{KCl}	Ортштейны, % от массы почвы
Р. 1. Фитомелиоративный опыт				
PU	0–11	7,14±0,16*	6,27±0,15	12,30±0,59
PU–ELnn	11–27	7,81±0,22	6,80±0,18	17,82±0,86
ELnn	27–49	7,97±0,23	6,79±0,18	21,83±1,03
BTnn,g	49–83	8,02±0,27	6,04±0,11	5,49±0,23
BTg	83–112	7,94±0,26	5,87±0,12	1,85±0,09
C	112–122 и ниже	7,68±0,20	5,38±0,09	–
Р. 2. Залежь				
PU	4–11	5,86±0,12	5,08±0,10	16,83±0,71
PU–ELnn	11–35	6,13±0,13	5,10±0,11	27,52±1,08
ELnn	35–55	6,20±0,11	4,72±0,07	34,40±1,39
BTnn	55–111	6,16±0,11	4,46±0,08	6,08±0,28
BT	111–153	6,62±0,14	4,65±0,09	2,96±0,10
Cg	153–192 и ниже	7,02±0,15	4,80±0,09	–
Р. 3. Опыт с внесением органических удобрений				
PU	0–27	5,79±0,12	4,66±0,08	6,83±0,24
ELnn,g	27–42	5,62±0,10	4,71±0,08	9,09±0,41
BTnn,g	42–91	5,94±0,11	4,51±0,06	3,27±0,13
G	91–132	6,28±0,13	4,42±0,05	0,84±0,03
CG	132–170и ниже	6,94±0,15	4,72±0,07	–
Р. 4. Опыт с внесением минеральных удобрений				
PU	0–30	6,16±0,08	5,34±0,07	16,54±0,70
ELnn,g	30–46	6,60±0,11	5,18±0,09	17,82±0,88
BTnn,g	46–83	6,32±0,10	4,81±0,07	4,17±0,017
G	83–119 и ниже	6,39±0,12	4,67±0,06	–

* Среднее арифметическое значение ± значение среднего квадратического отклонения.

В почвах фитомелиоративного варианта опыта наиболее развита амилитическая часть почвенного микробоценоза (интенсивно протекают процессы иммобилизации азота) (рисунок). Подобная закономерность отмечалась нами в ранее проведенной работе [31]. Это способствовало усилению процессов минерализации органического вещества микрофлорой, что выразилось в снижении содержания гумуса. В целом степень обогащенности почвы микрофлорой оценивается как богатая по шкале из [32]. Обогащенность почв Ка низкая, однако в горизонте ELnn отмечалось резкое увеличение (до средних показателей) активности Ка. Связано это, на наш взгляд, с наличием ортштейнов, способствующих усилению процесса катализа H₂O₂ и выделению кислорода при определении Ка.

Гумусообразование в агротемногумусовом подбеле типичном (почва находилась длительное время в залежи) протекало в условиях слабокислой реакции среды. Содержание гумуса возросло до 5,48 %, что соответствовало уровню ниже средних значений. Этому во многом способствовало значительное поступление органического углерода растительного происхождения как при покосе трав, так и с отмиранием корневой массы растений. Это повлекло за собой возрастание активности микрофлоры и выразилось в увеличении численности аммонификаторов, приводящее к большей обеспеченности почв аммиачным азотом (рисунок). В результате резко возросла численность бактерий, использующих минеральный азот (среда КАА). Следует отметить и

рост олигонитрофилов (среда Эшби), участвующих в превращении азота. Биогенность (суммарное количество микроорганизмов, культивируемых на средах МПА, КАА, Эшби, Чапека) почв залежей существенно выше (108044 тыс. КОЕ/1 г почвы) по сравнению с остальными вариантами опыта (фитомелиоративный опыт – 36785, внесение минеральных удобрений – 35741, внесение органических удобрений – 30980 тыс. КОЕ/1 г почвы).

Таблица 2

**Содержание, запасы гумуса и каталазная активность в агротемногумусовых подбелах
 / Content, stocks of humus and catalase activity in agro-dark-humus podbel**

№ разреза, почва	Горизонт, см	Гумус, %	Запасы гумуса, т/га		Ка, см ³ О ₂ /1 г почвы за 1 мин	Запасы Ка О ₂ см ³ за 1 мин
			20 см	100 см		
Р. 1. Фитомелиоративный опыт	PU (0–11)	3,52±0,15	60,2±3,01	116,3±5,81	2,00±0,1	19,8±1,00
	PUelnn (11–27)	2,69±0,10			2,50±0,11	41,6±2,10
	Elnn (27–49)	1,45±0,07			9,90±0,50	299,4±15,0
	BTnn,g (49–83)	0,01±0,00			8,00±0,40	310,0±15,5
	BTg (83–112)	0,01±0,00			1,90±0,10	41,9±2,10
Р. 2. Залежь	PU (4–11)	5,48±0,27	73,4±3,70	145,8±7,29	5,60±0,28	38,8±1,94
	PU-Elnn (11–35)	4,14±0,21			4,10±0,21	93,5±4,67
	ELnn (35–55)	0,10±0,01			1,10±0,05	24,2±1,21
	BTnn (55–111)	0,21±0,01			0,90±0,03	59,9±2,90
	BT (111–153)	0,01±0,00			1,90±0,09	95,6±4,80
Р. 3. Опыт с внесением органических удобрений	PU (0–27)	3,83±0,19	67,4±3,50	183,8±9,20	1,10±0,05	26,1±1,31
	Elnn,g (27–42)	3,72±0,18			0,70±0,03	12,4±0,60
	BTnn (42–111)	0,41±0,02			0,40±0,01	18,6±0,95
	G (91–132)	1,03±0,05			0,30±0,01	13,5±0,67
	CG (132–170)	0,93±0,04			0,10±0,00	4,6±0,23
Р. 4. Опыт с внесением минеральных удобрений	PU (0–30)	1,20±0,05	25,2±1,30	118,1±5,90	2,00±0,10	63,0±3,10
	Elnn,g (30–46)	0,93±0,04			0,70±0,03	15,2±0,80
	BTnn,g (46–83)	1,55±0,08			0,50±0,01	23,3±1,16
	G (83 и ниже)	0,72±0,03			0,50±0,02	21,6±1,08

Зафиксировано резкое возрастание каталазной активности в почвах залежей до средних показателей в горизонте PU по сравнению с агротемногумусовым подбелом глееватым фитомелиоративного опыта. Связано это с большей гумусированностью горизонта PU и активизацией процесса трансформации органического вещества микрофлорой почв.

Вниз по профилю содержание гумуса снижалось до очень малых значений. Характер внутрипрофильного распределения был резко убывающим. Обогащенность Ка горизонта Elnn из-за снижения содержания гумуса бедная, а BTnn – очень бедная (табл. 2). Запасы гумуса как в агротемногумусовом подбеле глееватом, так и в агротемногумусовом подбеле типичном в слое 0–20 см и метровой толще, согласно оценочным грациям [24], низкие. Установлено возрастание запасов гумуса в слоях 0–20 и 0–100 см почв агротемногумусового подбела, находящихся в залежном состоянии, по сравнению с агротемногумусовым подбелом глееватым, сформированным в условиях фитомелиоративного опыта (с 60,2 до 73,4 т/га; с 116,3 до 145,8 т/га). На наш взгляд, это обусловлено большим поступлением органического углерода с остатками растительного происхождения с корневой и надземной фитомассой.

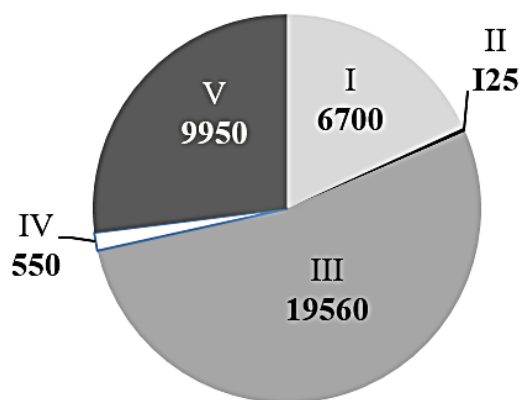
В агротемногумусовом подбеле глеевом (вариант опыта с длительным внесением органических удобрений) содержание гумуса низкое. Характер внутрипрофильного распределения – неравномерный. Небольшое возрастание содержания гумуса (с 0,41 до 1,03 %) установлено в горизонте G из-за миграции гумусовых соединений из горизонта BTg в результате возникновения периодического переувлажнения почв. Внесение органического вещества животного происхождения вызвало увеличение численности олигонитрофилов и аммонификаторов, активно участвующих в трансформации органических азотсодержащих соединений (рисунок). Интенсивность

процессов иммобилизации азота в этом варианте опыта снижалась, что отразилось в снижении коэффициента минерализации (КМ).

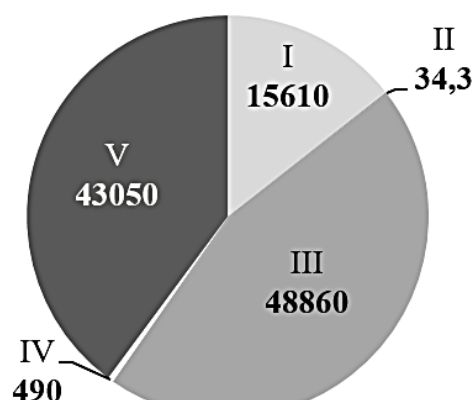
В агротемногумусовом подбеле глеевом, используемом в опыте с длительным применением минеральных удобрений, отмечена явно выраженная дифференциация профиля по величине $pH_{КС1}$ (табл. 1). Кислотность почв изменялась со слабокислой в поверхностных горизонтах до кислой в нижележащих. Содержание гумуса в горизонте PU достигало малых значений. В горизонте ELn_n,g из-за выноса гумусовых соединений в связи с протеканием процесса отбеливания [33] количество гумуса снижалось до очень малых показателей с последующим возрастанием (с 0,93 до 1,55 %) в горизонте BTn_n,g.

Внесение минеральных удобрений привело к заметному увеличению численности аммонификаторов и бактерий, использующих минеральный азот. Недостаток органического вещества приводил к чрезмерной активизации разложения специфических органических соединений почвы актиномицетами и олигонитрофилами. Это выразилось в резком снижении содержания гумуса по сравнению с другими вариантами опыта.

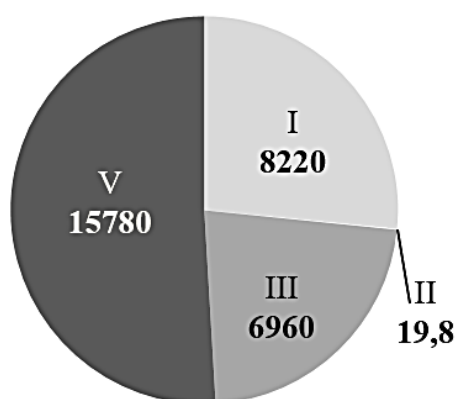
Обогащенность горизонта PU Ка – бедная. Вниз по профилю каталазная активность уменьшалась до очень бедной. Характер распределения Ка по профилю – резко убывающий.



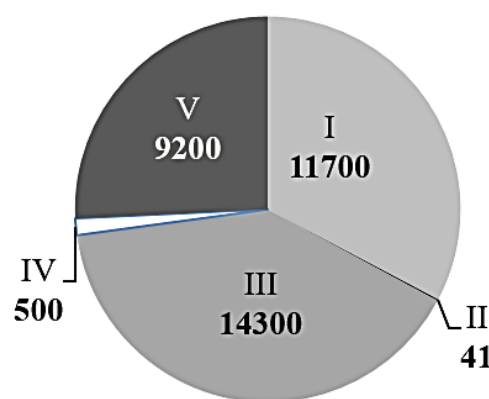
Фитомелиоративный опыт



Залежь



Опыт с внесением органических удобрений



Опыт с внесением минеральных удобрений

Численность и групповой состав микроорганизмов в агротемногумусовых подбелах (тыс. КОЕ/ 1 г почвы): I – аммонификаторы; II – грибы; III – бактерии, использующие минеральный азот; IV – актиномицеты; V – олигонитрофилы / The number and group composition of microorganisms in agro-dark-humus podbel (thousand CFU / 1 g of soil):

I - ammonifiers; II - mushrooms; III - bacteria, that use mineral nitrogen;

IV - actinomycetes; V - oligonitrophils

Коэффициент корреляции (r) для пары Ка – гумус в почвах залежи составил +0,99, в почвах опыта с использованием минеральных удобрений – 0,96. С применением органических удобрений коэффициент корреляции снижался до +0,86. Высокий уровень положительной корреляционной связи выявлен между показателями Ка и величиной обменной кислотности (r от 0,80 до 0,91) в почвах, характеризующихся слабокислой реакцией среды почвенного раствора. Подобная закономерность отражена в ряде работ по изучению ферментативной активности черноземов, дерново-подзолистых, темно-серых и серых лесных почв различных регионов РФ [17, 34]. При этом мнения различных авторов расходились. Одни утверждали, что оптимальным значением для действия Ка является реакция среды почвенного раствора, близкая к нейтральной [12]. Результаты исследований других авторов свидетельствовали о снижении каталазной активности в почвах при подщелачивании почвенного раствора [17]. Между тем наибольшая активность каталазы была зафиксирована в почвах залежи, характеризующихся менее щелочной реакцией среды. Вероятной причиной этому является смещение катионно-анионного равновесия почвенного раствора при подкислении среды, что приводит к повышению активности фермента.

Распределение Ка с учетом плотности сложения и мощности горизонтов во всех исследуемых почвах носило неравномерный характер. Обогащенность Ка горизонта PU, согласно оценочным грациям [7], была очень бедной во всех исследуемых почвах (табл. 2). Возрастание запасов Ка зафиксировано в горизонтах EL_{np} и BT_{np} агротемногумусовых подбелов. Особенно яркое проявление это нашло в агротемногумусовом подбеле глееватом, сформированном в условиях длительного фитомелиоративного опыта (Р. 1). Это, на наш взгляд, связано с обилием ортштейнов в горизонтах EL_{np} и BT_{np}. В агротемногумусовом подбеле типичном (Р. 2) установлено возрастание запасов Ка до средних величин с последующим снижением в EL_{np} и возрастанием в BT_{np}. При этом обогащенность Ка оставалась бедной. В агротемногумусовых подбелах глеевых с длительным применением органических (Р. 3) и минеральных (Р. 4) удобрений наибольшие величины запасов Ка свойственны горизонту PU. Вниз по профилю её запасы изменялись от бедных до очень бедных. Согласно полученным данным о средних показателях внутрипрофильного распределения и запасов Ка, почвы, сформированные в условиях длительного фитомелиоративного опыта и находящиеся в залежи (Р. 1, Р. 2), явно отличались по среднепрофильным показателям обогащенности Ка от почв с применением органических и минеральных удобрений (табл. 3).

Таблица 3

**Среднепрофильные характеристики каталазной активности и ее запасы
/ The average profile characteristics of catalase activity and its reserve**

№ разреза, почва	Ка см ³ O ₂ /1г почвы за 1 мин	Запасы Ка O ₂ см ³ за 1 мин
Р. 1. Агротемногумусовый подбел глееватый	4,86±0,24	140,9±7,0
Р. 2. Агротемногумусовый подбел типичный	2,72±0,15	62,4±3,2
Р. 3. Агротемногумусовый подбел глеевый типичный	0,52±0,03	15,0±0,8
Р. 4. Агротемногумусовый подбел глеевый типичный	0,92±0,04	30,8±1,5

По средним показателям внутрипрофильного распределения Ка в исследуемых почвах был установлен ряд: фитомелиоративный опыт > залежь > опыт с внесением минеральных удобрений > опыт с внесением органических удобрений. По средним параметрам изменения запасов Ка по профилю подобная закономерность сохранялась.

Заключение

Исследуемые почвы с различным уровнем агротехнического воздействия и применением экологически чистых (фитомелиоративных) приемов повышения плодородия различались по содержанию и запасам гумуса, функционированию микрофлоры и обогащенности ферментами (Ка). В почвах залежей установлены более высокие показатели содержания гумуса (из-за значитель-

ного поступления органического вещества с корневой массой растительных остатков), более высокая (до средних значений) обогатенность Ка и биогенность. В составе микрофлоры преобладали амилотическая и олигонитрофильная части. Увеличился КМ углеводов почвы и иммобилизации азота.

В почвах, сформированных в условиях длительного фитомелиоративного опыта, в связи с усилением процессов минерализации свежего органического вещества содержание гумуса и его запасы снижались. Протекание процесса образования оргштейнов в этих почвах способствовало возрастанию уровня каталазной активности (до $9,9 \text{ см}^3 \text{ O}_2/\text{за } 1 \text{ мин } 1 \text{ г}$ почвы). Это нашло отражение в возрастании как средних показателей внутрипрофильного распределения Ка, так и её запасов. В почвах данного варианта опыта наиболее развитой является амилотическая часть почвенного микробсообщества. При этом КМ находился на уровне высоких значений.

При длительном применении органических удобрений в почвах зафиксировано низкое содержание гумуса, однако его запасы в метровом слое по сравнению с другими вариантами возрастали. Это обусловлено переходом системы гумусовых веществ в более стабильное состояние в связи с применением органических удобрений. В составе микрофлоры произошли изменения – доминирующими являлись олигонитрофиллы и аммонификаторы, резко снижалась численность актиномицетов. Интенсивность процессов иммобилизации азота уменьшалась, $\text{КМ} < 1$. Среднепрофильные значения Ка и её запасы уменьшились по сравнению с почвами залежей.

При длительном применении минеральных удобрений содержание гумуса в почвах снижалось до малых значений. Недостаток органического вещества приводил к активизации процессов разложения гумуса актиномицетами и олигонитрофилами. Усиление микробиологической деятельности вызвало возрастание обогатенности почв Ка. Среднепрофильные значения Ка и её запасов увеличивались.

Таким образом, в зависимости от уровня агротехнического воздействия на почвы изменялись интенсивность и направленность процессов разложения органического вещества микрофлорой, что нашло свое отражение в изменении содержания и запасов гумуса и каталазной активности. Для оптимизации почвенных процессов трансформации органического вещества и активизации гумусообразования необходимо комплексное агротехническое воздействие с применением как минеральных, так и органических удобрений.

Список источников

1. 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.
2. Laren A.D. Soil as a system of bound enzymes // Chem. Ind. 1974. № 7. P. 28–30.
3. Хазиев Ф.Х. Функциональная роль ферментов в почвенных процессах // Вестн. Акад. наук Республики Башкортостан. 2015. Т. 20, № 2. С. 14–24.
4. Методы почвенной микробиологии и биохимии / под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: МГУ, 1991. 304 с.
5. Девятова Т.А., Щербаков А.П. Биологическая активность черноземов центра Русской равнины // Почвоведение. 2006. № 4. С. 502–508.
6. Гарбуз С.А., Ярославцева Н.В., Холодов В.А. Ферментативная активность внутри и снаружи водостойчивых агрегатов в почвах разного вида использования // Почвоведение. 2016. № 3. С. 398–407. Doi: 10.7868/S0032180X16030035.
7. Звягинцев Д.Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. 1978. № 6. С. 48–54.
8. Дубровина И.А. Влияние биоугля на агрохимические показатели и ферментативную активность почв средней тайги Карелии // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1523–1534. Doi: 10.31857/S0032180X21120054.
9. Колесников С.И., Дульцев А.Н., Вернигорова Н.А., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В., Тер-Мисакянц Т.А. Биодиагностика устойчивости рисовых почв Кубани к химическому загрязнению // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2017. № 2. С. 57–62.
10. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Вальков В.Ф. Биологическая диагностика и индикация почв: методология и методы исследований. Ростов н/Д.: Изд-во РГУ, 2003. 204 с.
11. Мартиросян И.А., Геворкян М.Г. Оценочные определения каталазной активности почв // Почвоведение. 2005. № 1. С. 98–103.

12. Товстик Е.В., Олькова А.С. Оценка влияния факторов абиотической природы на ферментативную активность почвы // Экобиотехнологии. 2021. Т. 4, № 2. С. 128–134.
13. Пуртова Л.Н., Щапова Л.Н., Иншакова С.Н., Емельянов А.Н. Влияние фитомелиорации на плодородие агрообразцов Приморья // Аграрный вестн. Урала. 2012. № 10. С. 10–12.
14. Колесников С.И., Тлехас З.Р., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Изменение биологических свойств почв Адыгеи при химическом загрязнении // Почвоведение. 2009. № 12. С. 1499–1505.
15. Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J., Sinsabaugh R.L., Stromberger M.E., Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Zoppini A. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions // Soil Biol. Biochem. 2013. Vol. 58. P. 216–234. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009>.
16. Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Методология исследования биологической активности почв на примере Северного Кавказа // Науч. мысль Кавказа. 1999. № 1. С. 32–37.
17. Евсеев В.В. Микробиологическая активность чернозема выщелоченного в зернопаровом и кормовом севооборотах лесостепной зоны Зауралья // Аграрный вестн. Урала. 2005. Т. 25, № 1. С. 54–56.
18. Перминова Е.М., Лаптева А.М. Каталазная активность подзолистых почв коренного ельника черничного и разновозрастных листовенно-хвойных сообществ // Аграрный вестн. Урала. 2018. № 5. С. 44–53.
19. Голодяев Г.П. Биологическая активность горно-лесных почв южного Приморья // Вопросы численности, биомассы и продуктивности почвенных микроорганизмов. Л.: Наука, 1972. С. 240–246.
20. Щапова Л.Н. Микрофлора почв юга Дальнего Востока России. Владивосток: Изд-во ДВО РАН, 1994. 172 с.
21. Пуртова Л.Н., Тимофеева Я.О. Характеристика мелкозема и ортштейнов агрогенных почв южной части Приморского края: физико-химические, оптические свойства, каталазная и каталитическая активность // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1481–1491.
22. Классификация и диагностика почв России / авт. и сост.: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
23. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
24. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918–926.
25. Агрофизические методы исследования почв. М.: Наука, 1966. 256 с.
26. Колесников Б.П. Растительность // Природные условия и естественные ресурсы СССР. Южная часть Дальнего Востока. М.: Наука, 1969. С. 206–250.
27. Витвицкий Г.Н. Климат // Природные условия и естественные ресурсы СССР. Южная часть Дальнего Востока. М.: Наука, 1969. С. 70–96.
28. Костенков Н.М. Окислительно-восстановительные режимы в почвах периодического переувлажнения. М.: Наука, 1987. 192 с.
29. Степанько А.А. Агрогеографическая оценка земельных ресурсов и их использование в районах Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 1992. 115 с.
30. Пуртова Л.Н., Костенков Н.М. Содержание органического углерода и энергозапасы в почвах природных и агрогенных ландшафтов юга Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2009. 123 с.
31. Пуртова Л.Н., Киселева И.В., Щапова Л.Н. Влияние фитомелиорации на процессы гумусоаккумуляции и микрофлору агрогенных почв Приморья / отв. ред. В.И. Голов. Владивосток: Дальневост. фед. ун-т, 2021. 109 с. Doi: <https://doi.org/10.25221/agrosoils>.
32. Титова В.И., Козлов А.В. Методы оценки функционирования микробоценоза почвы, участвующего в трансформации органического вещества. Н. Новгород: Нижегородская с.-х. академия, 2012. 64 с.
33. Иванов Г.И. Почвообразование на юге Дальнего Востока. М.: Наука, 1976. 201 с.
34. Еремченко О.З., Шестаков И.Е., Митракова Н.В. Использование биологических показателей при оценке биогеоценологических функций почв // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=728> (дата обращения: 11.05.2021).

References

1. 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.).
2. Laren A.D. Soil as a system of bound enzymes. *Chem. Ind.* 1974;(7):28-30.
3. Khaziev F.Kh. Functional role of enzymes in soil processes. *Vestn. Akad. nauk Respubliki Bashkortan = The Herald of the ASRB*. 2015;20(2):14-24. (In Russ.).
4. Zvyagintsev D.G., ed. *Methods of soil microbiology and biochemistry*. Moscow: Moscow State University Press; 1991. 304 p. (In Russ.).
5. Devyatova T.A., Shcherbakov A.P. Biological activity of chernozems in the center of the Russian Plain. *Eurasian Soil Science*. 2006;39(4):450-456, doi: 10.1134/S1064229306040120.

6. Garbuz S.A., Yaroslavtseva N.V., Kholodov V.A. Enzymatic activity inside and outside of water-stable aggregates in soils under different land use. *Eurasian Soil Science*. 2016;49:367-375, doi: 10.7868/S0032180X16030035.
7. Zvyagintsev D.G. Biological activity of soils and scales for assessing some of its indicators. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 1978;(6):48-54. (In Russ.).
8. Dubrovina I.A. Effects of biochar on the agrochemical indicators and enzyme activity of soils in the middle taiga of Karelia. *Eurasian Soil Science*. 2021;54(12):1957-1966, doi: 10.1134/S106422932112005X.
9. Kolesnikov S.I., Dultsev A.N., Vernigorova N.A., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V., Ter-Misakyants T.A. Biodiagnostics of resistance of rice soils of the Kuban to chemical pollution. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Estestv. nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Science*. 2017;(2):57-62. (In Russ.).
10. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Valkov V.F. *Biological diagnostics and indication of soils: methodology and research methods*. Rostov-on-Don: Rostov State University Press; 2003. 204 p. (In Russ.).
11. Martirosyan I.A., Gevorkyan M.G. On the methodology of determining the catalase activity of soils. *Eurasian Soil Science*. 2005;38(1):89-94.
12. Tovstik E.V., Olkova A.S. Evaluation of the influence of factors of abiotic nature on the enzymatic activity of the soil. *Ecobiotech*. 2021;4(2):128-134. (In Russ.).
13. Purtova L.N., Shchapova L.N., Inshakova S.N., Emelyanov A.N. Influence of phytomelioration on the fertility of agroabrazems of Primorye. *Agrarnyi vestn. Urala = Agrarian Bulletin of the Urals*. 2012;(10):10-12. (In Russ.).
14. Kolesnikov S.I., Tlekhaz Z.R., Kazeev K.Sh., Valkov V.F. Chemical contamination of Adygea soils and changes in their biological properties. *Eurasian Soil Science*. 2009;42(12):1397-1403, doi: 10.1134/S1064229309120102.
15. Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J., Sinsabaugh R.L., Stromberger M.E., Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Zoppini A. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. *Soil Biol. Biochem*. 2013;58:216-234, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009>.
16. Val'kov V.F., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Methodology for studying the biological activity of soils on the example of the North Caucasus. *Nauch. mysl' Kavkaza = Scientific Thought of Caucasus*. 1999;(1):32-37. (In Russ.).
17. Evseev V.V. Microbiological activity of leached chernozem in grain-fallow and fodder crop rotations of the forest-steppe zone of the Trans-Urals. *Agrarnyi vestn. Urala = Agrarian Bulletin of the Urals*. 2005;25(1):54-56. (In Russ.).
18. Perminova E.M., Lapteva A.M. Catalase activity of podzolic soils of native bilberry spruce forest and mixed-age deciduous-coniferous communities. *Agrarnyi vestn. Urala = Agrarian Bulletin of the Urals*. 2018;(5):44-53. (In Russ.).
19. Golodyaev G.P. Biological activity of mountain forest soils of southern Primorye. *Questions of abundance, biomass and productivity of soil microorganisms*. Leningrad: Nauka Publ.; 1972:240-246. (In Russ.).
20. Shchapova L.N. *Soil microflora in the south of the Russian Far East*. Vladivostok: Far Eastern Branch Press, Russian Academy of Sciences; 1994. 172 p. (In Russ.).
21. Purtova L.N., Timofeeva Ya.O. Fine earth and nodules in agrogenic soils from the south of Primorskii region: physicochemical and optical properties, catalase and catalytic activity. *Eurasian Soil Science*. 2021;54(12):1855-1863, doi: 10.1134/S1064229321120097.
22. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimov M.I. *Classification and diagnostics of Russian soils*. Smolensk: Oikumena Publ.; 2004. 342 p. (In Russ.).
23. Arinushkina E.V. *Guide to the chemical analysis of soils*. Moscow: Moscow State University Press; 1970. 487 p. (In Russ.).
24. Orlov D.S., Biryukova O.N., Rozanova M.S. Revised system of the humus status parameters of soils and their genetic horizons. *Eurasian Soil Science*. 2004;37(8):798-805.
25. *Agrophysical methods of soil research*. Moscow: Nauka Publ.; 1966. 256 p. (In Russ.).
26. Kolesnikov B.P. Vegetation. *Natural conditions and natural resources of the USSR. Southern part of the Far East*. Moscow: Nauka Publ.; 1969:206-250. (In Russ.).
27. Vitvitsky G.N. Climate. *Natural conditions and natural resources of the USSR. Southern part of the Far East*. Moscow: Nauka Publ.; 1969:70-96. (In Russ.).
28. Kostenkov N.M. *Redox regimes in soils of periodic waterlogging*. Moscow: Nauka Publ.; 1987. 192 p. (In Russ.).
29. Stepanko A.A. *Agrogeographic assessment of land resources and their use in the regions of the Far East*. Vladivostok: Dalnauka Publ.; 1992. 115 p. (In Russ.).
30. Purtova L.N., Kostenkov N.M. *Organic carbon content and energy reserves in soils of natural and agrogenic landscapes in the south of the Russian Far East*. Vladivostok: Dalnauka Publ.; 2009. 123 p. (In Russ.).

31. Purtova L.N., Kiseleva I.V., Shchapova L.N. *Influence of phytomelioration on the processes of humus accumulation and microflora of agrogenic soils of Primorye*. V.I. Golov, ed. Vladivostok: Far East Federal University Press; 2021. 109 p., doi: <https://doi.org/10.25221/agrosoils> (In Russ.).
32. Titova V.I., Kozlov A.V. *Methods for assessing the state of microbiocenosis involved in the transformation of organic matter*. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod Agricultural Academy Press; 2012. 64 p. (In Russ.).
33. Ivanov G.I. *Soil formation in the south of the Far East*. Moscow: Nauka Publ.; 1976. 201 p. (In Russ.).
34. Eremchenko O.Z., Shestakov I.E., Mitrakova N.V. (). The use of biological indicators in assessing the biogeocenotic functions of soils. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2012;(6). Available from: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=728> [Accessed 11th May 2021]. (In Russ.).

Информация об авторах

Людмила Николаевна Пуртова – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, сектор органического вещества почв.

Ирина Владимировна Киселева – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.

Яна Олеговна Тимофеева – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник.

Алексей Николаевич Емельянов – кандидат сельскохозяйственных наук, директор.

Роман Витальевич Тимошинов – кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий отделом земледелия и агрохимии.

Information about the authors

Lyudmila N. Purtova - Doctor of Science (Biology), Leading Researcher, Organic Matter Sector.

Irina V. Kiseleva - Candidate of Science (Biology), Senior Researcher.

Yana O. Timofeeva - Candidate of Science (Biology), Leading Researcher.

Alexey N. Emelyanov - Candidate of Science (Agriculture), Director.

Roman V. Timoshinov - Candidate of Science (Agriculture), Head of the Department of Agriculture and Agrochemistry.

Статья поступила в редакцию 18.04.2022; одобрена после рецензирования 20.05.2022; принята к публикации 30.08.2022.
The article was submitted 18.04.2022; approved after reviewing 20.05.2022; accepted for publication 30.08.2022.

Над номером работали: Л.С. Ворович, Е.М. Колосова, В.И. Литвиненко, О.В. Назаренко, Н.Г. Шатравкина, М.С. Шипитко

Подписано в печать 28.09.2022. Выход в свет 30.09.2022. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Шрифт Times. Усл. печ. л. 17,2. Уч.-изд. л. 19,31. Тираж 250 экз. Заказ № 8638.

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 L.S. Vorovich, E.M. Kolosova, V.I. Litvinenko, O.V. Nazarenko, N.G. Shatravkina, M.S. Shipitko

Signed print September 28, 2022. The publication September 30, 2022. Format 60×84 1/8. Offset paper. Font Times.
Conv. print. sheets 17.2. Publ. sign. 19.31. Edition 250 copies. Order number 8638.

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. Текст должен быть набран в редакторе Microsoft Office Word 2000, 2003, 2007, 2010, 2016 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 10.18522/1026-2237-2022-3. Известия высших учебных заведений.
Северо-Кавказский регион. Естественные науки.

2022. № 3