

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

*Северо-Кавказский
регион*

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

НАУКИ

2015

3

Журнал основан в 1972 г. Ю.А. Ждановым

Главная редакция:

В.И. Колесников (главный редактор),
В.Е. Закруткин, В.С. Золотарев, А.В. Павленко (заместители главного редактора),
Е.А. Шинкаренко (отв. секретарь)

Редакционный совет:

В.А. Бабешко, Б.С. Карамурзов, В.И. Колесников, Ю.Ф. Коробейник, А.Г. Кусраев,
В.Г. Лобанов, Г.Г. Матишов, В.И. Минкин, М.Х. Рабаданов, Э.З. Эмирбеков

Редакционная коллегия:

В.Е. Закруткин – председатель редколлегии (д. г.-м.н., профессор), А.В. Абанин (д.ф.-м.н., профессор),
В.В. Внуков (д.б.н., профессор), Л.С. Ворович (к.ф.-м.н., доцент), Ю.М. Гуфан (д.ф.-м.н., профессор),
О.Н. Демина (д.б.н.), А.Г. Захаров (д.техн.н., профессор), Л.М. Зубов (д.ф.-м.н., профессор),
Я.М. Ерусалимский (д.ф.-м.н., профессор), С.Б. Климентов (д.ф.-м.н., профессор),
Г.В. Куповых (д.ф.-м.н., профессор), С.В. Курбатов (д.х.н., профессор), А.М. Лерер (д.ф.-м.н., профессор),
В.А. Миноранский (д.с.-х.н., профессор), А.Ф. Пожарский (д.х.н., профессор),
О.Д. Пряхина (д.ф.-м.н., профессор), З.А. Темердашев (д.х.н., профессор),
В.Н. Труфанов – зам. пред. редколлегии (д.г.-м.н., профессор), Ю.А. Устинов (д.ф.-м.н., профессор),
Ю.А. Федоров (д.г.н., профессор), С.П. Чернышева (к.ф.-м.н., доцент), О.М. Шабанов (д.х.н., профессор)

Учредители:

Министерство образования и науки Российской Федерации, Дагестанский государственный технический университет, Дагестанский государственный университет, Донской государственный технический университет, Кабардино-Балкарский государственный университет, Кубанский государственный технологический университет, Кубанский государственный университет, Пятигорский государственный лингвистический университет, Ростовский государственный строительный университет, Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростовский государственный экономический университет, Северо-Осетинский государственный университет, Северо-Кавказский федеральный университет, Южно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова, Южно-Российский институт управления Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, Южный федеральный университет

Над номером работали: Л.С. Ворович, В.И. Литвиненко, С.П. Чернышева, Н.Г. Шатравкина, М.С. Шипитко.

Подписано в печать 28.09.15.

Формат 60×84/8. Гарнитура "Таймс".

Усл. печ.л. 15,81. Уч.-изд. л. 16,32.

Тираж 200 экз. Заказ №

Адрес редакции и издателя: 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42,
Южный федеральный университет (для переписки). Тел. / факс главной редакции (863) 264-57-37,
E-mail: izvestiya@sfedu.ru

Адрес в Интернете: www.izvestiya.sfedu.ru

Адрес редколлегии серии «Естественные науки»: г. Ростов-на-Дону, ул. Пушкинская, 160, к. 118, тел. 264-57-37.

Адрес типографии: 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 111, Центр универсальной полиграфии.

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН

Регистрационный номер 011019
Комитета Российской Федерации по печати
Научно-образовательный и прикладной журнал
Издается с 1973 г.
Периодичность серии 4 номера в год
№ 3 (187) 2015 г.

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО- МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Авсянкин О.Г.</i> К вопросу об ограниченности многомерных интегральных операторов с однородными ядрами.....	5
<i>Аль Наджм М.Н.</i> О нетепловом радиоизлучении от протяженных галактических дисков.....	10
<i>Белявский Г.И., Кондратьева Т.Н., Мисюра В.В.</i> Нейросетевое имитационное моделирование скачкообразных процессов на примере устойчивых и умеренно устойчивых процессов.....	15
<i>Деундяк В.М., Жданова М.А.</i> О решении задачи оценивания скрытых полумарковских моделей фергюсоновского типа.....	19
<i>Жарашуев М.В., Гергоков А.Х.</i> Методика автоматической идентификации площади засева градовых облаков.....	25
<i>Каменецкий Е.С., Орлова Н.С., Волик М.В.</i> Исследование влияния амплитуды и частоты вибраций на структуру кипящего гранулированного слоя.....	31
<i>Клепфиш Б.Р.</i> Анализ чувствительности односекторной модели экономики, обладающей магистральным свойством.....	37
<i>Нестеров Н.Ю.</i> Весовые пространства векторнозначных аналитических функций... ..	41
<i>Паланджянц Л.Ж., Попова А.А., Куижева С.К.</i> О распределении концентраций ионов в двойном электрическом слое.....	47
<i>Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л., Канониди Х.Д., Канониди К.Х., Лиходеев Д.В., Преснов Д.А.</i> О дилатантных образованиях, участвующих в формировании корневых структур и выводящих каналов грязевых вулканов.....	53
<i>Чебаков М.И., Абрамович М.В., Колосова Е.М.</i> Контактная задача для трехслойного сферического шарнира.....	60

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Мирзоев Э.М.-Р., Магомедов И.А.</i> Борьба с опустыниванием земель аридных территорий методом аэрации почв.....	65
<i>Полоус В.С., Шурупов В.Г.</i> Адаптивные способы основной обработки почвы в звене зернопропашного севооборота.....	69
<i>Сухоносенко Д.С.</i> Анализ характера влияния градостроительной структуры на особенности размещения гнездовых поселений и поведения серой вороны (<i>Corvus cor- nix</i>) в городах Волгоградской области различной величины.....	77

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

<i>Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Крукиер М.Л., Калманович И.В.</i> Оценка эмиссии метана водными объектами Ростовской области.....	83
<i>Искендеров М.Я.</i> Экомелиоративное состояние орошаемых земель в Приараксинской зоне Нахичеванской Автономной Республики.....	90
<i>Доценко И.В., Фёдоров Ю.А., Михайленко А.В., Дмитрик Л.Ю.</i> О связи содержания ртути и органического вещества в донных отложениях по профилю река Дон–Азовское море.....	96

	<i>Сарахова М.А., Якимов А.В.</i> К оценке современного экологического состояния реки Терек в пределах Кабардино-Балкарской Республики.....	103
	<i>Фёдоров Ю.А., Доценко И.В., Михайленко А.В.</i> Поведение тяжелых металлов в воде Азовского моря во время ветровой активности.....	108
	<i>Хорошевская В.О.</i> Распределение ванадия, никеля и молибдена в донных отложениях Таганрогского залива.....	113
МЕДИЦИНА	<i>Кит О.И., Димитриади С.Н., Франциянц Е.М., Ушакова Н.Д.</i> Нефропротективное действие паранефральной новокаиновой блокады при резекции почки в условиях тепловой ишемии.....	119
	<i>Лазутин Ю.Н., Харитонова А.П., Сергостьянц Г.З., Зинькович С.А., Пыльцин С.П.</i> Сравнительное изучение неоадьювантной химиоиммунотерапии немелкоклеточного рака легкого.....	124
НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ	<i>Карпетянц А.</i> Пятая Международная научная конференция «Современные методы и проблемы теории операторов и гармонического анализа и их приложения».....	131
	<i>Миноранский В.А.</i> Природоохранный фестиваль «Воспетая степь»	132
НАШИ ЮБИЛЯРЫ	<i>Абанин А.В., Ватульян А.О., Кусраев А.Г., Карякин М.И.</i> К 85-летию доктора физико-математических наук, профессора Юрия Федоровича Коробейника.....	134
	<i>Колесников В.И.</i> К 70-летию доктора физико-математических наук профессора Михаила Ивановича Чебакова.....	136

IZVESTIYA VUZOV. SEVERO-KAVKAZSKII REGION

Reg. No. 011019
Of the Committee of the Press of the Russian Federation
Scientifically-educational and applied magazine
Was founded in 1973.
Period is 4 numbers per a year
№ 3 (187) 2015.

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3

NATURAL SCIENCE

CONTENTS

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES	<i>Avsyankin O.G.</i> To Question about Boundedness of Multidimensional Integral Operators with Homogeneous Kernels..... 5
	<i>Al Najm M.N.</i> On the Non-Thermal Radio Emission from the Extended Galactic Disks.... 10
	<i>Belyavskii G.I., Kondrat'eva T.N., Misyura V.V.</i> Neural Network Simulation of Jump Processes by the Example of Stable and Moderately Stable Processes..... 15
	<i>Deundyak V.M., Zhdanova M.A.</i> On the Solution of Evaluation Problem for Hidden Semi-Markov Models of the Ferguson's Type..... 19
	<i>Zharashuev M.V., Gergokov A.Kh.</i> Metod of Automatic Identification of the Area Seeding Hail Clouds..... 25
	<i>Kamenetskii E.S., Orlova N.S., Volik M.V.</i> Investigation of the Influence of the Amplitude and Frequency of Vibration on the Structure of Fluidized Granular Layer..... 31
	<i>Klepfish B.R.</i> Sensitivity Analysis of One-Sector Growth Economic Model that Satisfies the Turnpike Property..... 37
	<i>Nesterov N.Yu.</i> Weighted Spaces of Vector-Valued Analytic Functions..... 41
	<i>Palandzhyants L.Zh., Popova A.A., Kuizheva S.K.</i> On the Distribution of the Concentrations of Ions in the Electric Double Layer 47
	<i>Sobisevich L.E., Sobisevich A.L., Kanonidi Kh.D., Kanonidi K.Kh., Likhodeev D.V., Presnov D.A.</i> On a Dilatancy Structures Involved in the Formation of Roots and Feeding System of Mud Volcanoes..... 53
	<i>Chebakov M.I., Abramovich M.V., Kolosova E.M.</i> Contact Problem for a Three-Layer Spherical Hinge..... 60
BIOLOGICAL SCIENCE	<i>Mirzoev E.M-R., Magomedov I.A.</i> Fight Against the Desertification of Earth of Arid Territories by the Method of Soils Airing..... 65
	<i>Polous V.S., Shurupov V.G.</i> Adaptive Methods of the Basic Processing Unit of a Grain of Soil Tilled Grop Rotation..... 69
	<i>Sukhonosenko D.S.</i> Analysis of the Impact of Urban Development on the Particular Structure of the Settlements and the Placement of Nesting Behavior Gray Crow (<i>Corvus cornix</i>) in the Cities of Volgograd Region of Various Sizes..... 77
EARTH SCIENCE	<i>Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Krukier M.L., Kalmanovich I.V.</i> Estimation of Methane Emission Water Ecosystems of the Rostov Region..... 83
	<i>Iskenderov M.Ya.</i> Eco Reclamation Condition of Irrigated Lands in Nakhchevan Autonomous Republic near the River Araks..... 90
	<i>Dotsenko I.V., Fedorov Yu.A., Mikhailenko A.V., Dmitrik L.Yu.</i> About the Relationship of Mercury and Organic Matter in Bottom Sediments in the Profile Don River – Azov Sea..... 96
	<i>Sarakhova M.A., Yakimov A.V.</i> The Assessment of the Current Ecological Status of the River Terek Within Kabardino-Balkarian Republic..... 103

	Fedorov Yu.A., Dotsenko I.V., Mikhailenko A.V. The Behaviour of Heavy Metals in Water of the Sea of Azov During a Wind-Driven Activity.....	108
	Khoroshevskaya V.O. Distribution of Vanadium, Nickel and Molybdenum in Bottom Sediments of the Taganrog Bay.....	113
MEDICINE	Kit O.I., Dimitriadi S.N., Frantsiyants E.M., Ushakova N.D. Nephroprotective Impact of Novocaine Paranephral Blockade in Partial Nephrectomy With Warm Ischemia.....	119
	Lazutin Yu.N., Kharitonova A.P., Sergost'yants G.Z., Zin'kovich S.A., Pyltsin S.P. Comparative Study of Neoadjuvant Chemoimmunotherapy of Non-Small Cell Lung Cancer.....	124
SCIENTIFIC LIFE	Karapetyants A. Fifth International Scientific Conference «Modern Methods and Problems in Operator Theory and Harmonic Analysis and Their Applications».....	131
	Minoranskii V.A. Conservation Festival «Celebrated Steppe».....	132
OUR PERSONS	Abanin A.V., Vatulyan A.O., Kusraev A.G., Karyakin M.I. To the 85th Anniversary of Doctor of Physical and Mathematical Science, Professor Yurii Fedorovich Korobeinika...	134
	Kolesnikov B.I. To the 70th Anniversary of Doctor of Physical and Mathematical Science, Professor Mikhail Ivanovich Cheba- kov.....	136

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 517.9

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-5-9

К ВОПРОСУ ОБ ОГРАНИЧЕННОСТИ МНОГОМЕРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОПЕРАТОРОВ С ОДНОРОДНЫМИ ЯДРАМИ

© 2015 г. О.Г. Авсянкин

Авсянкин Олег Геннадиевич – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой дифференциальных и интегральных уравнений, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: avsyanki@math.sfedu.ru

Avsyankin Oleg Gennadievich – Doctor of Physical and Mathematical Science, Head of the Department of Differential and Integral Equations, Vorovich Institute of Mathematic, Mechanic and Computer Science of the Southern Federal University, Milchakov St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: avsyanki@math.sfedu.ru

Рассматриваются многомерные интегральные операторы с однородными степени $(-n)$ ядрами, действующие в пространствах $L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$ суммируемых функций, имеющих различные показатели суммируемости p_1 и p_2 соответственно внутри и вне окрестности нуля. Получены достаточные условия ограниченности операторов с однородными ядрами в этих пространствах. Кроме того, выделен важный для приложений класс интегральных операторов, ядра которых инвариантны относительно группы вращений пространства $\mathbb{R}^n$. Для таких операторов установлены более простые условия ограниченности в пространствах $L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$. Построены примеры операторов, удовлетворяющих этим условиям.

Ключевые слова: интегральный оператор, однородное ядро, ограниченность, группа вращений, L_p -пространство.

We consider the multidimensional integral operators with homogeneous of degree $(-n)$ kernels. These operators act in the space $L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$, which consist of integrable functions with different summability exponent p_1 and p_2 inside and outside the null-element neighbourhood respectively. We obtain the sufficient conditions of the boundedness of the operators with homogeneous kernels in these spaces. In addition, we study important for applications class of integral operators whose kernels are invariant with respect to rotations of the space $\mathbb{R}^n$. For such operators we establish more simple conditions of boundedness in the space $L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$. We construct the examples of operators satisfying these conditions.

Keywords: integral operator, homogeneous kernel, boundedness, rotation group, L_p -space.

В настоящее время имеется немало работ, посвященных теории многомерных интегральных операторов с однородными ядрами, действующих в L_p -пространствах (см. [1–6] и цитированные в них источники). Для таких операторов были получены достаточные условия ограниченности, установлены критерии обратимости и нетеровости, описаны порожденные этими операторами банаховы алгебры, найдены условия применимости проекционного метода.

В данной работе рассматривается оператор K вида

$$(K\varphi)(x) = \int_{\mathbb{R}^n} k(x, y)\varphi(y)dy, \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad (1)$$

где функция $k(x, y)$, заданная на $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$, измерима и является однородной степени $(-n)$, т.е.

$$k(\lambda x, \lambda y) = \lambda^{-n} k(x, y), \quad \forall \lambda > 0. \quad (2)$$

Оператор K изучается в пространствах $L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$ суммируемых функций, имеющих разные показатели суммируемости внутри и вне окрестности нуля. Отметим, что эти пространства можно интерпретировать как частный случай пространств функций, суммируемых со степенью $p(x)$, когда $p(x)$ является кусочно-постоянной функцией. В работе получены достаточные условия ограниченности оператора K в пространствах

$L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$ в зависимости от соотношения между показателями суммируемости.

Ниже использованы следующие обозначения: $\mathbb{R}^n$ – n -мерное евклидово пространство векторов $x = (x_1, \dots, x_n)$; $|x| = \sqrt{x_1^2 + \dots + x_n^2}$; $x' = x/|x|$; $x \cdot y = x_1 y_1 + \dots + x_n y_n$; $e_1 = (1, 0, \dots, 0)$; $B_a = \{x \in \mathbb{R}^n : |x| \leq a\}$.

Предварительные сведения

Пусть $1 \leq p < \infty$ и $\alpha \in \mathbb{R}$. Обозначим через $L_p^\alpha(\mathbb{R}^n)$ пространство измеримых на $\mathbb{R}^n$ комплекснозначных функций с нормой

$$\|f\|_{L_p^\alpha(\mathbb{R}^n)} = \left(\int_{\mathbb{R}^n} |f(x)|^p |x|^\alpha dx \right)^{1/p}.$$

Условия ограниченности интегральных операторов с однородными ядрами в таких пространствах были установлены в [5]. Для полноты изложения приведем формулировку основной теоремы из этой работы. Предварительно введем две функции:

$$k_1(\sigma) = \int_{\mathbb{R}^n} |k(\sigma, y)|^r |y|^{nr/p' - n - \alpha r/p} dy,$$

$$k_2(\sigma) = \int_{\mathbb{R}^n} |k(x, \sigma)|^r |x|^{nr/p - n + \alpha r/p} dx.$$

Предложение 1 [5]. Пусть $1 \leq p, q < \infty$, ядро $k(x, y)$ оператора K однородно степени $(-n)$ и удовлетворяет условиям:

$$\kappa_1 = \text{ess sup}_{\sigma \in S_{n-1}} k_1(\sigma) < \infty, \quad (3)$$

$$\kappa_2 = \text{ess sup}_{\sigma \in S_{n-1}} k_2(\sigma) < \infty, \quad (4)$$

где $\alpha \in \mathbb{R}$, $1 \leq r < \infty$, причем выполнено равенство

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{r} + \frac{1}{p} - 1. \quad (5)$$

Тогда оператор K ограничен из $L_p^\alpha(\mathbb{R}^n)$ в $L_q^\beta(\mathbb{R}^n)$, где β определяется формулой

$$\beta = (\alpha + n) \frac{q}{p} - n. \quad (6)$$

При этом справедливо неравенство

$$\|K\phi\|_{L_q^\beta(\mathbb{R}^n)} \leq \kappa_1^{1/p'} \kappa_2^{1/q} \|\phi\|_{L_p^\alpha(\mathbb{R}^n)}.$$

Основные результаты

Зафиксируем произвольное положительное число a . Обозначим через $L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$, где $1 \leq p_1$,

$p_2 < \infty$, пространство измеримых на $\mathbb{R}^n$ комплекснозначных функций $\phi(x)$ таких, что $\phi \in L_{p_1}(B_a)$ и $\phi \in L_{p_2}(\mathbb{R}^n \setminus B_a)$. Норму в

$L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$ определим равенством

$$\|\phi\|_{L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)} = \|\phi\|_{L_{p_1}(B_a)} + \|\phi\|_{L_{p_2}(\mathbb{R}^n \setminus B_a)}.$$

Ниже, с целью упрощения записей, будем использовать обозначение $\|\cdot\|_L$ вместо $\|\cdot\|_{L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)}$.

Рассмотрим вопрос об ограниченности операторов вида (1) в пространствах $L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$ в зависимости от соотношения показателей p_1 и p_2 .

Теорема 1. Пусть $1 \leq p_2 < p_1 < \infty$, ядро $k(x, y)$ оператора K однородно степени $(-n)$ и удовлетворяет условиям

$$\text{ess sup}_{\sigma \in S_{n-1}} \int_{\mathbb{R}^n} |k(\sigma, y)| |y|^{-n/p_j} dy < \infty, \quad (7)$$

$$\text{ess sup}_{\sigma \in S_{n-1}} \int_{\mathbb{R}^n} |k(x, \sigma)| |x|^{-n/p_j'} dx < \infty, \quad (8)$$

где $j = 1, 2$, а также условиям

$$\text{ess sup}_{\sigma \in S_{n-1}} \int_{\mathbb{R}^n} |k(\sigma, y)|^r |y|^{nr/p_1' - n} dy < \infty, \quad (9)$$

$$\text{ess sup}_{\sigma \in S_{n-1}} \int_{\mathbb{R}^n} |k(x, \sigma)|^r |x|^{nr/p_1 - n} dx < \infty, \quad (10)$$

где r определяется равенством

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_2} + 1. \quad (11)$$

Тогда оператор K ограничен в пространстве $L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$.

Доказательство. Определим в $L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$ проектор P формулой

$$(P\phi)(x) = \begin{cases} \phi(x), & x \in B_a, \\ 0, & x \in \mathbb{R}^n \setminus B_a \end{cases}$$

и положим $Q = I - P$. Тогда

$$K = PKP + QKQ + QKP + PKQ. \quad (12)$$

Докажем ограниченность в пространстве $L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$ каждого слагаемого из правой части равенства (12).

Отождествляя проектор P с оператором сужения на шар B_a , имеем

$$(PKP)\phi(x) = \int_{B_a} k(x, y)\phi(y)dy, \quad x \in B_a.$$

Тогда из условий (7) и (8), где $j = 1$, на основании [1, теорема 6.4] следует ограниченность опера-

тора PKP . Аналогично из условий (7) и (8), где $j = 2$, следует ограниченность оператора QKQ .

Рассмотрим оператор QKP . Условия (7) и (8) при $j = 2$ гарантируют ограниченность оператора K в пространстве $L_{p_2}(\mathbb{R}^n)$. Поэтому для любой функции $\varphi \in L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$ получаем

$$\|QKP\varphi\|_L \leq \|KP\varphi\|_{L_{p_2}(\mathbb{R}^n)} \leq C\|P\varphi\|_{L_{p_2}(\mathbb{R}^n)} = C\|\varphi\|_{L_{p_2}(B_a)}.$$

Поскольку $p_1 > p_2$, то $L_{p_1}(B_a) \subset L_{p_2}(B_a)$, причем

$$\|\varphi\|_{L_{p_2}(B_a)} \leq (\text{mes} B_a)^{1/p_2 - 1/p_1} \|\varphi\|_{L_{p_1}(B_a)}.$$

Тогда $\|QKP\varphi\|_L \leq C_1\|\varphi\|_L$, т.е. оператор QKP ограничен в $L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$.

Рассмотрим последнее слагаемое в равенстве (12). Возьмем произвольную функцию $\varphi \in L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$. Тогда функция $Q\varphi$ принадлежит весовому пространству $L_{p_2}^\alpha(\mathbb{R}^n)$ при любом $\alpha < 0$, причем

$$\begin{aligned} \|Q\varphi\|_{L_{p_2}^\alpha(\mathbb{R}^n)} &\leq \\ &\leq a^{\alpha/p_2} \left(\int_{|x|>a} |\varphi(x)|^{p_2} dx \right)^{1/p_2} \leq a^{\alpha/p_2} \|\varphi\|_L. \end{aligned} \quad (13)$$

Покажем, что при определенном подборе числа α оператор K ограниченно действует из $L_{p_2}^\alpha(\mathbb{R}^n)$ в $L_{p_1}(\mathbb{R}^n)$. Для этого воспользуемся предложением 1, полагая, что r определяется равенством (11), $p = p_2$ и $\alpha = -np_2/r'$. Тогда

$$\frac{nr}{p'} - n - \frac{\alpha r}{p} = \frac{nr}{p_1'} - n, \quad \frac{nr}{p} - n + \frac{\alpha r}{p} = \frac{nr}{p_1} - n,$$

а значит, условия (3) и (4) принимают вид (9) и (10) соответственно. Далее из формул (5) и (6) вытекает, что $q = p_1$ и $\beta = 0$. Следовательно, оператор K ограничен из пространства $L_{p_2}^\alpha(\mathbb{R}^n)$, где $\alpha = -np_2/r'$, в пространство $L_{p_1}(\mathbb{R}^n)$. Тогда, учитывая неравенство (13), для любой функции $\varphi \in L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$ получим

$$\|PKQ\varphi\|_L \leq \|KQ\varphi\|_{L_{p_1}(\mathbb{R}^n)} \leq C\|Q\varphi\|_{L_{p_2}^\alpha(\mathbb{R}^n)} \leq C_1\|\varphi\|_L.$$

Значит оператор PKQ также ограничен в $L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$. Теорема доказана.

В теории многомерных интегральных операторов с однородными ядрами особое место занимают

операторы, ядра которых инвариантны относительно всех вращений.

Определение. Будем говорить, что функция $k(x, y)$ инвариантна относительно группы вращений $SO(n)$, если

$$k(\omega(x), \omega(y)) = k(x, y), \quad \forall \omega \in SO(n). \quad (14)$$

Следствие 1. Пусть $1 \leq p_2 < p_1 < \infty$, ядро $k(x, y)$ оператора K однородно степени $(-n)$, инвариантно относительно группы вращений $SO(n)$ и удовлетворяет условиям:

$$\int_{\mathbb{R}^n} |k(e_1, y)| |y|^{-n/p_j} dy < \infty, \quad j = 1, 2, \quad (15)$$

$$\int_{\mathbb{R}^n} |k(e_1, y)|^r |y|^{nr/p_1' - n} dy < \infty, \quad (16)$$

где r определяется равенством (11). Тогда оператор K ограничен в пространстве $L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$.

Доказательство. Так как ядро $k(x, y)$ инвариантно относительно всех вращений, то условия (7) и (8) равносильны и имеют вид (15) [1, с. 69]. Следствие будет доказано, если мы покажем, что условия (9) и (10) также равносильны и принимают вид (16).

В самом деле, в интеграле из формулы (9) сделаем замену $y = \omega_\sigma(t)$, где ω_σ – элемент группы $SO(n)$ такой, что $\omega_\sigma(e_1) = \sigma$, а в интеграле из (10) – замену $x = \omega_\sigma(t)$. Тогда, пользуясь условием (14), получим

$$\text{ess sup}_{\sigma \in S_{n-1}} \int_{\mathbb{R}^n} |k(\sigma, y)|^r |y|^{nr/p_1' - n} dy =$$

$$= \int_{\mathbb{R}^n} |k(e_1, y)|^r |y|^{nr/p_1' - n} dy := I_1,$$

$$\text{ess sup}_{\sigma \in S_{n-1}} \int_{\mathbb{R}^n} |k(x, \sigma)|^r |x|^{nr/p_1 - n} dx =$$

$$= \int_{\mathbb{R}^n} |k(x, e_1)|^r |x|^{nr/p_1 - n} dx := I_2.$$

Покажем, что $I_1 = I_2$. Так как функция $k(x, y)$ удовлетворяет условию (14), то найдется такая функция $k_0(r, \rho, t)$, что $k(x, y) = k_0(|x|, |y|, x' \cdot y')$ [7, с. 36]. Учитывая это и переходя к сферическим координатам $y = \rho\sigma$, запишем

$$I_1 = \int_0^\infty \int_{S_{n-1}} |k_0(1, \rho, e_1 \cdot \sigma)|^r \rho^{nr/p_1' - 1} d\rho d\sigma.$$

Сделаем замену $\rho = 1/\tau$ и затем воспользуемся условием (2); в результате получим цепочку равенств

$$I_1 = \int_0^\infty \int_{S_{n-1}} \left| k_0\left(1, \frac{1}{\tau}, \sigma \cdot e_1\right) \right|^r \tau^{-nr/p_1' - 1} d\tau d\sigma =$$

$$\begin{aligned}
&= \int_0^\infty \int_{S_{n-1}} \left| k\left(\sigma, \frac{1}{\tau} e_1\right) \right|^r \tau^{-nr/p_1'-1} d\tau d\sigma = \\
&= \int_0^\infty \int_{S_{n-1}} \left| k\left(\sigma, e_1\right) \right|^r \tau^{nr/p_1-1} d\tau d\sigma = \\
&= \int_{\mathbb{R}^n} |k(x, e_1)|^r |x|^{nr/p_1-n} dx = I_2.
\end{aligned}$$

Следствие доказано.

Пример. Приведем пример функции $k(x, y)$, удовлетворяющей условиям следствия 1. Рассмотрим функцию

$$k(x, y) = \frac{1}{|x|^n + |y|^n} \exp\left(i \frac{x \cdot y}{|x| |y|}\right). \quad (17)$$

Очевидно, что эта функция однородна степени $(-n)$ и инвариантна относительно группы вращений $SO(n)$. Проверим условие (15). Имеем

$$\int_{\mathbb{R}^n} |k(e_1, y)| |y|^{-n/p_j} dy = \int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{1 + |y|^n} |y|^{-n/p_j} dy < \infty,$$

если $1 < p_j < \infty$, где $j = 1, 2$. Аналогично проверяется условие (16):

$$\begin{aligned}
&\int_{\mathbb{R}^n} |k(e_1, y)|^r |y|^{nr/p_1'-n} dy = \\
&= \int_{\mathbb{R}^n} \frac{1}{(1 + |y|^n)^r} |y|^{nr/p_1'-n} dy < \infty
\end{aligned}$$

при всех вышеуказанных значениях p_1 . Таким образом, оператор K с ядром вида (17) ограничен в пространстве $L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$, если $1 < p_2 < p_1 < \infty$.

Теорема 2. Пусть $1 \leq p_1 < p_2 < \infty$, ядро $k(x, y)$ оператора K однородно степени $(-n)$, удовлетворяет условиям (7), (8) и (9), (10), где r определяется равенством

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{p_2} - \frac{1}{p_1} + 1, \quad (18)$$

а также еще одному условию

$$\mathbf{b} := \int_{|y|>a} \left(\int_{|x|<a} |k(x, y)|^{p_1} dx \right)^{p_2'/p_1} dy < \infty. \quad (19)$$

Тогда оператор K ограничен в пространстве $L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$.

Доказательство. Как и в теореме 1, докажем ограниченность в пространстве $L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$ каждого слагаемого из правой части равенства (12).

Ограниченность операторов PKP и QKQ была установлена в ходе доказательства теоремы 1. Покажем ограниченность оператора PKQ . Для любой $\varphi \in L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$ имеем

$$\|PKQ\varphi\|_L = \left(\int_{|x|<a} \left| \int_{|y|>a} k(x, y) \varphi(y) dy \right|^{p_1} dx \right)^{1/p_1}.$$

Применяя сначала обобщенное неравенство Минковского, а затем неравенство Гельдера с показателями p_2 и p_2' , получим

$$\begin{aligned}
\|PKQ\varphi\|_L &\leq \int_{|y|>a} |\varphi(y)| \left(\int_{|x|<a} |k(x, y)|^{p_1} dx \right)^{1/p_1} dy \leq \\
&\leq \left(\int_{|y|>a} |\varphi(y)|^{p_2} dy \right)^{1/p_2} \mathbf{b}^{1/p_2'} \leq \mathbf{b}^{1/p_2'} \|\varphi\|_L.
\end{aligned}$$

Остается доказать ограниченность оператора QKP . Предварительно заметим, что если функция f принадлежит весовому пространству $L_{p_2}^\beta(\mathbb{R}^n)$ при некотором $\beta > 0$, то $Qf \in L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$, причем

$$\begin{aligned}
\|Qf\|_L &= \left(\int_{|x|>a} |f(x)|^{p_2} dx \right)^{1/p_2} \leq \\
&\leq a^{-\beta/p_2} \left(\int_{|x|>a} |f(x)|^{p_2} |x|^\beta dx \right)^{1/p_2} \leq \\
&\leq a^{-\beta/p_2} \|f\|_{L_{p_2}^\beta(\mathbb{R}^n)}.
\end{aligned} \quad (20)$$

Покажем, что оператор K ограничен из $L_{p_1}(\mathbb{R}^n)$ в $L_{p_2}^\beta(\mathbb{R}^n)$, где $\beta = n(p_2/p_1 - 1)$. В самом деле, воспользуемся предложением 1, полагая, что r определяется равенством (18), $p = p_1$, $\alpha = 0$. Тогда условия (3) и (4) принимают вид (9) и (10) соответственно. Далее из формул (5) и (6) вытекает, что $q = p_2$ и $\beta = n(p_2/p_1 - 1)$. Следовательно, оператор K ограничен, а потому

$$\|KP\varphi\|_{L_{p_2}^\beta(\mathbb{R}^n)} \leq C \|P\varphi\|_{L_{p_1}(\mathbb{R}^n)} \quad (21)$$

для любой функции $\varphi \in L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$. Из неравенств (20) и (21) следует, что

$$\|QKP\varphi\|_L \leq C_1 \|P\varphi\|_{L_{p_1}(\mathbb{R}^n)} \leq C_1 \|\varphi\|_L,$$

т.е. оператор QKP ограничен в пространстве $L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$.

Следствие 2. Пусть $1 \leq p_1 < p_2 < \infty$, ядро $k(x, y)$ оператора K однородно степени $(-n)$, инвариантно относительно группы вращений $SO(n)$ и удовлетворяет условиям (15), (16), где r определяется равенством (18), а также условию (19). Тогда оператор K ограничен в пространстве $L_{p_1, p_2}(\mathbb{R}^n)$.

Доказательство полностью аналогично доказательству следствия 1.

В заключение отметим, что функция $k(x, y)$ вида (17) удовлетворяет условию (19). Это проверяется непосредственно.

Литература

1. Karapetians N., Samko S. *Equations with Involution Operators*. Boston; Basel; Berlin, 2001. 427 p.
2. Авсянкин О.Г., Карапетянц Н.К. Проекционный метод в теории интегральных операторов с однородными ядрами // Мат. зам. 2004. Т. 75, № 2. С. 163–172.
3. Авсянкин О.Г. О многомерных интегральных операторах с однородными ядрами и осциллирующими радиальными коэффициентами // Диф. ур. 2007. Т. 43, № 9. С. 1193–1196.
4. Авсянкин О.Г. О C^* -алгебре, порожденной многомерными интегральными операторами с однородными ядрами и операторами мультипликативного сдвига // Докл. РАН. 2008. Т. 419, № 6. С. 727–728.
5. Авсянкин О.Г., Перетякин Ф. Г. Об ограниченности и компактности многомерных интегральных операторов с однородными ядрами // Изв. вузов. Математика. 2013. № 11. С. 64–68.
6. Авсянкин О.Г. Проекционный метод для интегральных операторов с однородными ядрами, возмущенных односторонними мультипликативными сдвигами // Изв. вузов. Математика. 2015. № 2. С. 10–17.
7. Самко С. Г. Гиперсингулярные интегралы и их приложения. Ростов н/Д., 1984. 208 с.

References

1. Karapetians N., Samko S. *Equations with Involution Operators*. Boston; Basel; Berlin, 2001, 427 p.
2. Avsyankin O.G., Karapetyants N.K. Proektsionnyi metod v teorii integral'nykh operatorov s odnorodnymi yadrami [The projection method in the theory of integral operators with homogeneous kernels]. *Matematicheskie zametki*, 2004, vol. 75, no 2, pp. 163-172.
3. Avsyankin O.G. O mnogomernykh integral'nykh operatorakh s odnorodnymi yadrami i ostsilliruyushchimi radikal'nyimi koeffitsientami [Multidimensional integral operators with homogeneous cores and oscillating radical coefficients]. *Differentsial'nye uravneniya*, 2007, vol. 43, no 9, pp. 1193-1196.
4. Avsyankin O.G. O C^* -algebre, porozhdennoi mnogomernymi integral'nyimi operatorami s odnorodnymi yadrami i operatorami mul'tiplikativnogo sdviga [About the C^* -algebra generated by multidimensional integral operators with homogeneous kernels and multiplicative operators shift]. *Doklady RAN*, 2008, vol. 419, no 6, pp. 727-728.
5. Avsyankin O.G., Peretyat'kin F.G. Ob ogranichenosti i kompaktnosti mnogomernykh integral'nykh operatorov s odnorodnymi yadrami [Boundedness and compactness of multidimensional integral operators with homogeneous kernels]. *Izvestiya vuzov. Matematika*, 2013, no 11, pp. 64-68.
6. Avsyankin O.G. Proektsionnyi metod dlya integral'nykh operatorov s odnorodnymi yadrami, vozmushchennykh odnostoronnnimi mul'tiplikativnymi sdvigami [The projection method for the integral operators with homogeneous kernels perturbed unilateral multiplicative shifts]. *Izvestiya vuzov. Matematika*, 2015, no 2, pp. 10-17.
7. Samko S.G. *Gipersingulyarnye integraly i ikh prilozheniya* [Hypersingular integrals and their applications]. Rostov-on-Don, 1984, 208 p.

УДК 524.54; 524.7-77; 524.522; 524.523

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-10-14

О НЕТЕПЛОМ РАДИОИЗЛУЧЕНИИ ОТ ПРОТЯЖЕННЫХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ДИСКОВ*

© 2015 г. М.Н. Аль Наджм

Аль Наджм Мохаммед Наджи – доцент, кафедра астрономии и космоса, Колледж науки Университета Багдада, Багдад, Ирак; аспирант, кафедра физики космоса, физический факультет, Южный федеральный университет, ул. Зорге, 5, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: mohalnajm72@yahoo.com

Al Najm Mohammed Naji – Associate Professor, Department of Astronomy and Space, College of Science of the Baghdad University, Baghdad, Iraq; Post-Graduate Student, Department of Space Physics, Faculty of Physics, Southern Federal University, Zorge St., 5, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: mohalnajm72@yahoo.com

Приведены расчеты нетеплового (синхротронного) радиоизлучения от протяженных газовых дисков спиральных галактик. Ранее нами показано, что в этих областях может находиться значительное количество ионизованного водорода, мера эмиссии которого, однако, настолько мала, что рекомбинационное излучение как в оптическом, так и в радиодиапазонах оказывается ниже чувствительности современных приемников излучения. Расчеты нетеплового излучения от таких областей показывают, что при выполнении определенных условий присутствие газа в этих областях может быть обнаружено с помощью наблюдений в низкочастотной области спектра.

Ключевые слова: синхротронное излучение, межгалактическая среда, эмиссионные туманности, радиоизлучение галактики, области HI.

Calculations of the non-thermal (synchrotron) radio emission from the extended gaseous disks of spiral galaxies are presented. Earlier we showed that in these regions there is a significant amount of ionized hydrogen, emission measure, however, is so small that the recombination radiation in the optical and radio ranges is below the sensitivity of modern receivers of radiation. In our calculations we show that the non-thermal emission from such regions shows that under certain conditions the presence of gas in these areas can be detected using observation of the low-frequency spectral range.

Keywords: synchrotron radiation, intergalactic medium, emission nebula, galaxies radio emission, regions HI.

В последнее время появилось много работ, в которых приводятся аргументы в пользу существования газовых дисков галактик с размерами, в несколько раз превосходящими размеры звездных дисков. Наличие таких дисков может иметь принципиально важное значение не только для понимания многих вопросов, связанных с динамикой галактик, для правильной оценки массы газа в таких галактиках, но, что может оказаться более принципиальным, для правильного понимания того, как распространяется и преобразуется радиоизлучение от далеких внегалактических объектов. Это связано с тем, что протяженные газовые диски имеют большие геометрические сечения и поэтому приводят к большой вероятности поглощения или рассеяния излучения от удаленных внегалактических радиоисточников. Кроме того,

при определенных условиях по этой же причине они могут давать заметный вклад в фоновое внегалактическое радиоизлучение.

В настоящей работе мы предпринимаем попытку найти интервал значений потоков нетеплового радиоизлучения, связанного с присутствием в таких протяженных газовых дисках галактик магнитных полей и нетепловых релятивистских электронов. С этой целью мы рассчитываем скорость радиационных потерь релятивистских электронов в протяженных газовых дисках, а также эволюцию спектра синхротронного радиоизлучения от таких электронов. На основе этих расчетов мы приводим оценки ожидаемых потоков синхротронного излучения и перспективы их наблюдения. Для этого мы рассчитываем ожидаемые потоки

*Работа выполнена при поддержке Министерства высшего образования и научных исследований Ирака (The Ministry of Higher Education and Scientific Research in Iraq).

излучения от конкретных галактик, для которых характеристики протяженных дисков атомарного водорода HI хорошо известны [1].

Эволюция спектра релятивистских электронов при радиационных потерях

Хорошо известно [2], что релятивистские электроны с энергией $E = \Gamma mc^2$ генерируют синхротронное излучение – электромагнитные волны со спектром, максимум которого приходится на частоту

$$\nu_m \approx 0,3\nu_c = 0,3\Gamma^2\omega_c, \quad (1)$$

где m – масса электрона; c – скорость света; $\Gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, $\Gamma \gg 1$ – лоренц-фактор; $\omega_c = eH/mc$ – циклотронная частота электрона; H – напряженность магнитного поля. Мощность синхротронного излучения от одного электрона

$$R_H(\Gamma) = 2\Gamma^2\sigma_T c\omega_H, \quad (2)$$

где $\sigma_T = 6,652 \cdot 10^{-25} \text{ м}^2$ – томсоновское сечение; $\omega_H = H^2/8\pi$ – плотность энергии магнитного поля.

Кроме этого, релятивистский электрон, будучи погруженным в общее поле холодного фонового микроволнового излучения, теряет энергию на обратном комптоновском процессе $\gamma + e \rightarrow \gamma' + e'$. При этом мощность потерь на таком обратном комптоновском процессе [3]

$$R_\gamma(\Gamma) = \frac{4}{3}\Gamma^2\sigma_T c\omega_\gamma, \quad (3)$$

где ω_γ – плотность энергии фонового микроволнового излучения. В целом магнитотормозные (синхротронные) потери энергии и потери на обратном комптоновском процессе имеют один порядок величины, поскольку плотности энергии межзвездного магнитного поля в галактиках и энергии реликтовых квантов фонового микроволнового излучения сравнимы: $\omega_H \approx 0,7 \text{ эВ} \cdot \text{см}^{-3}$ [4], а $\omega_\gamma \approx 0,4 \text{ эВ} \cdot \text{см}^{-3}$ [5]. Таким образом, суммарные потери релятивистского электрона

$$\frac{d\Gamma}{dt} = -\frac{c\sigma_T}{mc^2}\Gamma^2\left(2\omega_H + \frac{2}{3}\omega_\gamma\right) \quad (4)$$

приводят к тому, что его энергия убывает по степенному закону

$$\Gamma = \frac{\Gamma_0}{1 + \Gamma_0\tau}, \tau = \frac{t}{t_0}, t_0 = \frac{mc^2}{c\sigma_T\omega}, \quad (5)$$

где $\omega = 2\omega_H + 2\omega_\gamma/3$.

Ансамбль релятивистских электронов испускает излучение, спектр которого определяется энергетическим спектром электронов. Хорошо известно, что наблюдаемый степенной спектр синхротронного излучения галактик отражает присутствие в их межзвездной среде релятивистских электронов со степенным энергетическим спектром [6]. Энергетический спектр релятивистских электронов в межзвездной среде галактик имеет кусочно-степенной характер в виде

$$N_e(E)dE = \kappa_e E^{-p} dE, E_m < E < E_M \quad (6)$$

в ограниченном интервале энергий $E_m < E < E_M$.

Здесь κ_e – нормировочный коэффициент, определяемый полной плотностью электронов $N_e = \int N_e(E) dE$ или их плотностью энергии $\varepsilon = \int EN_e(E) dE$ в межзвездной среде; E_m и E_M – минимальная и максимальная энергии в степенном спектре электронов, определяемые механизмами ускорения и транспорта (см. подробнее в [7, 8]). При отсутствии источников энергии, например, далеко за пределами звездных дисков галактик релятивистские электроны остывают, т.е. теряют энергию вследствие радиационных потерь (1) и (3) по закону (5), в результате чего их спектр (6) смещается в сторону меньших энергий $E_m(t) < E < E_M(t)$ и деформируется, поскольку характерное время потерь энергии, как это видно из (5), зависит от энергии. Переписывая (6) в виде распределения по безразмерной энергии Γ $N_e(\Gamma)d\Gamma = \kappa_e (mc^2)^p \Gamma^{-p} d\Gamma$, $\Gamma_m < \Gamma < \Gamma_M$, и переходя от начальной энергии Γ_0 к энергии Γ в момент времени t , найдем

$$N_e(\Gamma)d\Gamma = \kappa_e (mc^2)^p \Gamma^{-p} \left(-\Gamma\tau\right)^{-2} d\Gamma, \\ \Gamma_m(t) < \Gamma < \Gamma_M(t).$$

Зависимость спектра остывающих релятивистских электронов при отсутствии источников энергии показана на рис. 1 для нескольких значений показателя спектра электронов $p = 2,2; 2,5; 2,8$. Первое значение типично для области низких энергий ($E \leq 1 \text{ ГэВ}$), последнее – более высоких ($E > 3 \text{ ГэВ}$). Легко видеть, что спектральное распределение с течением времени меняет свою форму, следствием чего будет эволюция спектра синхротронного излучения.

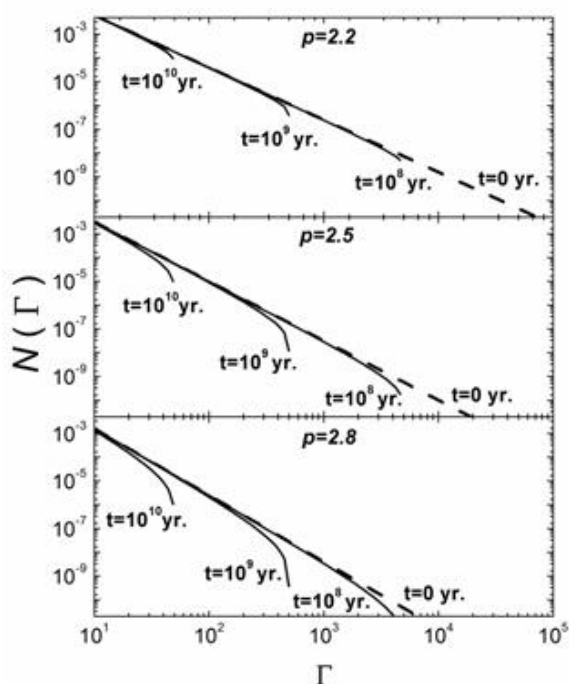


Рис. 1. Эволюция спектра релятивистских электронов под действием радиационных потерь в отсутствие источников ускорения

Эволюция спектра синхротронного излучения остывающих релятивистских электронов

Релятивистские электроны, заключенные в объеме V с энергией в интервале от E до $E + \Delta E$ со спектром (6), будут давать синхротронное излучение в интервале частот от $\approx \nu_c(E)$ до $\nu_c(E + \Delta E)$ со светимостью $dL(\nu) = dE [N_e(E) R_H dV]$. Соответствующая частотная зависимость излучения определяется соотношением между энергией электрона и пиковой частотой генерируемых им квантов (1) и имеет вид [7]

$$\frac{dL}{d\nu} = 4\pi a(p) \frac{e^3}{mc^2} \left(\frac{3e}{4\pi m^3 c^5} \right)^{\frac{(p-1)}{2}} H^{\frac{(p+1)}{2}} \times \\ \times \kappa_e \cdot V \cdot \nu^{\frac{-(p-1)}{2}} \frac{10^{-7} \text{ Äæ}}{\text{Äö} \cdot \tilde{n}}, \quad \nu_m < \nu < \nu_M,$$

где интервал частот ограничен нижней и верхней границами энергий релятивистских электронов $\nu_{m,M} = 0,3\Gamma_{m,M}^2 \omega_c$, $a(p) \approx 1$. В том случае, когда

энергия релятивистских электронов падает из-за радиационных потерь, как это описано выше в уравнении (4), спектральная светимость будет описываться законом

$$\frac{dL}{d\nu} = 4\pi a(p) \frac{e^3}{mc^2} \left(\frac{3e}{4\pi m^3 c^5} \right)^{\frac{(p-1)}{2}} H^{\frac{(p+1)}{2}} \times \\ \times \kappa_e \cdot V \cdot \nu^{\frac{-(p-1)}{2}} \frac{1}{(0,3\omega_c)^{0,5}} \left[1 - \frac{1}{\nu^2 \tau} \right]^{p-2} \frac{10^{-7} \text{ Äæ}}{\text{Äö} \cdot \tilde{n}}$$

в том же интервале частот, или в численном выражении

$$\frac{dL}{d\nu} \approx 3 \cdot 10^{-28} \kappa_e V H^{\frac{(p+1)}{2}} \left(\frac{6,3 \cdot 10^{18}}{\nu} \right)^{\frac{(p-1)}{2}} \times \\ \times \left[1 - \left(\frac{\nu}{6,3 \cdot 10^{18}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2,1 \cdot 10^{19}}{\omega_c} \right)^{\frac{1}{2}} \tau \right]^{p-2} \frac{10^{-7} \text{ Äæ}}{\text{Äö} \cdot \tilde{n}}$$

в интервале $\nu_m < \nu < \nu_M$. График этой зависимости приведен на рис. 2, где показана эволюция спектров синхротронного излучения для тех же параметров, которые приведены и на рис. 1, в том числе для тех же значений p . Легко видеть, что с течением времени спектр становится более крутым в том смысле, что все меньшая часть высокочастотных квантов представляет спектр.

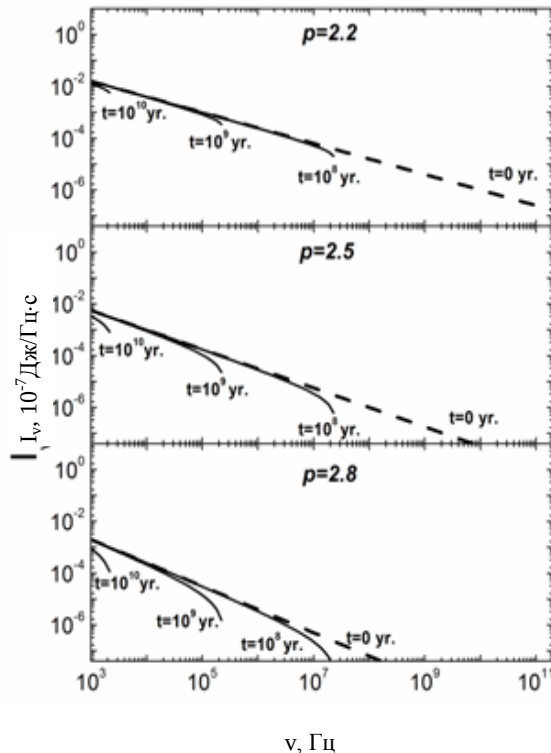


Рис. 2. Эволюция спектров синхротронного излучения, соответствующих условиям рис. 1

Адиабатическое охлаждение релятивистских электронов и эволюция синхротронной светимости

При распространении релятивистских электронов по диску галактики за пределы источников энергии, поддерживающих релятивистские электроны, существенную роль могут играть потери, связанные с расширением объема, охватывающего область с релятивистскими электронами. Следуя Лонгейру [8], можно написать уравнение для скорости остывания релятивистских электронов в виде

$$\frac{dN(E)}{dt} = \frac{\partial}{\partial E} [b(E)N(E)],$$

где $b(E) = (E/r)(dr/dt)$ – адиабатическое уменьшение энергии, приходящейся на один электрон, вследствие изменения размера области r , занимаемой релятивистскими электронами. Для спектра $N(E) = \kappa E^{-p}$ отсюда следует

$$\frac{dN}{N(E)} = -(p-1) \frac{dr}{r},$$

что приводит к изменению коэффициента нормировки

$$\kappa(r) = \kappa(r_0) \left(\frac{r_0}{r} \right)^{(p-1)}.$$

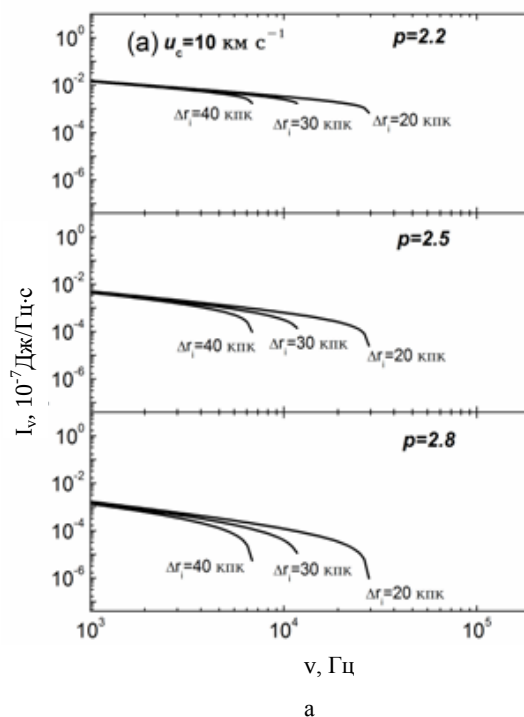
В соответствии с этим излучательная способность единицы объема изменяется по закону $I_\nu \propto r^{-2p}$ [8]. Легко видеть, что в отличие от изменения спектра в результате синхротронных и обратных комптоновских потерь, в этом случае охлаждается весь спектр как целое. Характерное время такого охлаждения совпадает с временем расширения объема, содержащего релятивистские электроны. При рассмотрении транспорта релятивистских электронов по протяженному галактическому диску характерное время можно оценивать как отношение размера диска к альфвеновской скорости в среде космических лучей: $t_a \approx r/v_A \approx 0,3$ млрд лет для характерных значений $r = 30$ кпк и $v_A = 10$ км·с⁻¹. В действительности это время может быть больше при распространении по более протяженным дискам.

Синхротронная светимость протяженных галактических дисков HI

Приведем оценки синхротронной светимости в протяженных галактических дисках. Предположим, что генерация релятивистских электронов прекращается на границе оптической области вследствие отсутствия в этой области взрывов звезд и истощения частоты ударных волн. Пусть конвективное

движение, переносящее космические лучи по диску, имеет скорость $u_c \approx v_A \approx 10 \div 30$ км·с⁻¹. Перенос космических лучей на расстояние в несколько радиусов оптических дисков потребует времени порядка $100 \div 300$ млн лет. Поскольку наклон спектра электронов при адиабатическом охлаждении не изменяется, его вариации при переносе за пределы оптического диска будут определяться только описанными выше радиационными потерями. С учетом этого на нескольких панелях рис. 3 приведен вид спектра синхротронного излучения на различных расстояниях от оптического диска $\Delta r = r - r_0$, где для $\tau = t/t_0$ было принято значение $t_i = \Delta r_i/u_c$. На рис. 3 приведены расчеты для $\Delta r_i = 20, 30, 40$ кпк сверху вниз, для двух значений скорости переноса: $u_c = 10$ км·с⁻¹ (рис. 3а) и $u_c = 30$ км·с⁻¹ (рис. 3б). Здесь при расчете полной спектральной светимости периферии газовых дисков принято, что шкала высоты газового диска постоянна и равна в среднем $h_0 = 250$ пк = $7,5 \cdot 10^{20}$ см.

Для галактики, подобной нашей, для которой поток синхротронного излучения на частоте 10 МГц составляет 10^{-23} Дж·см⁻²·с⁻¹·Гц⁻¹·ср⁻¹ в направлении, перпендикулярном плоскости галактики в пределах оптического радиуса галактики [9], уменьшение потока на периферии может составить величину в два-три раза в зависимости от спектрального индекса релятивистских электронов p .



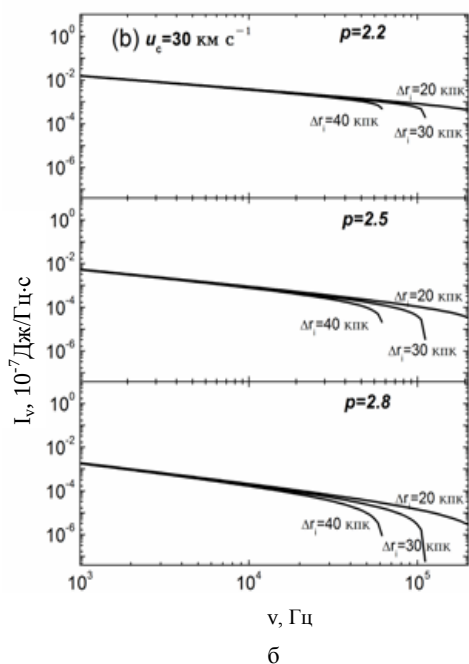


Рис. 3. Вид спектра синхротронного излучения на различных расстояниях от оптического диска $\Delta r_i = 20, 30, 40$ кпк сверху вниз для двух значений скорости переноса:
 $u_c = 10 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ (а) и $u_c = 30 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ (б)

Однако полная мощность излучения от периферийных областей может даже превысить мощность, регистрируемую от галактики в пределах оптического диска, из-за существенно превышающей полной поверхности периферии как $\propto (r/r_0)^2$, однако с более мягким спектром.

Выводы

1. Мы показали, что при распространении электронов космических лучей за пределы оптических дисков их спектр становится более мягким вследствие охлаждения в основном на синхротронных и обратных комптоновских потерях.

2. Вследствие этого более мягким становится и спектр синхротронного излучения от таких электронов. При этом в спектре исчезает высокочастотная часть, за которую ответственны нетепловые электроны с энергией $\Gamma \geq 10^3$.

3. Далекая периферия галактических дисков ($r \geq 30$ кпк) может содержать значительное количество нетепловых электронов с энергиями меньше энергий, типичных для центральных частей галактик. Однако из-за большой поверхности периферийных областей полный поток синхротронного излучения от таких областей может превышать поток синхротрона от областей в

пределах звездного диска, хотя более мягкого, т.е. соответствующего меньшим частотам.

Литература

1. Wang J., Fu J., Aumer M., Kauffmann G., Józsa G.I.G., Serra P., Huang M.-L., Brinchmann J., Hulst T. van der, Bigiel F. An observational and theoretical view of the radial distribution of HI gas in galaxies // *Month. Not. Astron. Soc.* 2014. Vol. 441. P. 2159.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М., 1988. С. 256–265.
3. Озерной Л.М., Прилуцкий О.Ф., Розенталь И.Л. Астрофизика высоких энергий. М., 1973. С. 66–98.
4. Mikhailov E., Kasparova A., Moss D., Beck R., Sokoloff D., Zasov A. Magnetic fields near the peripheries of galactic discs // *Astron. and Astrophys.* 2014. Vol. 568. P. 66.
5. Muller S., Beelen A., Black J. H., Curran S. J., Horellou C., Aalto S., Combes F., Guélin M., Henkel C. A precise and accurate determination of the cosmic microwave background temperature at $z = 0.89$ // *Astron. and Astrophys.* 2013. Vol. 551. P. 104.
6. Лонгейр М. Астрофизика высоких энергий. М., 1984. С. 257–265.
7. Гинзбург В.Л. Теоретическая физика и астрофизика. М., 1975. С. 75–102.
8. Longair M. High energy astrophysics. Cambridge, 2011. P. 274–302.
9. Webber W.R. The spectra of cosmic ray nuclei $> 1 \text{ GeV/nuc}$ – implications for acceleration and propagation // *Composition and Origin of Cosmic Rays*. 1983. Vol. 107. P. 25–45.

References

1. Wang J., Fu J., Aumer M., Kauffmann G., Józsa G.I.G., Serra P., Huang M.-L., Brinchmann J., Hulst T. van der, Bigiel F. An observational and theoretical view of the radial distribution of HI gas in galaxies. *Month. Not. Astron. Soc.*, 2014, vol. 441, p. 2159.
2. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoriya polya* [Field theory]. Moscow, 1988, pp. 256-265.
3. Ozernoi L.M., Prilutskii O.F., Rozental' I.L. *Astrofizika vysokikh energii* [High energy astrophysics]. Moscow, 1973, pp. 66-98.
4. Mikhailov E., Kasparova A., Moss D., Beck R., Sokoloff D., Zasov A. Magnetic fields near the peripheries of galactic discs. *Astron. and Astrophys.*, 2014, vol. 568, p. 66.
5. Muller S., Beelen A., Black J. H., Curran S. J., Horellou C., Aalto S., Combes F., Guelin M., Henkel C. A precise and accurate determination of the cosmic microwave background temperature at $z=0.89$. *Astron. and Astrophys.*, 2013, vol. 551, p. 104.
6. Longair M. *Astrofizika vysokikh energii* [High energy astrophysics]. Moscow, 1984, pp. 257-265.
7. Ginzburg V.L. *Teoreticheskaya fizika i astrofizika* [Theoretical physics and astrophysics]. Moscow, 1975, pp. 75-102.
8. Longair M. *High energy astrophysics*. Cambridge, 2011, pp. 274-302.
9. Webber W.R. The spectra of cosmic ray nuclei $> 1 \text{ GeV/nuc}$ – implications for acceleration and propagation. *Composition and Origin of Cosmic Rays*, 1983, vol. 107, pp. 25-45.

УДК 004.8 + 06

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-15-18

НЕЙРОСЕТЕВОЕ ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СКАЧКООБРАЗНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ УСТОЙЧИВЫХ И УМЕРЕННО УСТОЙЧИВЫХ ПРОЦЕССОВ*

© 2015 г. Г.И. Белявский, Т.Н. Кондратьева, В.В. Мисюра

Белявский Григорий Исаакович – доктор технических наук, профессор, кафедра высшей математики и исследования операций, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: beliaivsky@hotmail.com

Кондратьева Татьяна Николаевна – кандидат технических наук, доцент, кафедра прикладной математики и вычислительной техники, Институт информационных систем и технологий Ростовского государственного строительного университета, ул. Социалистическая, 162, г. Ростов-на-Дону, 344022, e-mail: ktn618@yandex.ru

Мисюра Валентина Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра прикладной математики и вычислительной техники, Институт информационных систем и технологий Ростовского государственного строительного университета, ул. Социалистическая, 162, г. Ростов-на-Дону, 344022, e-mail: vvmisyura2011@gmail.com

Belyavskii Grigorii Isaakovich – Doctor of Technical Science, Professor, Department of High Mathematics and Operations Research, Vorovich Institute of Mathematic, Mechanic and Computer Science of the Southern Federal University, Milchakov St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: beliaivsky@hotmail.com

Kondrat'eva Tat'yana Nikolaevna – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Department of Applied Mathematics and Computer Engineering, Institute of Information System and Technology of the Rostov State University of Civil Engineering, Sotsialisticheskaya St., 162, Rostov-on-Don, 344022, Russia, e-mail: ktn618@yandex.ru

Misyura Valentina Vladimirovna – Candidate of Physical and Mathematical Science, Associate Professor, Department of Applied Mathematics and Computer Engineering, Institute of Information System and Technology of the Rostov State University of Civil Engineering, Sotsialisticheskaya St., 162, Rostov-on-Don, 344022, Russia, e-mail: vvmisyura2011@gmail.com

Рассматривается задача моделирования случайных процессов с симметричной мерой Леви при помощи нейронной сети с обратной связью. Для представления безгранично делимой случайной величины используются дискретные симметричные случайные величины, получающиеся в результате вычитания пуассоновских случайных величин. Вычисление характеристической функции случайной величины производится при помощи обучения нейросети. Предложена эффективная архитектура нейронной сети, в которой состояниями входных нейронов являются независимые и одинаково распределенные случайные величины.

Ключевые слова: процессы Леви, мера Леви, характеристическая функция, нейронная сеть, нейрон, имитационное моделирование.

The article considers the problem of modeling random processes with symmetric Lévy measure using a neural network with feedback. Discrete symmetric random variables obtained by subtracting the Poisson random variables are used for infinitely divisible random variable representation. Calculating characteristic function is carried out using neural network learning. An efficient architecture of the neural network, in which the states of input neurons are independent and identically distributed random variables, is proposed.

Keywords: Lévy processes, Lévy measure, characteristic function, neural network, neuron, simulation.

Процессы Леви можно рассматривать как непрерывный аналог случайного блуждания с траекториями, непрерывными справа и имеющими пределы слева. Разрывы траекторий происходят в случайные моменты времени, число которых конечно на любом конечном временном интервале и не более чем счетное на бесконечном интервале. Важное место в теории процессов Леви занимают устойчивые и умеренно устойчивые процессы. Несмотря на то что основные результаты теории были получены в 30-е гг. XX в., интерес к процессам Леви не осла-

бевает в связи с их многочисленными приложениями, например, в таких различных областях, как стохастическая финансовая математика и квантовая теория поля. Следует также отметить, что исследователи постоянно получают новые теоретические и прикладные результаты в области моделирования с использованием процессов Леви. Наиболее полное изложение теории процессов Леви представлено в относительно недавних работах [1–3]. Аналитические свойства изложены в работе [4], разнообразные приложения – в [5].

*Статья поддержана грантом РФФИ № 14-01-00579а.

При применении метода Монте-Карло возникает необходимость в имитационных моделях процессов Леви. Им посвящен раздел в монографии R. Cont, P. Tankov [6].

В статье рассматривается задача моделирования случайных процессов с симметричной мерой Леви при помощи нейросети с обратной связью. При этом используются дискретные симметричные случайные величины, получающиеся в результате вычитания пуассоновских случайных величин [7]. В [8] вычисляется характеристическая функция случайной величины при помощи обучения нейросети.

Модель процесса Леви с ограниченной вариацией на решетке

Рассмотрим полный стохастический базис $\langle \Omega, \mathcal{F}_t, P \rangle$, относительно которого процесс X_t является процессом Леви. Будем рассматривать процессы Леви с траекториями ограниченной вариации. Характеристическая экспонента таких процессов имеет вид

$$\varphi(\lambda) = i\lambda\mu + \int_{-\infty}^{\infty} (\exp(i\lambda x) - 1) \nu(dx). \quad (1)$$

В (1) мера Леви $(-\nu(dx))$ удовлетворяет условию $\int_{-\infty}^{\infty} |x| \wedge 1 \nu(dx) < \infty$.

Рассмотрим значения процесса Леви в узлах решетки на R^+ : $Y_i = X_{ih}$. Последовательность Y_i удовлетворяет очевидному рекуррентному уравнению $Y_i = Y_{i-1} + \xi_i$, в котором начальное значение $Y_0 = 0$, случайные величины ξ_i – независимые, одинаково распределенные и безгранично делимые с общей характеристической функцией $\Phi_\xi(\lambda) = \exp(\lambda \varphi(\lambda))$. Определим интервал $[a, b] \subset [1, \infty)$, $a < 0 < b$. Оценим абсолютную величину разности $\left| \int_a^b \exp(i\lambda x) \nu(dx) - i\lambda \int_a^b x \nu(dx) \right| \leq \frac{y^2}{2} \int_a^b x^2 \nu(dx)$. Выберем наибольшее A и наименьшее B , удовлетворяющие неравенству

$$\int_{-\infty}^A \nu(dx) + \int_B^{\infty} \nu(dx) \leq 2\varepsilon.$$

Определим разбиение $\mathcal{J}_n$ интервала $[a, b]$ следующим образом: $\beta_0 = A$, β_j определяются рекуррентным уравнением $\int_{\beta_j}^{\beta_{j-1}} \nu(dx) = \lambda$, причем $n = \max \{j: \beta_m \leq a\}$. Аналогично определяется раз-

биение $\mathcal{J}_n$ интервала $[B, \infty)$. Рассмотрим приближение для интеграла

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(i\lambda x) \nu(dx) \approx i\lambda \int_a^b x \nu(dx) + \lambda \left(\sum_{j=1}^n \exp(i\lambda \beta_{j-1}) + \sum_{j=1}^m \exp(i\lambda \gamma_{j-1}) \right)$$

Погрешность такого приближения

$$\Delta \leq \frac{y^2}{2} \int_a^b x^2 \nu(dx) + |\lambda| (\beta_n - \beta_0 - a) + 2\varepsilon.$$

Таким образом, приближенное представление случайной величины ξ_j имеет вид

$$\xi_j \approx \bar{\mu}h + \sum_{k=1}^n \beta_{k-1} \zeta_k^j + \sum_{k=1}^m \gamma_{k-1} \zeta_k^j, \quad \zeta_k^j, \zeta_k^j - \text{семейство}$$

независимых и одинаково распределенных пуассоновских случайных величин с общей интенсивностью λh . Это следует из того, что выражение $\lambda h \exp(i\lambda \beta_{k-1})$ является характеристической функцией для случайной величины $\beta_{k-1} \zeta_k^j$;

$\bar{\mu} = h \left(\mu + \int_a^b x \nu(dx) \right)$ – константа в этом приближении.

Рассмотрим случай симметричной меры Леви, т.е. $\nu(A) = \nu(-A)$. Для симметричного случая очевидны равенства

$$a = -b, A = -B, \beta_k = -\gamma_k, m = n. \quad (2)$$

Из (2) следует приближенное представление случайной величины ξ_j :

$$\xi_j \approx \bar{\mu} + \sum_{k=1}^n \gamma_{k-1} (\zeta_k^j - \zeta_k^j) + \sum_{k=1}^n \beta_{k-1} \eta_k^j.$$

Симметричный закон распределения разности $\eta_k^j = \zeta_k^j - \zeta_k^j$ представляется быстроходящимся рядом

$$P(\eta_k^j = r) \approx \frac{(h)^{|r|}}{r!} \exp(-2\lambda h) \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(h)^{2s}}{(r+s)!}. \quad (3)$$

Оценка погрешности приближенного представления характеристической экспоненты

$$\Delta \leq y^2 \int_0^b x^2 \nu(dx) + 2(\beta_n - b)|\lambda| + \varepsilon.$$

Структура сети, вычисляющей процесс, представлена на рис. 1.

Начальное состояние выходного нейрона равно нулю, случайные величины ζ_j независимые и одинаково распределенные по симметричному закону (3). Обратная связь имеет один такт задержки.

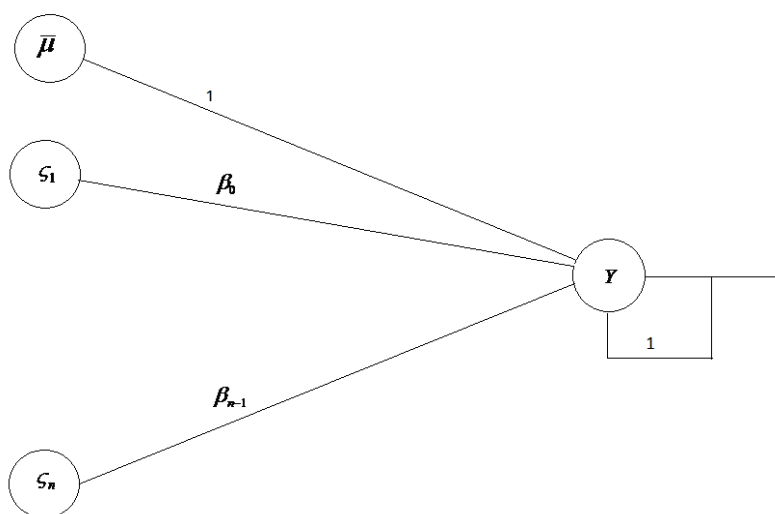


Рис. 1. Нейросетевая модель процесса Леви

Устойчивый симметричный процесс Леви

Устойчивые процессы Леви широко распространены как средство моделирования, например финансовых индексов и трафика. Мера Леви устойчивого симметричного процесса имеет вид

$$\nu(dx) = \frac{C}{|x|^{1+\alpha}} dx. \quad (4)$$

В (4) C – положительная константа, индекс устойчивости $\alpha < 1$. Последнее неравенство означает, что вариация ограничена почти всюду. Расчетные формулы для параметров нейросетевой модели

$$B = \left(\frac{C}{\alpha \varepsilon} \right)^{1/\alpha}, \quad \gamma_j = \left[\left(\frac{C}{\alpha \gamma_{j-1}^\alpha} - \lambda \right) \frac{\alpha}{C} \right]^{-\frac{1}{\alpha}}.$$

Очевидно, что $\left(\frac{C}{\alpha \gamma_{j-1}^\alpha} - \lambda \right) > 0$ для всех j . Отсюда следует, что $\lambda < \varepsilon$. Положим $\lambda = k\varepsilon, k < 1$, и рассмотрим неравенство для оценки погрешности

$$y^2 \frac{b^{2-\alpha}}{2-\alpha} + 2\lambda \left| \xi_n - b \right| y + \varepsilon \geq y^2 \frac{b^{2-\alpha}}{2-\alpha} + 2 \left(k\varepsilon \left(\frac{C}{\alpha \varepsilon} \right)^{1/\alpha} - b \right) |y| + \varepsilon.$$

Таким образом, оценка погрешности при $\alpha < 1$ стремится к бесконечности при $\varepsilon \rightarrow 0$, что делает нейросеть рассматриваемой архитектуры неприемлемой для моделирования устойчивого процесса Леви с индексом устойчивости меньше единицы.

Умеренно устойчивый симметричный процесс Леви

Мера Леви для данного процесса выглядит следующим образом:

$$\nu(dx) = \frac{C}{|x|^{1+\alpha}} \exp(-\delta|x|) dx.$$

При $\alpha < 1$ процесс Леви – процесс ограниченной вариации.

Скачки умеренно устойчивого процесса в окрестности нуля ведут себя как скачки устойчивого процесса. Большие скачки за счет множителя $\exp(-\delta|x|)$ ведут себя умеренно. Умеренно устойчивые процессы особенно популярны при моделировании поведения финансовых индексов [9]. Формулы для вычисления параметров для нейросети будут иметь следующий вид:

$$B = \frac{1}{\delta} \ln \frac{1}{\delta \varepsilon},$$

$$\frac{(+\delta \beta_{j-1})^{-\alpha} + \alpha \delta \beta_j}{\alpha (-\alpha \beta_j^\alpha)} =$$

$$= \frac{(+\delta \beta_{j-1})^{-\alpha} + \alpha \delta \beta_{j-1}}{\alpha (-\alpha \beta_{j-1}^\alpha)} - \lambda \exp(-\delta \beta_{j-1}).$$

Положив $\lambda = k\varepsilon$ и $b = \varepsilon$, получим оценку погрешности $\Delta \leq y^2 \frac{\varepsilon^{2-\alpha}}{2-\alpha} + 2 \left(k\varepsilon \left(\frac{1}{\delta} \ln \frac{1}{\delta \varepsilon} - b \right) |y| + \varepsilon \right)$, ко-

торая стремится к нулю при $\varepsilon \rightarrow 0$. Это означает, что предлагаемая архитектура нейросети вполне приемлема для моделирования данного процесса Леви. Одна из траекторий такого процесса представлена на рис. 2.

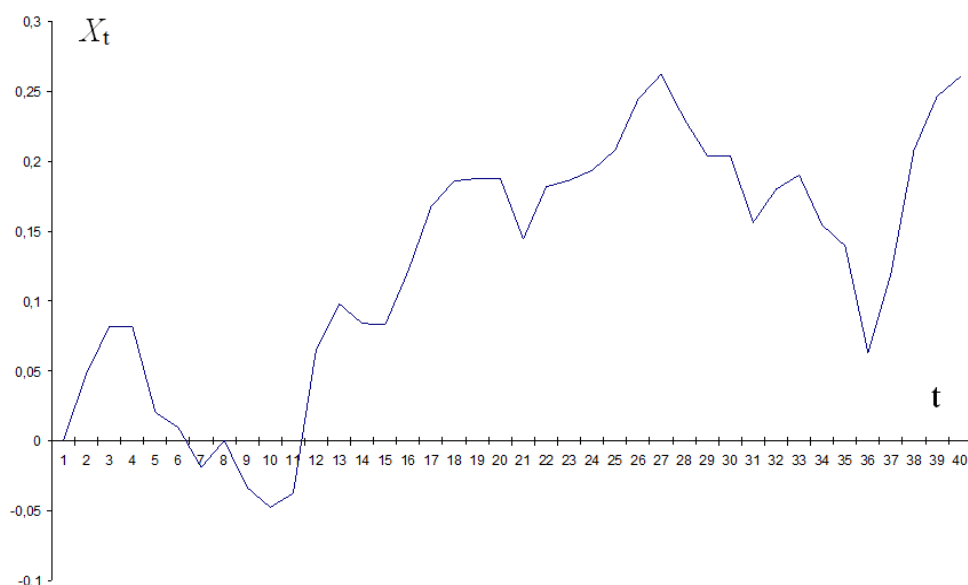


Рис. 2. Траектория умеренно стабильного процесса с параметрами: $C = 1$; $\alpha = 0,5$; $\delta = 1$

Заключение

Эффективность предложенной архитектуры нейронной сети заключается в том, что состояния входных нейронов – независимые и одинаково распределенные случайные величины. Этот результат получается в результате неравномерного разбиения фазовой шкалы. Однако не для всех процессов такая техника применима. В статье приводится пример такого процесса.

Литература

1. Bertoin J. *Lévy processes*. Cambridge, 1996. 265 p.
2. Sato K. *Lévy processes and infinitely divisible distributions*. Cambridge, 1999. 486 p.
3. Samorodnitsky G., Taqqu M. S. *Stable non-Gaussian random processes. Stochastic models with infinite variance*. N.Y., 1994. 632 p.
4. Jacob N. *Pseudo-differential operators and Markov processes*. Berlin, 1996. 475 p.
5. Barndorff-Nielsen O. E., Mikosch T. *Lévy Processes – Theory and Applications*. Boston, 2001. 401 p.
6. Cont R., Tankov P. *Financial modelling and jump processes*. N.Y., 2004. 533 p.
7. Белявский Г., Никоненко Н. Алгоритм расчета безарбитражной цены финансового обязательства на основе дискретизации процессов Леви // Науч.-техн. ведомости Санкт-Петербургского гос. политехн. ун-та. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2012. Т. 3, № 150. С. 56–59.

8. Dente A. Characteristic functions and process identification by neural networks // *Neural Networks*. 1997. Vol. 10, № 8. P. 1465–1471.
9. Ширяев А.Н. *Основы стохастической финансовой математики*. Т. 1. М., 2004. 512 с.

References

1. Bertoin J. *Lévy processes*. Cambridge, 1996, 265 p.
2. Sato K. *Lévy processes and infinitely divisible distributions*. Cambridge, 1999, 486 p.
3. Samorodnitsky G., Taqqu M.S. *Stable non-Gaussian random processes. Stochastic models with infinite variance*. N.Y., 1994, 632 p.
4. Jacob N. *Pseudo-differential operators and Markov processes*. Berlin, 1996, 475 p.
5. Barndorff-Nielsen O. E., Mikosch T. *Lévy Processes – Theory and Applications*. Boston, 2001, 401 p.
6. Cont R., Tankov P. *Financial modelling and jump processes*. N.Y., 2004, 533 p.
7. Belyavskii G., Nikonenko N. Algoritm rascheta bezarbitrazhnoi tseny finansovogo obyazatel'stva na osnove diskretizatsii protsessov Levi [The algorithm for calculating arbitrage-free price of financial liabilities based on the Levy processes sampling]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*, 2012, vol. 3, no 150, pp. 56-59.
8. Dente A. Characteristic functions and process identification by neural networks. *Neural Networks*. 1997, vol. 10, no 8, pp. 1465-1471.
9. Shiryayev A.N. *Osnovy stokhasticheskoi finansovoi matematiki* [Essentials of stochastic financial mathematics]. Vol. 1. Moscow, 2004, 512 p.

УДК 519.217.2+621.391.82

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-19-24

О РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОЦЕНИВАНИЯ СКРЫТЫХ ПОЛУМАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ ФЕРГЮСОНОВСКОГО ТИПА

© 2015 г. В.М. Деундяк, М.А. Жданова

Деундяк Владимир Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра алгебры и дискретной математики, Институт математики, механики и компьютерных наук Южного федерального университета; старший научный сотрудник, НИИ «Спецвузавтоматика», ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: vlade@math.sfedu.ru

Жданова Мария Андреевна – магистр, кафедра алгебры и дискретной математики, Институт математики, механики и компьютерных наук Южного федерального университета, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: mary.zhdanova@gmail.com

Deundyak Vladimir Mikhailovich – Candidate of Physical and Mathematical Science, Associate Professor, Department of Algebra and Discrete Mathematics, Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science of the Southern Federal University; Senior Researcher, SRI «Specvuzavtomatika», Milchakov St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: vlade@math.sfedu.ru

Zhdanova Mariya Andreevna – Master, Department of Algebra and Discrete Mathematics, Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science of the Southern Federal University, Milchakov St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: mary.zhdanova@gmail.com

Рассматривается скрытая полумарковская модель источника ошибок фергюсоновского типа. Для нее предлагается решение классической задачи теории скрытых полумарковских моделей – задачи оценивания. Предварительно на основе подхода Ю решается задача оценивания для расширенной скрытой полумарковской модели. Полученные теоретические результаты позволят в дальнейшем осуществлять анализ средств помехоустойчивого кодирования путем имитационного моделирования каналов связи.

Ключевые слова: модель источника ошибок, поток ошибок, цифровой канал связи, скрытая полумарковская модель, задача оценивания.

In the paper, we examine a hidden semi-Markov error source model of the Ferguson's type. For the considered model, we solve one of the classical problems of the hidden semi-Markov models theory (evaluation problem). As an intermediate step we suggest a solution of the same problem for the extension of hidden semi-Markov model based on the approach proposed by Yu. Obtained theoretical results make it possible to analyze noiseless coding methods by simulating digital data transmission channels.

Keywords: error source model, error flow, digital transmission channel, Hidden semi-Markov Model, evaluation problem.

Для обеспечения высококачественной передачи данных по цифровым каналам в настоящее время широко используются методы алгебраического помехоустойчивого кодирования. Для экспериментального исследования этих методов и подбора наиболее подходящего средства защиты для каждого конкретного канала связи можно использовать предложенную в [1, 2] информационную систему оценки применимости схем алгебраического помехоустойчивого кодирования (ИС ОПСАПК). Важной частью такой системы является база моделей источников ошибок, которые позволяют производить генерацию последовательностей ошибок с заданными параметрами и с их помощью проводить имитационные эксперименты. В качестве генераторов потоков ошибок удобно использовать достаточно общие модели. При выборе класса таких моделей важно учитывать возможность решения обратной задачи, т.е. задачи подбора по последовательности ошибок в реальном ка-

нале модели, способной генерировать такую последовательность. Подходящим для этого представляется класс скрытых полумарковских моделей (например, [3–9]). В [6] построена общая скрытая полумарковская модель (ОСПММ) и предложены решения для ряда важных задач теории скрытых марковских и полумарковских моделей. На основе подхода [6] в работе [10] решена задача оценивания скрытых полумарковских QR-моделей [7], что позволяет решать задачу подбора по каналному потоку ошибок такой модели из имеющейся базы, которая может генерировать наиболее близкие потоки ошибок. В [8] для скрытой полумарковской модели фергюсоновского типа построено полиномиальное представление, позволяющее эффективно проводить генерацию выходных последовательностей. В настоящей работе предлагается решение задачи оценивания скрытой полумарковской модели фергюсоновского типа.

Общая скрытая полумарковская модель Ю

Скрытая полумарковская модель представляет собой расширение скрытой марковской модели путем замены марковского скрытого процесса полумарковским, при котором модель может находиться в каждом состоянии в течение нескольких моментов времени. В [6] сформулировано определение ОСПММ таким образом, что построенная модель включает в себя известные ранее модели этого класса.

Прежде чем привести определение ОСПММ, введем следующие необходимые обозначения. Рассмотрим дискретную цепь Маркова с набором состояний $S = \{1, \dots, N\}$. Последовательность состояний будем обозначать $S_{t_1:t_m} = S_{t_1}, \dots, S_{t_m}$, где $t_1, \dots, t_m$ – последовательность отсчетов времени ($t_i \in \mathbb{Z}$). Далее $S_{t_1:t_m} = i$ означает, что цепь Маркова находится в состоянии i в течение $[t_1, t_m]$; $S_{[t_1:t_m]} = i$ представляет собой $S_{t_1:t_m} = i$ при выполнении дополнительного условия, что момент времени t_1 – начало состояния i ; $S_{[t_1:t_m]} = i$ означает $S_{t_1:t_m} = i$ при условии, что момент t_m – момент окончания состояния i ; $S_{[t_1:t_m]} = i$ представляет собой $S_{t_1:t_m} = i$ при выполнении условий, что в момент t_1 – начало, а в t_m – окончание состояния i . В случаях, когда индексы слишком длинные, будем вместо $O_{t_1:t_m}$ писать $O_{t_1}^{t_m}$.

Согласно [6], ОСПММ называется набор

$$\lambda = \{S, D, \mathbf{A}, \Pi, V, \mathbf{B}\},$$

где $S = \{1, \dots, N\}$ – алфавит состояний модели; $D = \{1, \dots, d_{\max}\}$ – алфавит длительностей состояний; $\mathbf{A} = \{a_{(i,d)(i',d')}\}_{(i,d)(i',d') \in S \times D}$ – матрица вероятностей переходов для обобщенных состояний из $S \times D$, где $a_{(i,d)(i',d')} = P[S_{t+1:t+d'} = i' | S_{t=d+1:t} = i]$ и $a_{(i,d')(i,d)} = 0$; $\Pi = \{\pi_{i,d}\}_{(i,d) \in S \times D}$ – набор начальных распределений вероятностей обобщенных состояний $\pi_{i,d} = P[S_{t-d+1:t} = i]$; $V = \{v_1, \dots, v_M\}$ – выходной алфавит; $\mathbf{B} = \{b_{i,d}(o_1, \dots, o_d)\}_{(i,d) \in S \times D, (o_1, \dots, o_d) \in V^d}$ – набор распределений вероятностей наблюдений $(\hat{o}_1, \dots, \hat{o}_d) \in V^d$.

Заметим, что модель из [6] предполагает невозможность самоперехода между обобщенными состояниями. Это требование не является существенным для решения задачи оценивания, поэтому, говоря об ОСПММ, будем иметь в виду чуть более общую, чем в [6], модель, допускающую самопереход.

ОСПММ обобщает такие известные модели, как скрытая марковская модель с явно заданной плотно-

стью длительности состояний [4], скрытая марковская модель с непрерывно изменяющейся длительностью из [3] и сегментные скрытые марковские модели из [5].

Скрытая полумарковская модель источника ошибок фергюсоновского типа

Рассмотрим симметричный стационарный идеально синхронизированный цифровой канал передачи данных C , по которому передается информация в виде последовательностей символов q -го алфавита, отождествляемого с полем Галуа F_q . Канал C может находиться в одном из N различных физических состояний в течение некоторого промежутка времени, после чего переходит в следующее состояние. Предполагается, что для произвольного состояния распределение длительностей пребывания в нем фиксировано. В каждом из состояний могут возникать независимые аддитивные ошибки с собственным фиксированным распределением.

Построим математическую модель источника ошибок в канале C . Набору физических состояний канала поставим в соответствие алфавит $S = \{1, \dots, N\}$ математических состояний. Вероятности переходов между состояниями зададим матрицей $\mathbf{A} = \{a_{ij}\}_{i,j=1}^N$, а начальное распределение вероятностей состояний – вектором $\pi = \{\pi_i\}_{i=1}^N$. Пусть $D = \{1, \dots, d_{\max}\}$ – множество всех возможных длительностей по всем состояниям, а элемент $p_i(d)$ матрицы $\mathbf{F} = \{p_i(d)\}_{i,d=1}^{N,D}$ – вероятность наблюдения длительности d при условии, что канал передачи данных C находится в состоянии i . Выходным алфавитом математической модели является алфавит канала, т.е. поле Галуа F_q , а вероятности наблюдения различных значений ошибки в различных состояниях канала задаются в виде матрицы $\mathbf{B} = \{b_{ij}\}_{i,j=1}^{N,q}$. Построенный набор

$$\lambda = \{S, \mathbf{A}, \pi, F_q, \mathbf{B}, D, \mathbf{F}\} \quad (1)$$

представляет собой одну из классических скрытых полумарковских моделей, известную в литературе как скрытая марковская модель с явно заданной плотностью длительности состояний [6]. Эта модель была впервые предложена Фергюсоном в [11]. Для краткости в дальнейшем будем называть ее скрытой полумарковской моделью фергюсоновского типа.

Модель (1) является ОСПММ из работы [6] с наложенными на нее следующими дополнительными ограничениями:

а) текущее состояние не зависит от длительности предыдущего состояния;

б) текущая длительность определяется только текущим состоянием и не зависит от предыдущего состояния и его длительности;

в) наблюдения символов выходного алфавита внутри длительности полагаются условно независимыми с распределением вероятностей, зависящим только от текущего состояния, но не от его длительности.

Заметим, что ограничения а), б) можно записать в виде

$$a_{(i,d)(j,d')} = a_{ij} \cdot p_j(d'), \quad (2)$$

$$\pi_{i,d} = \pi_i \cdot p_i(d). \quad (3)$$

Отметим также, что если алфавит возможных длительностей содержит только один элемент и, следовательно, матрица F представляет собой вектор длины N , все элементы которого равны 1, то скрытая полумарковская модель типа Фергюсона сводится к скрытой марковской модели.

Процесс генерации последовательности ошибок посредством модели типа Фергюсона выглядит следующим образом.

Этап 1. В соответствии либо с вектором π (в момент времени $t=1$), либо с матрицей A выбирается текущее состояние.

Этап 2. В выбранном состоянии i с использованием $p_i(d)$ определяется длина временного промежутка, в течение которого система будет находиться в i -м состоянии.

Этап 3. В каждой точке этого отрезка посредством b_{ik} генерируется наблюдение.

Решение задачи оценивания общей скрытой полумарковской модели

Рассмотрим ОСПММ $\lambda = \{S, D, A, \Pi, V, B\}$ и некоторую последовательность $O_{1:T}$ над алфавитом V . Под задачей оценивания общей скрытой полумарковской модели будем понимать задачу вычисления вероятности генерации последовательности $O_{1:T}$ моделью λ .

В [6] предлагаются формулы для решения этой задачи при следующих предположениях:

1) первое наблюдаемое состояние началось в момент времени $t=1$ или до него;

2) последнее наблюдаемое состояние закончилось строго в момент времени T .

Отметим, что 1) означает, что нам известна только часть символов, порожденных первым наблюдаемым состоянием. В этом случае модель Ю предлагает заменять вероятность неполного слова $b_{i,d}(O_{t-d+1:t})$ (где $t-d+1 \leq 1$ и $t \geq 1$) на маргинальную вероятность $b_{i,d}(O_{1:t})$.

Вероятность генерации последовательности $O_{1:T}$ моделью λ при предположениях 1), 2) будем обозначать $P_{Yu}[O_{1:T}]$, где индекс Yu означает, что последнее состояние закончилось строго в момент времени T . Отметим, что $P_{Yu}[O_{1:T}]$ фактически представляет со-

бой условную вероятность наблюдать последовательность $O_{1:T}$ при условии, что последнее наблюдаемое состояние закончилось в момент времени T . Для решения этой задачи в [6] вводится величина $\bar{\alpha}_t(i,d) := P[S_{t-d+1:t} = i | O_{1:t}]$, где $(i,d) \in S \times D$, и предлагаются следующие рекуррентные формулы по параметру t :

$$P_{Yu}[O_{1:t}] = \begin{cases} 1, t \leq 0, \\ \sum_{i \in S} \sum_{d \in D} P_{Yu}[O_{1:t-d}] \bar{\alpha}_t(i,d) b_{i,d}(O_{t-d+1:t}), t > 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$\bar{\alpha}_t(i,d) = \begin{cases} \pi_{i,d} p_i(d), t \leq 0, \\ \sum_{i' \in S} \sum_{d' \in D} \bar{\alpha}_{t-d}(i',d') b_{i',d'}^*(O_{t-d-d'+1}^{t-d}) a_{(i',d')(i,d)}, t > 0; \end{cases} \quad (5)$$

$$b_{i',d'}^*(O_{t-d-d'+1}^{t-d}) = b_{i',d'}(O_{t-d-d'+1}^{t-d}) \frac{P_{Yu}[O_{1:t-d-d'}]}{P_{Yu}[O_{1:t-d}]}$$

В [6] отмечено, что такой способ позволяет избежать проблемы антипереполнения, т.е. потери вычислительной точности.

Для прикладных задач представляет интерес решение задачи оценивания без дополнительных предположений, т.е. когда первое наблюдаемое состояние началось в момент времени $t=1$ или до него, а последнее закончилось в момент времени T или после него. Мы будем предполагать, что последовательность $O_{1:T}$ достаточно длинная. Тогда вероятность наблюдения некоторого обобщенного состояния (j,d) в момент времени T будем считать равной $\pi_{j,d}$, а вероятность времени пребывания в этом состоянии на момент времени T будем полагать равным $\frac{1}{d}$. Такие последовательности будем называть стабилизированными. Сформулируем решение задачи оценивания для случая стабилизированных последовательностей.

Теорема 1. Вероятность генерации стабилизированной последовательности $O_{1:T}$ ОСПММ λ может быть вычислена по формуле

$$P[O_{1:T}] = \sum_{j \in S} \sum_{d \in D} \frac{\pi_{j,d}}{d} \sum_{d_1=1}^d P_{Yu}[O_{1:T-d_1}] b_{j,d}(O_{T-d_1+1}^T), \quad (6)$$

где $P_{Yu}[O_{1:T-d_1}]$ определяется по формуле (4).

Доказательство. Рассмотрим общую скрытую марковскую модель λ и стабилизированную последовательность наблюдений $O_{1:T}$. Обозначим через $r_1, \dots, r_m$ последовательность обобщенных состояний, породивших наблюдаемую последовательность $O_{1:T}$. При этом предполагается, что в момент времени $t=1$ модель находилась в состоянии r_1 , а в момент $t=T$ – в состоянии r_m . Тогда r_m – последнее наблюдаемое обобщенное состояние.

Рассмотрим событие E_{d_1} , $d_1 \in [1, d_{\max}]$, заключающееся в том, что в момент времени T модель находилась в состоянии r_m на протяжении d_1 от счетов времени, т. е. в момент времени $T - d_1$ закончилось состояние r_{m-1} , а в момент времени $T - d_1 + 1$ началось состояние r_m .

Пусть $E^{j,d}$, где $(j,d) \in S \times D$, – событие, состоящее в том, что последнее наблюдаемое обобщенное состояние r_m равно (j,d) . Заметим, что

$$\forall d_1 \in [1, d_{\max}], d_1 > d : E^{j,d} \cap E_{d_1} = \emptyset \quad (7)$$

и имеет место равенство

$$E^{j,d} = \bigcup_{d_1=1}^{d_{\max}} (E^{j,d} \cap E_{d_1}).$$

Кроме того,

$$\begin{aligned} O_{1:T} &= O_{1:T} \cap \left(\bigcup_{j,d} E^{j,d} \right) \cap \left(\bigcup_{d_1=1}^{d_{\max}} E_{d_1} \right) = \\ &= O_{1:T} \cap \left(\bigcup_{j,d} \bigcup_{d_1=1}^{d_{\max}} E^{j,d} \cap E_{d_1} \right) = \bigcup_{j,d} \bigcup_{d_1=1}^{d_{\max}} E^{j,d} \cap E_{d_1} \cap O_{1:T}. \end{aligned}$$

Далее для произвольных событий $A_1, \dots, A_n$ будем использовать обозначение:

$$P[A_1, \dots, A_n] = P\left[\bigcap_{i=1}^n A_i\right].$$

Ввиду (7) из последнего соотношения вытекает

$$\begin{aligned} P[O_{1:T}] &= \sum_j \sum_d \sum_{d_1=1}^{d_{\max}} P[O_{1:T}, E^{j,d}, E_{d_1}] = \\ &= \sum_j \sum_d \sum_{d_1=1}^d P[O_{1:T}, E^{j,d}, E_{d_1}] = \\ &= \sum_j \sum_d \sum_{d_1=1}^d P[O_{1:T} | E^{j,d}, E_{d_1}] P[E^{j,d}, E_{d_1}]. \quad (8) \end{aligned}$$

Рассмотрим отдельно

$$P[O_{1:T} | E^{j,d}, E_{d_1}] = P[O_{1:T-d_1}, O_{T-d_1+1:T} | E^{j,d}, E_{d_1}].$$

События $O_{1:T-d_1}$ и $O_{T-d_1+1:T}$ являются условно независимыми относительно $E^{j,d} \cap E_{d_1}$. Поэтому

$$\begin{aligned} P[O_{1:T} | E^{j,d}, E_{d_1}] &= P[O_{1:T-d_1} | E^{j,d}, E_{d_1}], \\ P[O_{T-d_1+1:T} | E^{j,d}, E_{d_1}] &= P[O_{T-d_1+1:T} | E^{j,d}, E_{d_1}]. \end{aligned}$$

События $O_{1:T-d_1}$ и $E^{j,d}$ условно независимы относительно E_{d_1} , поэтому

$$P[O_{1:T-d_1} | E^{j,d}, E_{d_1}] = P[O_{1:T-d_1} | E_{d_1}].$$

Воспользовавшись определением E_{d_1} , нетрудно увидеть, что $P[O_{1:T-d_1} | E_{d_1}]$ фактически представляет собой вероятность наблюдать последовательность

$O_{1:T-d_1}$ при условии, что наблюдаемое в момент времени $T - d_1$ состояние закончилось именно в момент $T - d_1$, т.е. $P[O_{1:T-d_1} | E_{d_1}] = P_{Yu}[O_{1:T-d_1}]$. События $O_{T-d_1+1:T}$ и E_{d_1} условно независимы относительно $E^{j,d}$, поэтому

$$P[O_{T-d_1+1:T} | E^{j,d}, E_{d_1}] = P[O_{T-d_1+1:T} | E^{j,d}].$$

$P[O_{T-d_1+1:T} | E^{j,d}]$ представляет собой вероятность наблюдать частичную последовательность $O_{T-d_1+1:T}$ в обобщенном состоянии (j,d) , т.е. $b_{j,d}(O_{T-d_1+1:T})$. Таким образом,

$$P[O_{1:T} | E^{j,d}, E_{d_1}] = P[O_{1:T-d_1} | E_{d_1}] P[O_{T-d_1+1:T} | E^{j,d}].$$

Из условия стабилизированности последовательности $O_{1:T}$ вытекает, что $P[E^{j,d}, E_{d_1}] = \pi_{j,d} \cdot \frac{1}{d}$.

Таким образом, подставляя полученные выражения для $P[O_{1:T} | E^{j,d}, E_{d_1}]$ и $P[E^{j,d}, E_{d_1}]$ в формулу (8), получим искомую формулу (6).

Решение задачи оценивания скрытой полумарковской модели фергюсоновского типа

Сформулируем необходимые далее утверждения. Зафиксируем модель фергюсоновского типа $\lambda = \{S, A, \pi, F_q, B, D, F\}$ и рассмотрим бесконечную последовательность элементов алфавита F_q , которую будем обозначать O . Пусть $O_{1:T}$ – конечная подпоследовательность последовательности O . Будем считать, что нам известны элементы $O_{1:T}$, но о символах, находящихся за пределами отрезка $[1, T]$, мы ничего не знаем. Пусть $O_{t+1:t+d}$ – частичная подпоследовательность длины d последовательности O . Справедлива следующая лемма.

Лемма 1. Вероятность наблюдать подпоследовательность $O_{t+1:t+d}$ в состоянии i длительностью d , т.е. $b_{i,d}(O_{t+1:t+d})$, может быть вычислена следующим образом:

$$b_{i,d}(O_{t+1:t+d}) = \prod_{\theta=1}^d b_i^*(O_{t+\theta}), \quad (9)$$

где $b_i^*(O_{t+\theta}) = b_i(O_{t+\theta})$, если $t+\theta \in [1, T]$, и $b_i^*(O_{t+\theta}) = 1$, если $t+\theta \notin [1, T]$.

Доказательство. Введем в рассмотрение величину

$$b_i^*(O_{t+\theta}) = \begin{cases} b_i(O_{t+\theta}), & \text{если } t+\theta \in [1, T], \\ 1, & \text{если } t+\theta \notin [1, T] \end{cases}$$

и покажем, что справедливо (9).

По определению

$$b_{i,d}(O_{t+1:t+d}) = P[O_{t+1:t+d} | S_{[t+1:t+d]} = i].$$

В силу того, что для скрытой полумарковской модели фергюсоновского типа предполагается условная независимость наблюдений символов выходного алфавита при фиксированном состоянии и длительности, справедливо равенство

$$P[O_{t+1:t+d} | S_{[t+1:t+d]} = i] = \prod_{\theta=1}^d P[O_{t+\theta} | S_{[t+1:t+d]} = i],$$

где $O_{t+\theta}$ – θ -е наблюдение на отрезке $[t+1, t+d]$. В зависимости от значения t подпоследовательность $O_{t+1:t+d}$ может располагаться четырьмя различными способами относительно начала и конца последовательности $O_{1:T}$.

Так, при $t \geq 0$ и $t+d \leq T$ нам известны все элементы подпоследовательности $O_{t+1:t+d}$ и, следовательно,

$$P[O_{t+1:t+d} | S_{[t+1:t+d]} = i] = \prod_{\theta=1}^d b_i(O_{t+\theta}). \quad (10)$$

При $t \geq 0$ и $t+d > T$ известны только первые $k = T - t$ символов последовательности $O_{t+1:t+d}$, так как конец подпоследовательности $O_{t+1:t+d}$ лежит за пределами интервала $[1, T]$. В этом случае вероятность $P[O_{t+1:t+d} | S_{[t+1:t+d]} = i]$ будем заменять маргинальной вероятностью, т.е. вероятностью наблюдать префикс $O_{t+1:t+k}$ в состоянии i длительностью d :

$$P[O_{t+1:t+d} | S_{[t+1:t+d]} = i] = P[O_{t+1:t+k} | S_{[t+1:t+d]} = i] = \prod_{\theta=1}^k P[O_{t+\theta} | S_{[t+1:t+d]} = i] = \prod_{\theta=1}^k b_i(O_{t+\theta}). \quad (11)$$

Случай, когда $t < 0$ и $t+d \leq T$, аналогичен предыдущему. Теперь известны только последние $d - m$ символов подпоследовательности $O_{t+1:t+d}$, где $m = 1 - t$. Тогда вероятность $P[O_{t+1:t+d} | S_{[t+1:t+d]} = i]$ сводится к вероятности наблюдать суффикс $O_{t+m:t+d}$ в состоянии i длительностью d . Таким образом,

$$P[O_{t+1:t+d} | S_{[t+1:t+d]} = i] = \prod_{\theta=m}^d b_i(O_{t+\theta}). \quad (12)$$

При $t < 0$, $t+d > T$ известны только символы $O_{t+1:t+d}$, начиная с m -го и заканчивая k -м. Следовательно,

$$P[O_{t+1:t+d} | S_{[t+1:t+d]} = i] = \prod_{\theta=m}^k b_i(O_{t+\theta}). \quad (13)$$

Если $t < 0$, $t+d \leq 0$, как и в случае, когда $t > T$, нам неизвестен ни один символ подпоследовательности $O_{t+1:t+d}$. Последовательность O бесконечная, и, значит, можно утверждать, что какая-то частичная

последовательность символов из F_q^d обязательно реализовалась. Тогда $P[O_{t+1:t+d} | S_{[t+1:t+d]} = i] = 1$.

Используя введенное обозначение $b_i^*(O_{t+\theta})$, каждое из выражений (10)–(13) можем переписать в виде

$$b_{i,d}(O_{t+1:t+d}) = \prod_{\theta=1}^d b_i^*(O_{t+\theta}).$$

Лемма 2. Вероятность наблюдать последовательность $O_{1:t}$ при предположении, что первое состояние началось в момент времени $t' = 1$ или до него, а последнее закончилось в момент времени t , может быть вычислена по следующей рекуррентной формуле:

$$P_{Yu}[O_{1:t}] = \begin{cases} 1, & t \leq 0, \\ \sum_{i \in S} \sum_{d \in D} P_{Yu}[O_{1:t-d}] \bar{\alpha}_t(i, d) b_{i,d}(O_{t-d+1:t}), & t > 0, \end{cases} \quad (14)$$

где

$$\bar{\alpha}_t(i, d) = \begin{cases} \pi_i p_i(d), & t \leq 0, \\ \sum_{i' \in S} \sum_{d' \in D} \bar{\alpha}_{t-d}(i', d') \bar{b}_{i',d'}(O_{t-d-d'+1}^{t-d}) a_{i'i} p_i(d), & t > 0; \end{cases} \quad (15)$$

$$\bar{b}_{i',d'}(O_{t-d-d'+1}^{t-d}) = b_{i',d'}(O_{t-d-d'+1}^{t-d}) \frac{P_{Yu}[O_{1:t-d-d'}]}{P_{Yu}[O_{1:t-d}]}$$

и $b_{i,d}(O_{t-d+1:t})$ определяется в соответствии с формулой (9).

Доказательство проводится с помощью формул (2)–(5). Именно подставляя (2), (3) в формулы (4), (5), получим формулы (14), (15).

Теорема 2. Вероятность генерации стабилизированной последовательности $O_{1:T}$ скрытой полумарковской моделью фергюсоновского типа λ может быть определена по формуле

$$P[O_{1:T}] = \sum_{j \in S} \sum_{d \in D} \frac{\pi_j p_j(d)}{d} \sum_{d_1=1}^d P_{Yu}[O_{1:T-d_1}] b_{j,d}(O_{T-d_1+1}^T),$$

где $P_{Yu}[O_{1:T-d_1}]$ вычисляется по формулам (14), (15),

а $b_{j,d}(O_{T-d_1+1}^{T-d_1+d})$ – в соответствии с формулой (9).

Доказательство теоремы непосредственно вытекает из теоремы 1, соотношения (3) и лемм 1, 2. Именно подставив (3) в (6) и вычисляя $P_{Yu}[O_{1:T-d_1}]$ в

соответствии с леммой 1, а $b_{j,d}(O_{T-d_1+1}^{T-d_1+d})$ – с леммой 2, получим формулы для решения задачи оценивания для модели Фергюсона.

Заключение

В работе рассмотрена скрытая полумарковская модель источника ошибок фергюсоновского типа и для этой модели решена задача оценивания. Получен-

ные теоретические результаты дают возможность совершенствовать системы оценки применимости помехоустойчивого кодирования в каналах связи; именно они позволяют по регистрируемой в канале последовательности ошибок решать задачу подбора наиболее подходящего генератора фергюсоновского типа.

Литература

1. Деундяк В.М., Маевский А.Э., Могилевская Н.С. Методы помехоустойчивой защиты данных. Ростов н/Д., 2014. 309 с.
2. Могилевская Н.С., Чугунный К.А. Информационная система «Канал»: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2008614602. 24.09.2008.
3. Levinson S.E. Continuously variable duration hidden Markov models for automatic speech recognition // *Computer Speech and Language*. 1986. № 1 (1). P. 29–45.
4. Rabiner L.R. A tutorial on Hidden Markov Models and selected applications in speech recognition // *Proceedings of the IEEE* 1989. Vol. 77 (2). P. 257–286.
5. Ostendorf M., Digalakis V.V., Kimball O.A. From HMM's to segment models: A unified view of stochastic modeling for speech recognition // *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*. 1996. Vol. 4 (5). P. 360–378.
6. Shun-Zheng Yu. Hidden semi-Markov models // *Artificial Intelligence*. 2010. Vol. 174, № 2. P. 215–243.
7. Деундяк В.М., Жданова М.А. О применении скрытых марковских моделей в моделировании источников ошибок // *Обзорные прикладной и промышленной математики*. 2011. Вып. 3. С. 488.
8. Деундяк В.М., Жданова М.А. Полиномиальное представление скрытой полумарковской модели фергюсоновского типа // *Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Системный анализ и информационные технологии*. 2013. № 2. С. 71–78.
9. Tingting Liu, Lemeire J., Lixin Yang. Proper initialization of Hidden Markov models for industrial applications // *IEEE China Summit & International Conference on Signal and Information Processing (ChinaSIP)*, 9–13 July 2014. P. 490–494.
10. Деундяк В.М., Жданова М.А. Решение задачи оценивания скрытых полумарковских QP-моделей // *Вестник ДГТУ*. 2014. Т. 14, № 4. С. 22–39.
11. Ferguson J. D. Variable Duration Models for Speech // *Proc. Symp. on the Application of Hidden Markov Models to Text and Speech*. Princeton, NJ, 1980. P.143–179.

References

1. Deundyak V.M., Maevskii A.E., Mogilevskaya N.S. *Metody pomekhoustoichivoi zashchity dannykh* [Methods for interference-free data protection]. Rostov-on-Don, 2014, 309 p.
2. Mogilevskaya N.S., Chugunnyi K.A. *Informatsionnaya sistema «Kanal»* [Information system «Channel»]. Certificate, no 2008614602. 24.09.2008.
3. Levinson S.E. Continuously variable duration hidden Markov models for automatic speech recognition. *Computer Speech and Language*, 1986, no 1, pp. 29–45.
4. Rabiner L.R. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. *Proceedings of the IEEE*, 1989, vol. 77 (2), pp. 257–286.
5. Ostendorf M., Digalakis V.V., Kimball O.A. From HMM's to segment models: a unified view of stochastic modeling for speech recognition. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 1996, vol. 4 (5), pp. 360–378.
6. Shun-Zheng Yu. Hidden semi-Markov models. *Artificial Intelligence*, 2010, vol. 174, no 2, pp. 215–243.
7. Deundyak V.M., Zhdanova M.A. O primeneniі skrytykh markovskikh modelei v modelirovaniі istochnikov oshibok [On the application of hidden Markov models in the modeling error sources]. *Obozrenie prikladnoi i promyshlennoi matematiki*, 2011, vol. 3, p. 488.
8. Deundyak V.M., Zhdanova M.A. Polinomial'noe predstavlenie skrytoi polumarkovskoi modeli fergysonovskogo tipa [Polynomial representations of hidden semi-Markov models Ferguson type]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii*, 2013, no 2, pp. 71–78.
9. Tingting Liu, Lemeire J., Lixin Yang. Proper initialization of hidden Markov models for industrial applications. *IEEE China Summit and International Conference on Signal and Information Processing (ChinaSIP)*, 9–13 July 2014, p. 490–494.
10. Deundyak V.M., Zhdanova M.A. Reshenie zadachi otsenivaniya skrytykh polumarkovskikh QP-modelei [Solution to the problem of estimation of hidden semi-Markov QP-models]. *Vestnik DGTU*, 2014, vol. 14, no 4, pp. 22–39.
11. Ferguson J. D. Variable duration models for speech. *Symposium on the Application of Hidden Markov Models to Text and Speech*. Princeton, 1980, pp. 143–179.

УДК 551.501.81

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-25-30

МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЛОЩАДКИ ЗАСЕВА ГРАДОВЫХ ОБЛАКОВ

© 2015 г. М.В. Жарашуев, А.Х. Гергоков

Жарашуев Мурат Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Высокогорный геофизический институт, пр. Ленина, 2, г. Нальчик, КБР, 360030, e-mail: mgk777@mail.ru

Гергоков Ахмат Хыйсаевич – научный сотрудник, Высокогорный геофизический институт, пр. Ленина, 2, г. Нальчик, КБР, 360030.

Zharashuev Murat Vladimirovich – Candidate of Physical and Mathematical Science, Researcher, High-Mountain Geophysical Institute, Lenin Ave, 2, Nalchik, KBR, 360030, Russia, e-mail: mgk777@mail.ru

Gergokov Akhmat Khyisaevich – Researcher, High-Mountain Geophysical Institute, Lenin Ave, 2, Nalchik, KBR, 360030, Russia.

Рассматриваются методика, алгоритмы и программы автоматизированной радиолокационной идентификации области восходящего потока конвективных ячеек в кучево-дождевых облаках, что обеспечивает возможность измерения параметров конвективных ячеек, построения графиков временного хода параметров области, на которую проводилось активное воздействие. Исследования показали, что область в конвективной ячейке, являющейся объектом воздействия от второй до четвертой категории, где наблюдается нахождение максимальной отражаемости менее 20 дБ на высоте более 5 км, является областью воздействия.

Ключевые слова: автоматический, радар, идентификация, град, отражаемость, алгоритм, облака.

The technique, algorithms and automated radar identification of the upstream region of convective cells in the cumulonimbus cloud that provides the ability to measure the parameters of the convective cells, charting the time course of the parameters for which the area was conducted active influence. Studies have shown that, in the region of the cloud, where there is finding the maximum reflectivity at a height of more than 5 miles is an area of future hail.

Keywords: automated, radar, identification, hail, reflectivity, algorithms, cloud.

В связи с тем, что градобитие наносит большой урон народному хозяйству, еще в СССР начиная с 1956 г. под руководством Г.К. Сулаквелидзе велись интенсивные исследования в области изучения механизмов образования осадков, изучались процессы кристаллизации переохлажденных облаков, обосновывались методы внесения реагентов, проводились радиолокационные исследования облачности. В результате многолетних исследований было предложено несколько физических концепций активного воздействия на градовые процессы [1].

1. Полная кристаллизация переохлажденной части облака.

2. Теория конкуренции, предусматривающая увеличение концентрации зародышей града с целью замедления роста града за счет конкуренции за жидкокапельную влагу (Сулаквелидзе, 1963).

3. Укрупнение капель с последующим их замораживанием с целью создания большой концентрации конкурирующих зародышей града (Бартишвили, Ломинадзе и др., 1964).

4. Понижение траектории градин с целью ухудшения условий для их роста (Browning and Foote, 1977).

5. Динамическое воздействие с целью подавления восходящего потока (Вульфсон и Левин, 1967; Серегин, 1981).

6. Ускорение осадкообразования из областей будущего градообразования (Абшаев, 1966).

На сегодняшний день физической основой современной российской технологии противоградовой защиты является концепция ускорения осадкообразования из областей будущего градообразования [1]. Она предусматривает стимулирование более раннего и быстрого осадкообразования в областях будущего градообразования, чем при естественном ходе процесса, так как сокращение времени формирования осадков нарушает баланс скоростей, необходимый для поддержания зародышей града в зоне роста. Это достигается путем создания в областях нового роста начальной концентрации льдообразующих частиц $10^{10} \div 10^{11} \text{ м}^{-3}$, приводящей к их высокой концентрации, агрегации, обзёрнению за счет захвата облачных капель и образова-

нию снежной крупы через 6–8 мин после засева. Преждевременное выпадение этой крупы в областях слабых восходящих потоков может оказать серьезное микрофизическое и динамическое воздействие на облако, включая вымывание облачной воды, ослабление слабых восходящих потоков и их выхолаживание при таянии крупы ниже изотермы 0 °С.

В настоящее время существует множество автоматизированных систем, ведущих наблюдения за метеорологическими процессами. Но все же до сих пор воздействие на градовые процессы осуществляется в полуавтоматическом режиме [2]. Главной проблемой, стоящей перед разработчиками программного обеспечения, является отсутствие возможности автоматического определения и выделения области засева. На основе метода автоматической идентификации конвективных ячеек [1] и физической концепции воздействия на градовые процессы была разработана методика автоматического выделения и измерения параметров непосредственно области воздействия. Это позволит в дальнейшем не только существенно продвинуться на пути к полной автоматизации воздействия на градовые процессы, но и существенно подкорректировать методику оценки эффективности воздействия.

Оборудование, программа и методика проведения исследований

Исследования проводились на метеорологическом радиолокаторе МРЛ-5, работающем на длине волны 10,15 см с несущей частотой 2950 ± 15 МГц, расположенном в пригороде Ставрополя (45,11 с.ш., 42,106 в.д., высота над уровнем моря 453 м). При его работе применялось программное обеспечение АСУ-МРЛ [3], формирующее объемный файл обзора с шагом по азимуту 1°, по углу места 0,52 км и 18 углам места. Основное количество исследуемых случаев активного воздействия на градовые процессы фиксировалось системой АСУ-МРЛ. Под объемным файлом обзора понимаются первичные данные, полученные в результате сканирования локатором пространства с определенным шагом по азимуту, углу места и дальности. В автоматизированных системах используются различные шаг сканирования, алгоритмы и методики расчета радиолокационной отражаемости, которые учитывают поправки на ослабление сигнала, кривизну земли, потерю сигнала в волновом тракте локатора и т.д. [3]. Каждая автоматизированная радиолокационная система имеет собственный формат первичных данных, не воспринимаемых другими системами без конвертера, и использует собственный алгоритм обработки и визуализации

радиолокационной информации, предлагая пользователю определенный стандартный набор карт и опций. У пользователя есть доступ только к переработанной информации, но нет возможности вводить изменения в алгоритмы расчета или формировать новые карты. Главным инструментом исследования в данной работе является новый программный комплекс АСУ-ГРАД, представляющий собой мощный инструмент исследования макро- и микроструктуры облаков. Он осуществляет считывание и обработку данных различных автоматизированных систем, таких как АСУ-МРЛ, «АСУ-Антиград», «Мерком». Целью создания данной системы являются экспериментальные исследования метеообъектов, внедрение новых, нестандартных методик и технологий в противоградовых системах и сравнение данных с различных автоматизированных систем. Для этого разработаны конвертеры форматов объемных (первичных) файлов обзора от систем АСУ-МРЛ, «АСУ-Антиград» и «Мерком» и реализована методика автоматической идентификации конвективных ячеек [4]. На рис. 1 представлена карта максимальной отражаемости в системе АСУ-ГРАД с выделенными и пронумерованными областями зарождения града.

Любая карта представляет собой отображение земной поверхности в радиусе 208 км от места расположения локатора с нанесенными на нее населенными пунктами, с указанием радиусов полета ракет из пунктов воздействия (окружности, рис. 1), границ районов и т.д., различных параметров, полученных в результате обработки объемного файла обзора [3, 5], в частности максимальной отражаемости.

Задача распознавания области засева по существу является задачей распознавания образов и анализа сцен. Учитывая ее сложность, идентификацию площадки засева в облачной системе предлагается осуществлять по следующему алгоритму [4]:

- считывание данных с МРЛ;
- получение 40 матриц 800×800 значений, соответствующих горизонтальным сечениям с шагом 0,5 км;
- расчет матрицы 800×800 значений, соответствующей высотам максимальной отражаемости в столбе;
- выделение в поле значений максимальной отражаемости радиоза точек, ограничивающих замкнутые изолинии высот максимальной радиолокационной отражаемости;
- упорядочивание полученных точек, т.е. получение частей облаков;
- объединение их в единые поля замкнутых изолиний H ;
- определения категории объекта воздействия [1];

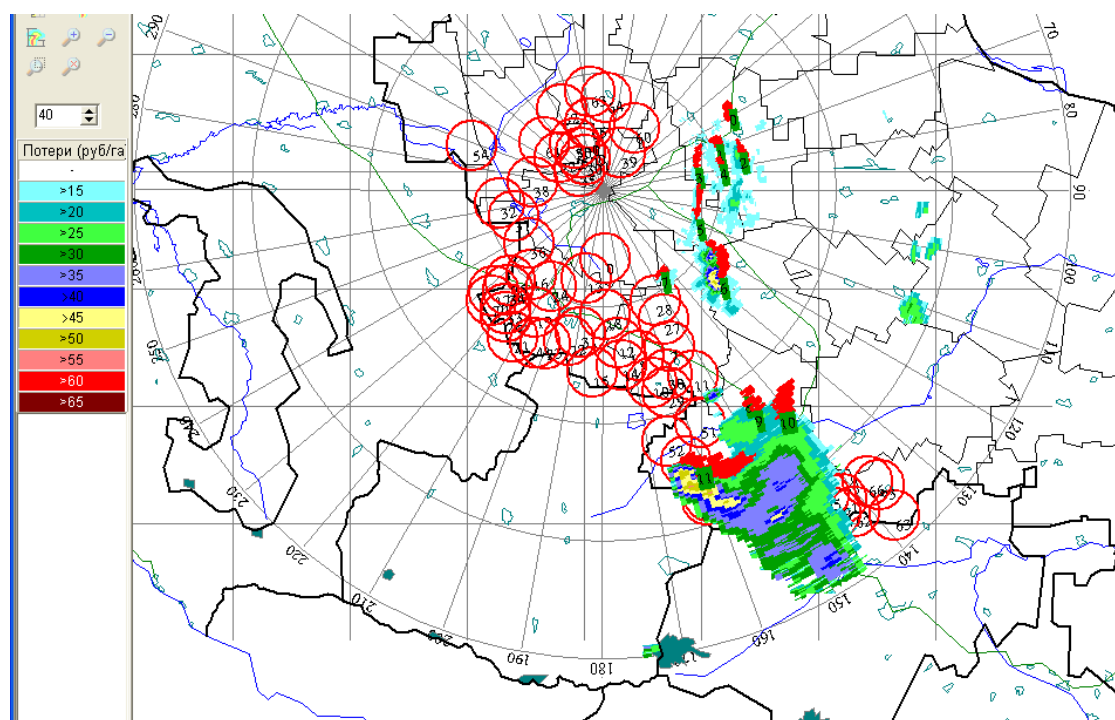


Рис. 1. Карта максимальной отражаемости с выделенными областями зарождения

- фильтрация конвективных ячеек, не подлежащих воздействию;
- идентификация областей воздействия, их нумерация в пространстве и в хронологическом порядке зарождения.

Физическая основа методики выделения области засева

Как показывает практика, по ходу перемещения градового облака на более низкую высоту сосредоточены так называемые фидерные облака, имеющие достаточно высокий водозапас [6]. Попадая в восходящие потоки движущегося градового облака, они затягиваются в верхнюю его часть, где формируется град, и постоянно подпитывают его, вследствие чего градовое облако начинает быстро расти в размерах.

Согласно концепции ускорения осадкообразования [1], являющейся физической основой современной российской технологии воздействия на градовые процессы, необходимо стимулировать более раннее и быстрое осадкообразование в областях будущего градообразования, чем при естественном ходе процесса. Сокращение времени формирования осадков нарушает баланс скоростей, необходимый для поддержания зародышей града в зоне роста. Зона формирования условий для зарождения града является переохлажденная часть области нового роста, где формируются условия для

зарождения града (преимущественно конденсационный и зарождающийся коагуляционный рост облачных частиц). Она расположена в фидерных облаках несимметричных градовых ячеек и во вновь развивающихся конвективных ячейках одноячеековых процессов в интервале температур $-5 \div -20$ °C и имеет отражаемость $Z_{10} < 15$ дБ. Однако исследования показывают, что в зоне формирования отражаемости достигают 20 дБ.

Стадия формирования условий для зарождения града, на которые направлено воздействие с целью нарушения баланса скоростей, необходимых для поддержания его зародышей в зоне роста, является длительной (20–30 мин) [1]. При этом сила восходящего потока фидерных облаков зависит от силы главного, так как является его частью. Логично было бы предположить, что максимальная отражаемость в столбе зоны формирования естественных зародышей будет стремиться к увеличению по мере роста частиц. И чем длиннее путь частицы до слияния с главной конвективной ячейкой, тем больше она произвела столкновений. В исследованиях менялись пороговые значения высот и отражаемостей. При значениях высот 5–6 км и отражаемости менее 20 dBz наблюдалось 87%-е совпадение с месторасположением площадок, выделенных в ручном режиме. При этом в подавляющем большинстве случаев площадь, выделенная в автоматическом режиме, превышала площадь, выделенную в ручном режиме, не более чем на 30 %.

Сравнительный анализ ручного и автоматического выделения области засева

С использованием метода автоматической идентификации [4] было проанализировано 173 случая воздействия на градовые процессы, развивавшиеся на территории Ставропольского края. В 141 случае область автоматически выделенных конвективных ячеек более чем на 80 % соответствовала выделенным в ручном режиме. При этом эффективность

воздействия Ставропольской ВС в периоды, из которых выбирались исследуемые случаи воздействия, а именно с 2007 по 2011 г., не опускалась ниже 95 %. Анализ этих процессов позволил выявить оптимальную формулу для автоматического выделения области засева. Ее можно считать оптимальной при высоте максимальной отражаемости в столбе выше 5–6 км. В целом данная методика показала, что в подавляющем большинстве случаев наблюдается почти полное сходство результатов (рис. 2).

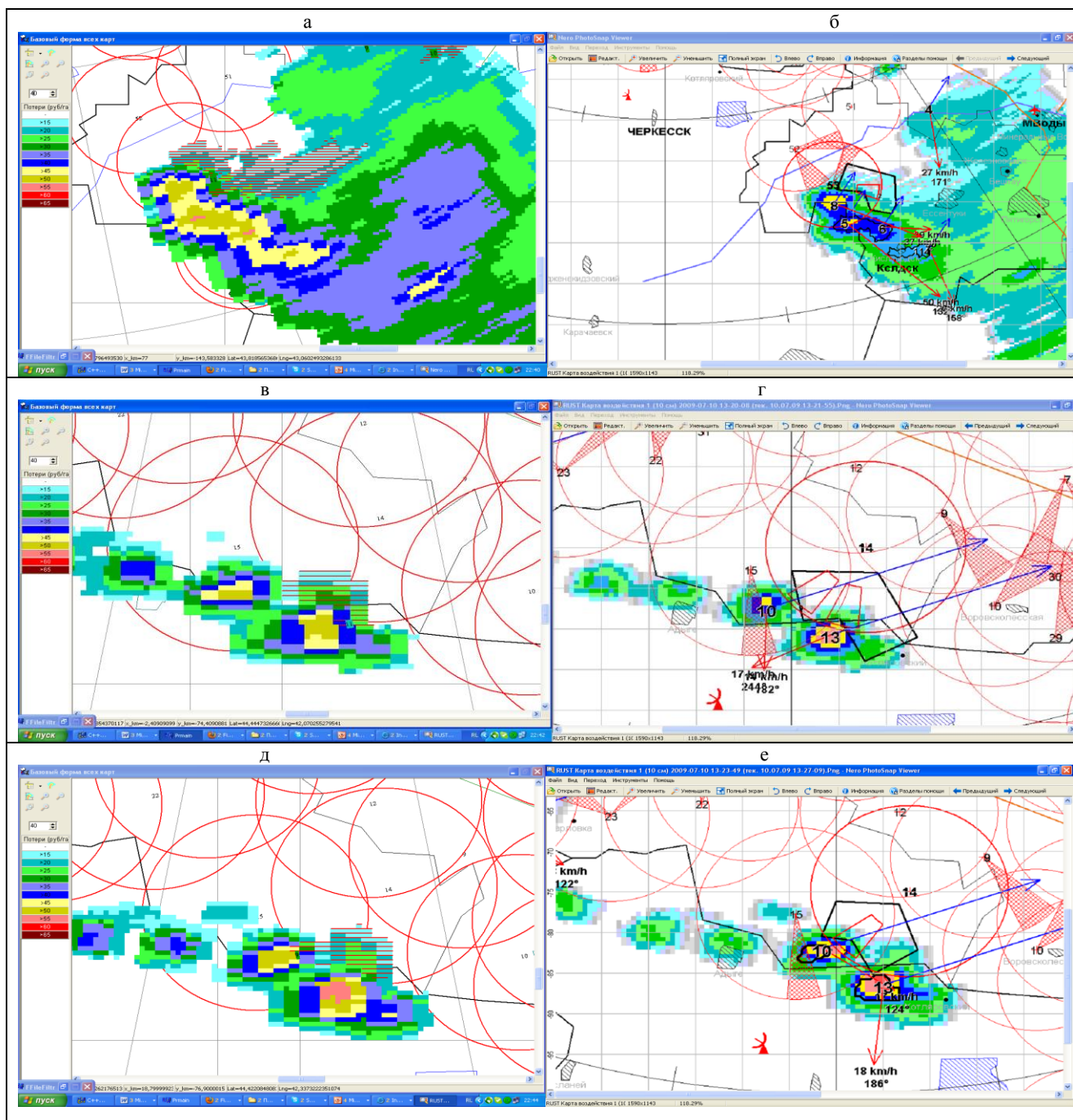


Рис. 2. Автоматически выделенные области засева (а, в, д), ручное реальное воздействие на эти же ячейки (б, г, е), Ставропольской ВС

Данные ручного выделения области воздействия могут существенно отличаться от данных автоматического выделения (рис. 3). В большинстве случаев расхождение являлось следствием ошибочного выделения области воздействия именно в ручном режиме. Как показано на рис. 3а, область засева захватила и левую часть верхнего облака. На

рис. 3б, в видно, что зона навеса радиоэха находится не слева, а между облаками, что и распознал автоматический метод. Ввиду того, что облако находилось на выходе защищаемой зоны, воздействующим не оставалось ничего, кроме обстрела, насколько это возможно для зоны, близкой к реальной зоне воздействия.

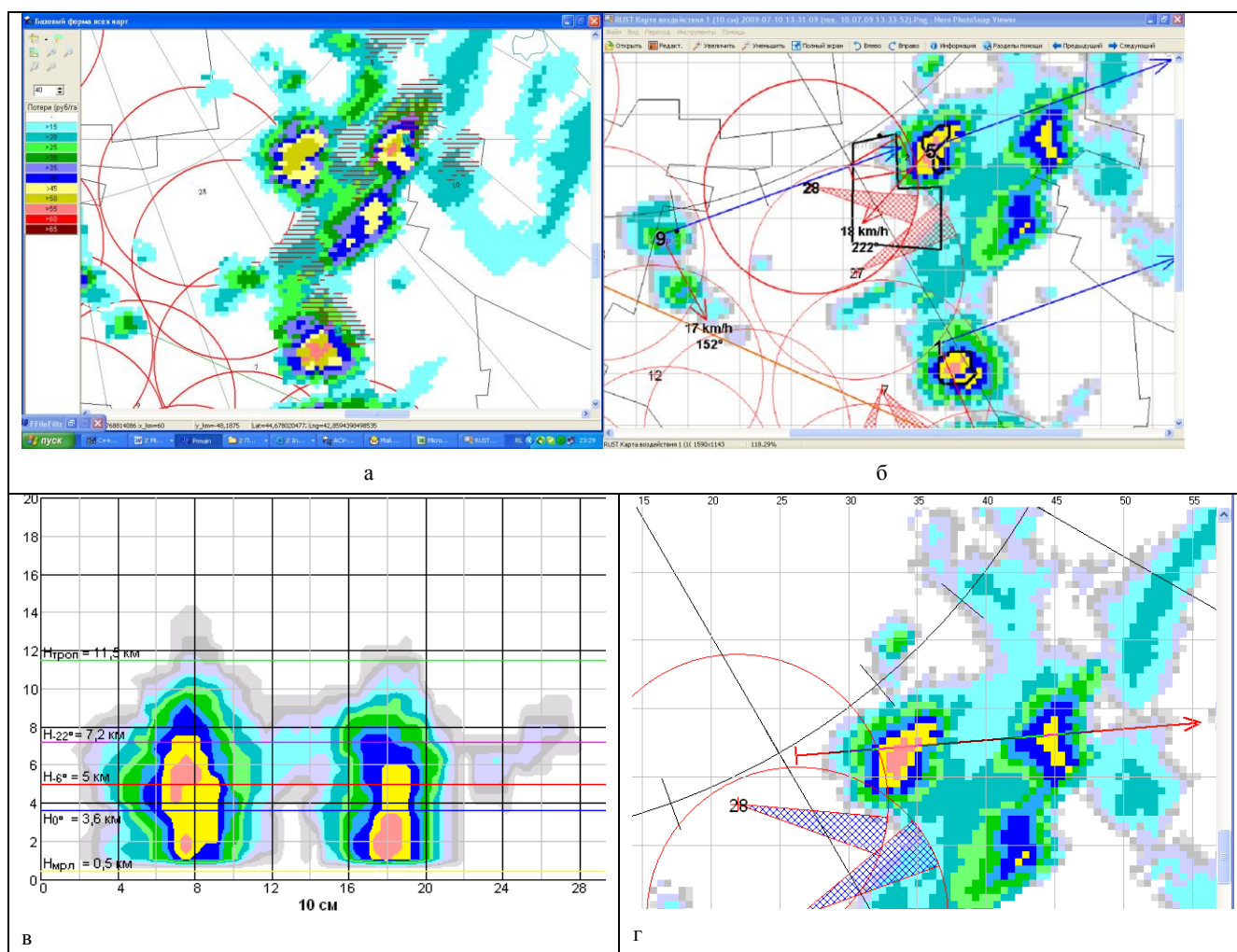


Рис. 3. Автоматически (а) и выделенная в ручном режиме (б) область, на которую проводилось реальное воздействие. Вертикальный разрез по высоте (в) и на плоскости (г)

Выводы

С использованием радиолокационной информации на основе метода автоматической идентификации конвективных ячеек был разработан новый метод обнаружения и распознавания фидерных облаков, которые являются объектами воздействия. В его основе лежат карта высот максимальной отражаемости и рассчитанные на ее основе параметры. Выведено оптимальное значение определения площадки засева для Ставропольского края (высота максимальной отражаемости – более 5 км при от-

ражаемости менее 20 дБ). Данная методика применима для корректировки существующей оценки физической эффективности и автоматизации воздействия на градовые процессы.

Литература

1. Абшаев М.Т. Основные положения автоматизированной технологии противоградовой защиты и перспективы ее развития // Докл. всерос. конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. М., 2008. С. 14–26.

2. Абшаев М.Т. Радиолокационное обнаружение града // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18, № 5. С. 483–494.
3. Тебугев А.Д. Автоматизированная система обработки радиолокационной информации и управления активным воздействием на градовые процессы: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Нальчик, 2003. 124 с.
4. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М., Жарашуев М.В. Автоматизированная радиолокационная идентификация, измерение параметров и классификация конвективных ячеек для целей защиты от града и штормоповещения // Метеорология и гидрология. 2010. № 3. С. 36–45.
5. Абшаев М.Т. Автоматизированные противоградовые комплексы // Тр. конф. стран СНГ. СПб., 2002. Т. 5. С. 15–18.
6. Синькевич А.А., Краус Т.В., Гхулам А.С., Куров А.Б. Исследование характеристик кучево-дождевых облаков большой мощности после воздействий с целью увеличения осадков // Метеорология и гидрология. 2013. № 9. С. 5–20.
7. tsessy [Reports of the All-Russian conference on physics of clouds and active influence on hydrometeorological processes]. Moscow, 2008, pp. 14–26.
8. Abshaev M.T. Radiolokatsionnoe obnaruzhenie grada [Radar detection of hail]. *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, 1982, vol. 18, no 5, pp. 483–494.
9. Tebuev A.D. Avtomatizirovannaya sistema obrabotki radiolokatsionnoi informatsii i upravleniya aktivnym vozdeystviem na gradovye protsessy [Automated system for radar data processing and management of active influence on hail processes]: avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Nalchik, 2003, 124 p.
10. Abshaev M.T., Abshaev A.M., Malkarova A.M., Zhara-shuev M.V. Avtomatizirovannaya radiolokatsionnaya identifikatsiya, izmerenie parametrov i klassifikatsiya konvektivnykh yacheek dlya tselei zashchity ot grada i shtormoopoveshcheniya [Automated radar identification, measurement parameters and classification of convective cells for the purpose of protection against hail and storm alerts]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2010, no 3, pp. 36–45.
11. Abshaev M.T. [Automated antihail systems]. *Trudy konferentsii stran SNG* [Proceedings of the CIS countries]. St. Petersburg, 2002, vol. 5, pp. 15–18.
12. Sin'kevich A.A., Kraus T.V., Gkhulam A.S., Kurov A.B. Issledovanie kharakteristik kuchevo-dozhdevykh oblakov bol'shoi moshchnosti posle vozdeystviy s tsel'yu uvelicheniya osadkov [Investigation of the characteristics of cumulonimbus clouds high power after exposure to increase precipitation]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2013, no 9, pp. 5–20.

References

Поступила в редакцию

23 апреля 2015 г.

УДК 519.87:66.096.5

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-31-36

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АМПЛИТУДЫ И ЧАСТОТЫ ВИБРАЦИЙ НА СТРУКТУРУ КИПЯЩЕГО ГРАНУЛИРОВАННОГО СЛОЯ*

© 2015 г. Е.С. Каменецкий, Н.С. Орлова, М.В. Волик

Каменецкий Евгений Самойлович – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий отделом математического моделирования, Южный математический институт Владикавказского научного центра РАН, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, 362027, e-mail: esk@smath.ru

Орлова Наталья Сергеевна – и.о. ученого секретаря, Южный математический институт Владикавказского научного центра РАН, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, 362027; старший преподаватель, кафедра математики и информатики, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, ул. Молодежная, 7, г. Владикавказ, 362002, e-mail: norlova.umi.vnc@gmail.com

Волик Мария Владимировна – старший преподаватель, кафедра математики и информатики, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, ул. Молодежная, д. 7, г. Владикавказ, 362002; младший научный сотрудник, Южный математический институт Владикавказского научного центра РАН, ул. Маркуса, 22, г. Владикавказ, 362027, e-mail: volikmv@mail.ru

Kamenetskii Evgenii Samoilovich – Doctor of Physical and Mathematical Science, Associate Professor, Head of the Department of Mathematical Modeling, Southern Mathematical Institute of Vladikavkaz Scientific Centre RAS, Markus St., 22, Vladikavkaz, 362027, Russia, e-mail: esk@smath.ru

Orlova Natal'ya Sergeevna – Acting Scientific Secretary, Southern Mathematical Institute of Vladikavkaz Scientific Centre RAS, Markus St., 22, Vladikavkaz, 362027; Senior Lecturer, Department of Mathematics and Computer Science, Financial University under the Government of the Russian Federation, Molodezhnaya St., 7, Vladikavkaz, 362002, Russia, e-mail: norlova.umi.vnc@gmail.com

Volik Mariya Vladimirovna – Senior Lecturer, Department of Mathematics and Computer Science, Financial University under the Government of the Russian Federation, Molodezhnaya St., 7, Vladikavkaz, 362002; Junior Researcher, Southern Mathematical Institute of Vladikavkaz Scientific Centre RAS, Markus St., 22, Vladikavkaz, 362027, Russia, e-mail: volikmv@mail.ru

Исследовался кипящий слой гранулированного материала. Теоретическое исследование процесса виброкипения (виброоживления) осуществлялось с использованием свободно распространяемого пакета для решения прикладных задач гидро- и аэромеханики OpenFOAM. Представлены результаты численных расчетов распределения объемной доли частиц в виброкипящем слое в зависимости от скорости подачи газового потока, амплитуды и частоты вибрации. Выявлены режимы виброкипения (скорость подачи газового потока, амплитуда и частота вибрации), при которых наблюдается наибольшая степень расширения слоя. Получено, что при небольших значениях скорости подачи газового потока влияние частоты колебаний на степень расширения слоя незначительное.

Ключевые слова: кипящий гранулированный слой, режимы виброкипения, двухжидкостная модель, кинетическая теория гранулярных газов, пакет OpenFOAM, решатель twoPhaseEulerFoam.

The vibrofluidized layer was investigated. The theoretical investigation of vibrofluidization was performed using redistributable package OpenFOAM for solution of applied problems of hydro and aerodynamics. Numerical calculations of volume particle distribution depending on the gas feedrate, amplitude and frequency of vibrations were presented. The modes of vibrofluidization were identified. These modes provide the greatest degree of expansion of vibrofluidized layer. It was found that the effect of the vibration frequency on the expansion layer is negligible at low values of the feed rate of the gas flow.

Keywords: fluidized layer, vibrofluidization modes, two-fluid model, kinetic theory of granular gas, OpenFOAM, solver twoPhaseEulerFoam.

Кипящий (псевдооживленный) и виброкипящий слои гранулированных материалов очень часто используются в аппаратах для очистки газа, сушки гранулированных материалов и различных процессах химической технологии. Следует отметить, что при совмещении процессов кипения и виброкипания гранулированных слоев (когда слой частиц продувают потоком газа и воздействуют на слой внешними виб-

рациями) площадь контакта фаз значительно больше, чем в случае процесса кипения. В связи с этим важно исследовать влияние амплитуды и частоты вибраций (колебаний) на структуру кипящего гранулированного слоя.

В данной работе исследуется влияние амплитуды и частоты вибраций на структуру кипящего гранулированного слоя. Были проведены трехмерные расчеты

* Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований по стратегическим направлениям развития науки Президиума РАН № 1 «Фундаментальные проблемы математического моделирования».

распределения объемной доли частиц в вибрирующем слое с использованием свободно распространяемого пакета для численного моделирования задач гидроаэромеханики OpenFOAM (англ. Open Source Field Operation And Manipulation CFD ToolBox) при поддержке программы «Университетский кластер» с удаленным доступом к консоли на управляющем узле вычислительного кластера JSCC RAS веб-лаборатории UniHUB [1]. Благодаря открытому исходному коду в OpenFOAM возможно создание собственных решателей. Для описания процесса вибрирования был доработан решатель twoPhaseEulerFoam, который использовался для моделирования динамики кипящего гранулированного слоя [2–4]. В решателе twoPhaseEulerFoam реализована двухжидкостная модель кипящего (ожиженного) слоя на основе континуального подхода (подхода Эйлера), при котором движение слоя рассматривается как движение двух взаимодействующих континуумов, связанных с газом и частицами.

Для моделирования динамики вибрирующего слоя в решателе twoPhaseEulerFoam вместо абсолютной системы отсчета для пространственных координат вводилась относительная система отсчета, движущаяся вместе с контейнером (полкой, на которой располагается слой материала). Предполагалось, что стенки контейнера не деформируются и перемещаются как твердое тело. В этой движущейся системе отсчета вычислительная сетка является статической в неинерциальной системе отсчета, что значительно упрощает процедуру численного решения уравнений. Получаемые результаты должны быть эквивалентны полученным из решения основных уравнений в инерциальной системе координат с использованием сетки, которая движется со стенками [5]. Поскольку рассматриваются вертикальные вибрации, считается, что будет меняться только вертикальная координата контейнера y . В связи с этим уравнения количества движения для обеих фаз примут вид [6, 7]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_\phi \mathbf{U}_\phi) + \nabla \cdot (\rho_\phi \mathbf{U}_\phi \mathbf{U}_\phi) + \nabla \cdot (\rho_\phi \mathbf{R}_{\phi, eff}) = -\frac{\alpha_\phi}{\rho_\phi} \nabla P + \alpha_\phi (\mathbf{g} - \mathbf{a}) - \mathbf{M}_\phi, \quad (1)$$

где $\mathbf{a}$ – ускорение полки (стенки), на которой располагается слой материала. Это ускорение имеет только вертикальную составляющую $\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)$, $a_y = -A \omega^2 \sin(\omega t)$, $\omega = 2\pi f$ (A – амплитуда колебаний; f – частота колебаний).

Кроме того, решалось уравнение неразрывности (2) для обеих фаз.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_\phi) + \nabla \cdot (\alpha_\phi \mathbf{U}_\phi) = 0. \quad (2)$$

Индекс ϕ означает принадлежность к фазе (твердой a или газовой b); α_ϕ – объемная доля соответ-

ствующей фазы; ρ_ϕ – плотность фазы; $\mathbf{U}_\phi$ – вектор скорости фазы; $\mathbf{R}_{\phi, eff}$ – тензор эффективных напряжений; P – давление газовой фазы; $\mathbf{g}$ – ускорение свободного падения; $\mathbf{M}_\phi$ – член, моделирующий обмен импульсом между фазами. Выражения для коэффициентов и членов, входящих в уравнения (1), (2), подробно описаны в литературе [2–5].

В решателе twoPhaseEulerFoam предполагается, что одна фаза (a) является дисперсной (распределенной в виде частиц), а вторая (b) – сплошной (несущей). Обе фазы считаются несжимаемыми. Для несущей среды реализована полуэмпирическая двухпараметрическая модель турбулентности $k-\epsilon$, основанная на гипотезе Буссинеска. Для несущей среды составляются уравнения переноса кинетической энергии турбулентности k и диссипации турбулентной энергии ϵ . Подробное описание уравнений и замыкающих выражений представлено в литературе [2, 5].

Член, моделирующий обмен импульсом между фазами, определяется силами трения, возникающими между двумя фазами:

$$\mathbf{M}_\phi = \frac{1}{\rho_\phi} \mathbf{M}_{drag},$$

$$\mathbf{M}_{drag} = \alpha_a \alpha_b K \mathbf{U}_r,$$

где K – функция сопротивления, которая зависит от объемной доли газовой фазы. При $\alpha_b \leq 0,8$ функция сопротивления определяется по формуле (3), а при $\alpha_b > 0,8$ – (4) [2–5].

$$K = 150 \frac{\alpha_a \mu_b}{\alpha_b d_a^2} + 1,75 \frac{\rho_b |\mathbf{U}_r|}{\alpha_b d_a}, \quad (3)$$

$$K = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho_b |\mathbf{U}_r|}{d_a}, \quad (4)$$

где $\mathbf{U}_r = \mathbf{U}_a - \mathbf{U}_b$ – относительная скорость фаз.

Для учета эффектов, обусловленных взаимодействием частиц друг с другом, используется кинетическая теория (по аналогии с кинетической теорией газа), с помощью которой можно выразить эффективные напряжения, возникающие в дисперсной фазе за счет движения частиц и за счет столкновений частиц друг с другом. По аналогии с термодинамической температурой вводится гранулярная температура θ как средняя энергия флуктуаций скорости частиц. В работах [3, 4, 8] приведено уравнение для расчета гранулярной температуры.

Задача решалась в трехмерном приближении. В связи с тем, что введена относительная система отсчета, используются следующие начальные условия:

$$|\mathbf{U}_a| = 0; |\mathbf{U}_b| = 0,25; P = 0; \alpha_a = 0,6; \theta = 0.$$

Далее представлены граничные условия на левой, правой, передней и задней стенках:

$$|\mathbf{U}_a| = 0; |\mathbf{U}_b| = 0; \nabla P = 0; \nabla \alpha_a = 0; \nabla \theta = 0,$$

а также на нижней границе:

$$|U_a| = 0; |U_b| = V_g; \nabla P = 0; \alpha_a = 0; \nabla \theta = 0.$$

Граничные условия на верхней свободной поверхности:

$$\nabla U_a = 0; \nabla U_b = 0; \nabla P = 0; \nabla \alpha_a = 0; \nabla \theta = 0.$$

Размеры вычислительной области: высота – 0,4 м, ширина – 0,4 м, толщина – 0,4 м. Процесс виброкипения рассчитывался за 2 с. Это позволило рассмотреть установившийся процесс виброкипения. При этом использовался шаг по времени, равный $1 \cdot 10^{-4}$ с. Шаг по координатам x равен 0,005 м, y – 0,005 м, z – 0,005 м.

В таблице представлены значения входных параметров задачи. В качестве твердой фазы были выбраны сферические частицы стекла диаметром 0,3 мм. Начальная высота слоя (толщина слоя засыпки) была равна 50 мм, скорость подачи газа V_g , пропускаемого через слой частиц в вертикальном направлении, 0,1 – 0,35 м/с. Использовались значения амплитуды колебаний 3 мм и 6 мм и значения частоты колебаний в диапазоне 15–45 Гц. Расчеты проводились с использованием ресурсов виртуальной вычислительной лаборатории UniHUB (www.unihub.ru) [9]. Проводилось распараллеливание расчетов на 12 ядрах.

Значения входных параметров задачи

	Описание	Значение
1	Плотность твердой фазы (частицы стекла) ρ_a , кг/м ³	2500
2	Плотность газовой фазы (воздуха) ρ_b , кг/м ³	1,2
3	Вязкость газовой фазы (воздуха) μ_b , Па·с	$1,5 \cdot 10^{-5}$
4	Коэффициент восстановления частица–частица e	0,9
5	Начальное значение объемной доли частиц в слое α_{a0}	0,6
6	Начальная высота слоя H_0 , м	0,05
7	Ширина слоя L , м	0,4
8	Толщина слоя W , м	0,4
9	Диаметр частиц d_a , м	0,0003

На рис. 1 представлены результаты моделирования распределения объемной доли частиц в виброкипящем слое в момент времени $t = 2$ с. На рис. 1а соответствует структуре кипящего гранулированного слоя без воздействия вибрации на слой; б – структуре кипящего слоя под воздействием вибрации (виброкипящего слоя) с частотой 15 Гц; в – структуре виброкипящего слоя при частоте 25 Гц; г – при частоте 35 Гц и д – при частоте 45 Гц.

Из рис. 1 видно, что при воздействии вибраций на слой частиц (случаи г – д) появляются волны на поверхности слоя; за счет этого увеличивается его высота. С увеличением частоты вибраций волны более отчетливо визуализируются, особенно при частоте 35–45 Гц. Кроме того, уменьшаются размеры областей, в которых концентрация частиц максимальна, и немного уменьшается максимальное значение объемной доли частиц в слое (при частоте 45 Гц максимальное значение α равно 0,663). Это означает, что площадь поверхности контакта фаз (твердых частиц и газа) увеличивается.

На рис. 2 представлены результаты моделирования распределения объемной доли частиц в виброкипящем слое в момент времени $t = 2$ с при амплитуде вибрации $A = 6$ мм и скорости подачи газового потока 0,1 м/с.

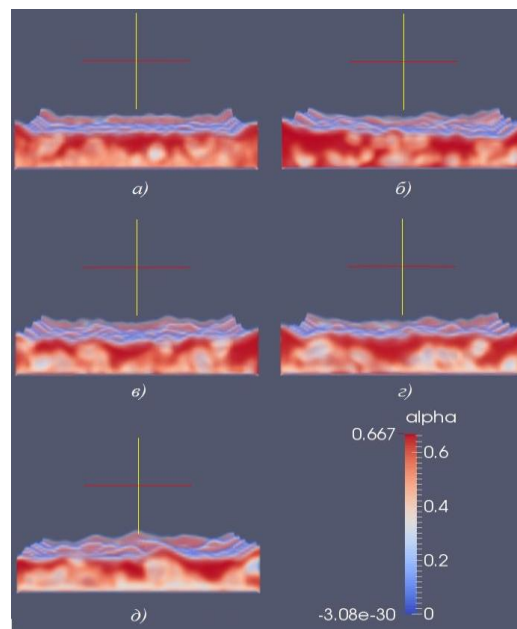


Рис. 1. Распределение объемной доли частиц в кипящем гранулированном слое под воздействием вибрации с различной частотой при амплитуде 3 мм. Скорость подачи газа – 0,25 м/с

На рис. 2а соответствует состоянию в начальный момент времени без воздействия вибрации и газового потока на слой; б – структуре кипящего слоя под воздействием вибрации (виброкипящего слоя) с частотой 15 Гц; в – структуре виброкипящего слоя при частоте 25 Гц, г – при частоте 35 Гц; д – при частоте 45 Гц.

На рис. 3 представлены результаты моделирования виброкипящего слоя при скорости подачи газа 0,25 м/с (а–г) и 0,35 м/с (д–з). Случаи а и д соответствуют структуре виброкипящего слоя при частоте вибрации 15 Гц; б и е – 25 Гц; в и ж – 35 Гц; г и з – 45 Гц.

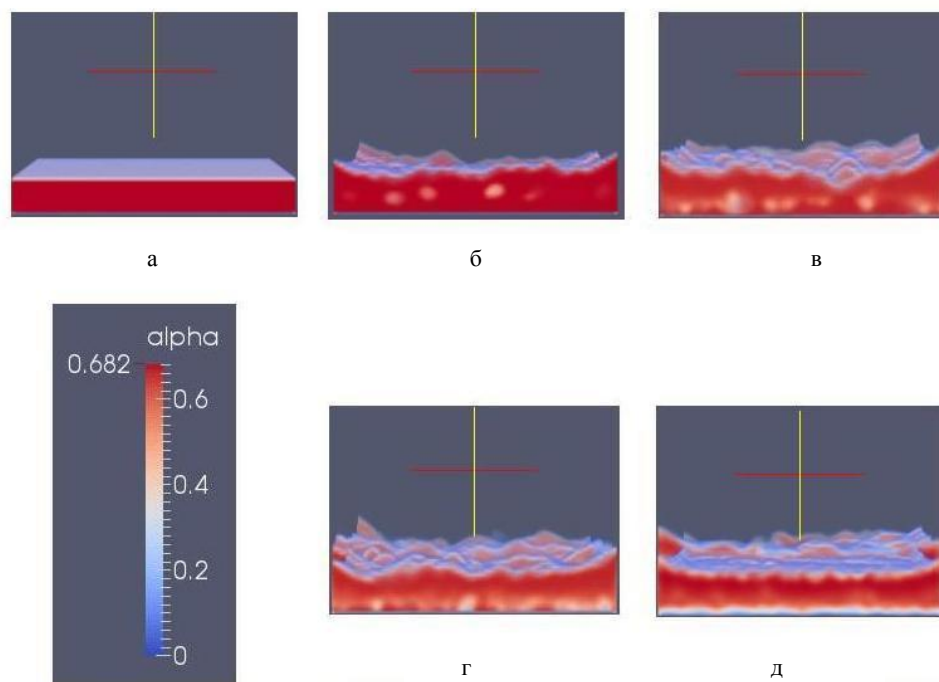


Рис. 2. Распределение объемной доли частиц в кипящем гранулированном слое под воздействием вибрации с различной частотой при амплитуде 6 мм. Скорость подачи газа – 0,1 м/с

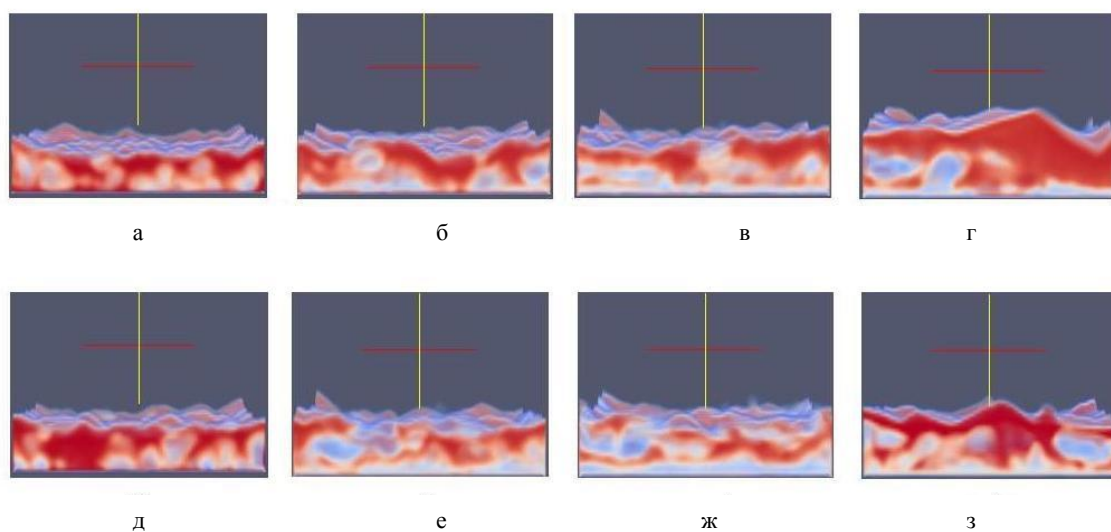


Рис. 3. Распределение объемной доли частиц в кипящем гранулированном слое под воздействием вибрации с различной частотой при амплитуде 6 мм. Скорость подачи газа – 0,25 м/с (а–г) и 0,35 м/с (д–з)

Из рис. 2, 3 видно, что с увеличением частоты вибрации увеличивается высота виброкипящего слоя. Кроме того, расширению слоя способствует увеличение скорости газового потока. С увеличением скорости подачи газа в виброкипящем слое увеличиваются размеры газовых пузырей внутри слоя, а также растет их количество. Если сравнивать результаты расчетов, полученных при различных амплитудах вибраций (3 и 6 мм) и при скорости подачи газа 0,25 м/с (рис. 1, 3а–г), то видно, что при амплитуде 6 мм высота виброкипящего слоя больше.

На рис. 4 представлены графики зависимости степени расширения слоя (отношения максимальной высоты виброкипящего слоя к его начальной высоте) от частоты вибрации при различных скоростях подачи газового потока. Кривая 1 на рис. 4 соответствует случаю, когда скорость подачи газового потока $V_g = 0,1$ м/с; 2 – $V_g = 0,25$ м/с; 3 – $V_g = 0,35$ м/с. Результаты расчетов получены при амплитуде вибрации $A = 6$ мм.

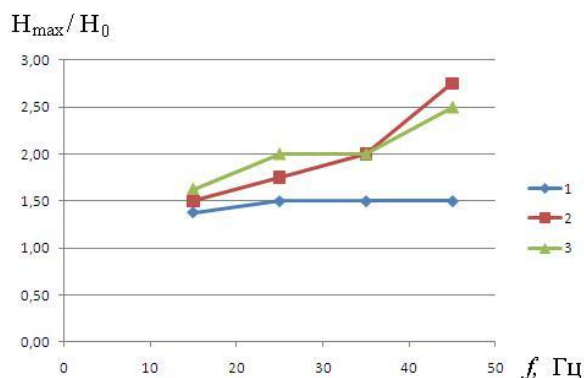


Рис. 4. Зависимость H_{max}/H_0 от частоты вибрации и скорости подачи газа при амплитуде 6 мм

Из рис. 4 видно, что степень расширения виброкипящего слоя увеличивается с ростом частоты вибраций, особенно при скорости подачи газа 0,25 и 0,35 м/с. При небольших скоростях подачи газа (0,1 м/с) влияние частоты вибраций на степень расширения слоя незначительное, т.е. с увеличением частоты вибраций максимальная высота слоя практически не меняется. Следует отметить, что если увеличить скорость подачи газа (при $V_g > 0,4$ м/с), поверхность виброкипящего слоя теряет устойчивость и внутри слоя могут образовываться газовые каналы.

Если сравнивать структуру кипящего гранулированного слоя без воздействия вибраций (рис. 1а) со структурой виброкипящего слоя при относительно больших значениях амплитуды вибраций (6 мм), очевидно, что одновременное воздействие газового потока и вибраций на слой частиц приводит к увеличению степени расширения виброкипящего слоя, что способствует увеличению площади поверхности контакта фаз.

Следует отметить, что данные расчеты были получены для слоя с толщиной засыпки 50 мм. Для раз-

личных случаев (когда толщина слоя засыпки имеет различные значения) скорость подачи газа, амплитуда и частота вибраций, обеспечивающие наибольшую площадь поверхности контакта фаз, могут иметь разные значения. Поэтому в дальнейшем планируется исследовать влияние амплитуды и частоты вибраций на структуру кипящего гранулированного слоя для случаев с различной толщиной слоя засыпки.

Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам Института системного программирования РАН, предоставившим вычислительные ресурсы веб-лаборатории UniHUB.

Литература

1. Консоль на управляющий узел кластера JSCC RAS Cluster Console. URL: <https://unihub.ru/tools/js3console> (дата обращения: 29.04.2015).
2. Rusche H. Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions: Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy of the University of London and Diploma of Imperial College. London, 2002. 343 p.
3. Wachem van B. Derivation, Implementation, and Validation of Computer Simulation Models for Gas-Solid Fluidized Beds: Dissertation at Delft University of Technology. Delft, 2000. 222 p.
4. Johnson P.C., Jackson R. Frictional – Collisional Constitutive Relations for Granular Materials with Application to Plane Shearing // J. of Fluid Mechanics. 1987. № 176. P. 67–93.
5. Каменецкий Е.С., Орлова Н.С., Волик М.В., Минасян Д.Г. Исследование динамики кипящего гранулированного слоя с использованием пакета OpenFoam // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2014. № 5. С. 37–42.
6. Acosta-Iborra A., Hernandez-Jimenez F., de Vega M., Briongos J.V. A novel methodology for simulating vibrated fluidized bed using two-fluid models // Chem. Eng. Science. 2012. Vol. 198–199. P. 261–274.
7. Orlova N.S., Volik M.V. Modelling of vibrofluidized bed dynamics using OpenFoam // Waves and vortices in complex media: 5-th International Scientific School of Young Scientists, Moscow, November 25–28, 2014. М., 2014. P. 72–74.
8. Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization: Continuum and kinetic theory descriptions. Boston, 1994. 211 p.
9. Самоваров О., Гайсарян С. Архитектура и особенности реализации платформы UniHUB в модели облачных вычислений на базе открытого пакета OpenStack // Тр. Ин-та системного программирования РАН. 2014. Т. 26, вып. 1. С. 403–420.

References

1. Konsol na upravlyayushchii uzel klastera JSCC RAS Cluster Console [Console to the control node of the cluster SCC RAS Cluster Console]. Available at: <https://unihub.ru/tools/js3console> (accessed 29.04.2015).
2. Rusche H. Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions. Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy of the University

- of London and Diploma of Imperial College. London, 2002, 343 p.
3. Wachem van B. *Derivation, Implementation, and Validation of Computer Simulation Models for Gas-Solid Fluidized Beds*. Dissertation at Delft University of Technology. Delft, 2000, 222 p.
 4. Johnson P.C., Jackson R. Frictional – Collisional Constitutive Relations for Granular Materials with Application to Plane Shearing. *Journal of Fluid Mechanics*, 1987, no 176, pp. 67-93.
 5. Kamenetskii E.S., Orlova N.S., Volik M.V., Minasyan D.G. Issledovanie dinamiki kipyashchego granulirovannogo sloya s ispolzovaniem paketa OpenFoam [The study of the dynamics of fluidized granular layer using the package OpenFoam.] *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*, 2014, no 5, pp. 37-42.
 6. Acosta-Iborra A., Hernandez-Jimenez F., de Vega M., Briongos J.V. A novel methodology for simulating vibrated fluidized bed using two-fluid models. *Chem. Eng. Science*, 2012, vol. 198-199, pp. 261-274.
 7. Orlova N.S., Volik M.V. Modelling of vibrofluidized bed dynamics using OpenFoam. *Waves and vortices in complex media: 5-th International Scientific School of Young Scientists*, Moscow, November 25–28, 2014. Moscow, 2014, pp. 72-74.
 8. Gidaspow D. *Multiphase flow and fluidization: Continuum and kinetic theory descriptions*. Boston, 1994, 211 p.
 9. Samovarov O., Gaisaryan S. [The architecture and implementation of platform features UniHUB in the cloud computing model based on an open package OpenStack]. *Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute for System Programming of Russian Academy of Sciences], 2014, vol. 26, no 1, pp. 403-420.

Поступила в редакцию

7 июля 2015 г.

УДК 519.865

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-37-40

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОДНОСЕКТОРНОЙ МОДЕЛИ ЭКОНОМИКИ, ОБЛАДАЮЩЕЙ МАГИСТРАЛЬНЫМ СВОЙСТВОМ

© 2015 г. Б.Р. Клепфиш

Клепфиш Борис Рахмилевич – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра фундаментальной и прикладной математики, Ростовский государственный экономический университет, ул. Большая Садовая, 69, г. Ростов-на-Дону, 344002, e-mail: kelpfish@bk.ru

Klepfish Boris Rakhmil'evich – Candidate of Physical and Mathematical Science, Associate Professor, Department of Fundamental and Applied Mathematics, Rostov State University of Economics, Bolshaya Sadovaya St., 69, Rostov-on-Don, 344002, Russia, e-mail: kelpfish@bk.ru

Для экономической модели, обладающей магистральным свойством, рассматривается задача анализа чувствительности, которая формулируется как задача вычисления производной функционала, характеризующего оптимальную траекторию, по параметру. Для этого подход с использованием сопряженных переменных распространен на уравнения динамики с кусочно-непрерывными правыми частями. Для моментов времени, в которых вид уравнения динамики меняется, указаны условия скачка для сопряженных переменных. В качестве примера рассмотрена модель экономического роста на основе модели Солоу. Данный подход позволяет использовать резервы экономических моделей по выбранным критериям качества.

Ключевые слова: чувствительность, магистраль, оптимальное управление, односекторная модель, экономический рост, производственная функция.

The problem of sensitivity analyses for economic model that the optimal growth path satisfies the turnpike property is considered. The problem is formulated as one of computing the derivative, with respect to a parameter, of a functional characterizing the quality of optimal growth path. To compute the derivative, the adjoint variable approach is extended to systems with piecewise continuous of right-hand sides. Jump conditions for the adjoint variables are indicated for the times at which the mentioned changes occur. As an example, model of optimal economic growth of closed economy, with a unique final good on the basis of Solow-Swan model is considered. The approach enables us to fully exploit the reserves of economic models on selected quality criteria.

Keywords: sensitivity, turnpike, optimal control, one-sector model, economic growth, production function.

При построении агрегированных моделей всегда существует неопределенность в отношении предположений о составе и значениях их параметров. Для оценки поведения моделей в предположении о неточности значений параметров часто используется анализ чувствительности. Поскольку конечной целью моделирования являются, как правило, рекомендации по вопросам принятия решений, можно считать, что такой анализ применяют для проверки чувствительности предлагаемых рекомендаций. Известны приложения анализа чувствительности к задачам экономической динамики и оптимального управления экономическими объектами. В качестве меры чувствительности обычно выбирают производную некоторого функционала, который вычисляется на траекториях движения системы по параметру. Общие подходы к вычислению таких производных на траекториях динамических систем с непрерывными правыми частями известны [1, 2]. В предлагаемой работе представлены формулы производной интегрального функционала, характеризующего чувствительность динамиче-

ской системы, вектор скорости которой во время движения терпит разрыв. Эта ситуация характерна для экономических систем, обладающих магистральным свойством [3, 4].

Оно [3, 4] состоит в том, что при достаточно большом (конечном) промежутке времени, на котором рассматривается модель, траектория движения модели состоит из трех участков: сначала движение происходит от начальных значений в направлении точки равновесия, соответствующей сбалансированному росту, некоторое время остается вблизи нее и уходит от нее со временем, чтобы выполнялись условия экономического горизонта.

В настоящей статье развивается подход к анализу чувствительности для динамических систем с разрывными правыми частями, предложенный ранее в [5].

Базовая модель

Рассмотрим модель экономического роста в агрегированной односекторной замкнутой экономи-

ке [6]. Время изменяется непрерывно от начального момента t_0 до момента T , и единицей измерения считается один год. В модели используются экзогенные показатели, считающиеся постоянными: $-1 < v < 1$ – годовой темп прироста числа работников; $0 < \mu < 1$ – норма амортизации капитала. Основное дифференциальное уравнение для рассматриваемой модели, связывающее фондовооруженность на одного работника $k(t)$ и среднедушевое потребление $c(t)$, имеет вид [6, 7]

$$\dot{k} = f(k(t)) - \lambda k(t) - c(t), \quad (1)$$

где $\lambda = \mu + v$.

Начальное и граничное состояния задаются значениями фондовооруженности на одного работника при $t = t_1$ и $t = T$

$$k(t_1) = k_0, k(T) \geq k_1. \quad (2)$$

Имеют место предположения [7]

$$f' = \frac{df}{dk} > 0, \quad f'' = \frac{d^2f}{dk^2} < 0, \quad \forall k > 0,$$

$$\lim_{k \rightarrow 0} f'(k) = \infty, \quad \lim_{k \rightarrow \infty} f'(k) = 0.$$

Задачу об оптимальном экономическом росте можно рассматривать как задачу управления [6, 7], в которой в качестве управляющего параметра рассматривается удельное потребление, т.е. считаем, что управление – это кусочно-непрерывная функция времени $c(t)$, удовлетворяющая уравнению (1) и ограничению

$$0 \leq c(t) \leq f(k(t)). \quad (3)$$

Задача состоит в оптимальном выборе $c(t)$ для достижения некоторой экономической цели [6]. Предполагается, что целевой функционал рассматриваемой задачи зависит от дисконтированной функции полезности, при этом дисконтирующий множитель имеет вид экспоненты, т.е. полезность в момент времени t , приведенная к моменту t_1 , равна $e^{-\delta(t-t_1)}U(c(t))$. Тогда благосостояние, соответствующее интервалу, примет вид

$$\max W = \max_{t_1} \int_{t_1}^T e^{-\delta(t-t_1)} U(c(t)) dt. \quad (4)$$

Постановка задачи содержит уравнение движения (1), граничные и начальные условия для фазовых переменных (2), ограничения на управляющие функции (3) и целевой функционал (4). В [6] показано, что оптимальная траектория рассматриваемой задачи обладает магистральным свойством по отношению к состоянию сбалансированного роста.

Анализ чувствительности

Динамическая система (1) характеризуется как фазовой переменной $k(t)$, так и параметром $\lambda = \mu + v$. Для моделей, обладающих магистральным свойством, на интервале времени движения имеются два момента изменения характера движения: выход на магистраль и сход с магистрали. Оптимальное решение этой задачи в случае прохождения магистрали выше начального уровня k_0 и ниже конечного уровня k_1 таково, что на подынтервале $[t_1, t_2]$ потребление равно нулю и производственные фонды имеют максимальное развитие. После этого до момента t_3 развитие идет по магистрали, потребление и фондовооруженность растут с тем же темпом, что и трудовые ресурсы. При $t_3 \leq t \leq T$ весь производимый продукт тратится на потребление [6, 7].

Магистрали (траектории сбалансированного роста) соответствуют значения c^* , k^* , которые являются решениями уравнений [6, 7]

$$f'(k^*) = \lambda + \delta, \quad c^* = f(k^*) - \lambda k^*. \quad (5)$$

Соответственно, моменты времени t_2 , t_3 можно определить по формулам

$$t_2 = t_1 + \int_{k_1}^{k^*} \frac{d\xi}{f(\xi) - \lambda \xi}, \quad t_3 = T - \frac{1}{\lambda} \ln \frac{k^*}{k_2}. \quad (6)$$

Будем анализировать чувствительность (4) к изменению коэффициента λ .

Запишем уравнения движения в виде

$$\frac{dk}{dt} = f_i(k, \lambda), \quad t_i \leq t \leq t_{i+1}, \quad i = 1, 2, 3, \quad k(t_1) = k_0, t_4 = T.$$

Здесь $f_i(k, \lambda)$ – вид правой части уравнения (1), обеспечивающий движение к магистрали при $i = 1$; вдоль магистрали – при $i = 2$; на завершающем этапе – при $i = 3$; t_2 и t_3 – моменты выхода на магистраль и схода с неё. В качестве меры чувствительности примем величину производной интегрального функционала (4) [1, 2] по параметру λ , которую вычислим, используя подход, разработанный в теории оптимального управления [8]. Зависимость W от параметра возникает в связи с зависимостью фазовой переменной от параметра. Исследование некоторого значения λ^0 состоит в анализе последствий малого возмущения $\delta\lambda$.

Пусть значение параметра λ^0 возмущено величиной $\delta\lambda$, $\|\delta\lambda\|$ – малая величина, а траектория $k(t)$ такова, что в нефиксированные моменты t_2, t_3 происходит изменение характера движения; t_2, t_3

определяются условиями выхода на магистраль (t_2) и схода с неё (t_3).

Это добавляет к условиям задачи соотношения (6), которые запишем в виде

$$N_1(k(t_2), t_2) = t_2 - t_1 - \int_{k_1}^{k(t_2)} \frac{d\xi}{f(\xi) - \lambda\xi} = 0, \quad (7)$$

$$N_2(k(t_3), t_3) = t_3 - T + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{k(t_3)}{k_2} = 0.$$

Следуя [8], определим формально расширенный функционал задачи, учитывая соотношения (7).

$$F(\lambda) = \int_{t_1}^T e^{-\delta(t-t_1)} U(c(t)) dt + \pi_1 N_1(k(t_2), t_2) + \pi_2 N_2(k(t_3), t_3). \quad (8)$$

Здесь π_1, π_2 – скалярные множители, значения которых будут указаны ниже. Первая вариация расширенного функционала (8) имеет вид

$$\delta F = \delta(\pi_1 N_1 + \pi_2 N_2) + \delta \int_{t_1}^T (H - \psi \dot{k}) dt. \quad (9)$$

Подынтегральное выражение в (9) определено в (4), (5):

$$H = e^{-\delta(t-t_1)} U(c(t)) + \psi f(k, \lambda).$$

Заменим интеграл в (9) суммой интегралов на подынтервалах $[t_1, t_2]$, $[t_2, t_3]$, $[t_3, T]$ и проинтегрируем $(H - \psi \dot{k})$ по частям, принимая во внимание возможную разрывность функции ψ в точках t_2, t_3 [8].

$$\delta F = \sum_{i=1}^2 \left(\pi_i \frac{\partial N_i}{\partial t_{i+1}} dt_{i+1} + \frac{\partial N_i}{\partial k(t_{i+1})} dk(t_{i+1}) \right) + \sum_{i=1}^2 (H - \psi \dot{k}) \Big|_{t=t_i^-} - \sum_{i=1}^2 (H - \psi \dot{k}) \Big|_{t=t_{i+1}^+} -$$

$$-\psi \delta k \Big|_{t_2^-}^{t_3^+} - \psi \delta k \Big|_{t_1^-}^{t_2^-} - \psi \delta k \Big|_{t_3^+}^T +$$

$$+ \int_{t_1}^T \left(\dot{\psi} + \frac{\partial H}{\partial k} \right) \delta k dt + \int_{t_1}^T \frac{\partial H}{\partial \lambda} dt \delta \lambda.$$

Теперь можно использовать соотношения [8]

$$dk(t_i) = \begin{cases} \delta k(t_i^-) + \dot{k}(t_i^-) dt_i \\ \delta k(t_i^+) + \dot{k}(t_i^+) dt_i \end{cases} \quad i = 2, 3. \quad (11)$$

Исключим с помощью (10), (11) $\delta k(t_i^-)$ и $\delta k(t_i^+)$. После группировки членов получим

$$\delta F = \sum_{i=1}^2 \left[\psi(t_{i+1}^+) - \psi(t_{i+1}^-) + \pi_i \frac{\partial N_i}{\partial k(t_{i+1})} \right] dk(t_{i+1}) + \left[H(t_{i+1}^-) - H(t_{i+1}^+) + \pi_i \frac{\partial N_i}{\partial t_{i+1}} \right] dt_{i+1} + \int_{t_0}^T \left[\left(\dot{\psi} + \frac{\partial H}{\partial k} \right) \delta k + \frac{\partial H}{\partial \lambda} \delta \lambda \right] dt. \quad (12)$$

Выберем значения $\psi(t_i^-)$ и $\psi(t_i^+)$, $i = 2, 3$, так, чтобы коэффициенты при $dk(t_i)$ и dt_i обратились в нуль. Это приводит к соотношениям

$$\begin{aligned} \psi(t_{i+1}^-) &= \psi(t_{i+1}^+) + \pi_i \frac{\partial N_i}{\partial k(t_{i+1})}, \\ H(t_{i+1}^-) &= H(t_{i+1}^+) - \pi_i \frac{\partial N_i}{\partial t_{i+1}}, \\ i &= 1, 2. \end{aligned} \quad (13)$$

Коэффициенты π_i выбираются так, чтобы обеспечить требуемое равенство. Чтобы исключить в (12) слагаемое, содержащее $\delta k(t)$, нужно использовать уравнение в вариациях [8], определив $\psi(t)$ решением граничной задачи

$$\frac{d\psi}{dt} - \frac{\partial f_i}{\partial k} \psi = 0, \quad \Gamma_k^* \psi = 0. \quad (14)$$

Здесь $\Gamma_k^* \psi = 0$ – граничные условия, сопряженные к условиям в исходной задаче оптимального управления и дополненные условиями скачка из (13). Окончательно получим, используя (14),

$$\frac{dW}{d\lambda} = \int_{t_1}^{t_2} \psi(t) \frac{\partial f_1(k, \lambda)}{\partial \lambda} dt + \int_{t_2}^{t_3} \psi(t) \frac{\partial f_2(k, \lambda)}{\partial \lambda} dt + \int_{t_3}^T \psi(t) \frac{\partial f_3(k, \lambda)}{\partial \lambda} dt.$$

Таким образом, предлагаемый подход позволяет оценить чувствительность оптимального значения целевого функционала при изменении значений параметров. Это дает возможность полнее использовать резервы моделей экономики по выбранным критериям качества.

Литература

1. Хог Э., Чой К., Комков В. Анализ чувствительности при проектировании конструкций. М., 1988. 428 с.
2. Дончев А. Системы оптимального управления. Возмущения, приближения и анализ чувствительности. М., 1987. 156 с.
3. Зеликин М.И., Борисов В.Ф. Особые оптимальные режимы в задачах математической экономики // Оптимальное управление. Современная математика и ее приложения. Тбилиси, 2003. Вып. 11. С. 3–161.
4. Sethi S.P., Thompson G.L. Optimal control theory: applications to management science and economics. N.Y., 2005. 511 p.
5. Клепфиш Б.Р. Анализ чувствительности механических систем с неустойчивыми связями // Прикладная математика и механика. 2003. Т. 67, № 5. С. 713.

6. Минюк С.А., Ровба Е.А., Кузьмич К.К. Математические методы и модели в экономике. Мн., 2002. 432 с.
7. Лагоша Б.А., Апалькова Т.Г. Оптимальное управление в экономике: теория и приложения. М., 2008. 224 с.
8. Брайсон А., Ю-ши Х. Прикладная теория оптимального управления. М., 1972. 544 с.

References

1. Khog E., Choi K., Komkov V. *Analiz chuvstvitel'nosti pri proektirovanii konstruktssii* [Sensitivity analysis in the design of structures]. Moscow, 1988, 428 p.
2. Donchev A. *Sistemy optimal'nogo upravleniya. Vozmushcheniya, priblizheniya i analiz chuvstvitel'nosti* [Optimal control system. Disturbances, approach and sensitivity analysis]. Moscow, 1987, 156 p.
3. Zelikin M.I., Borisov V.F. *Osobyie optimal'nye rezhimy v zadachakh matematicheskoi ekonomiki* [Singular optimal regimes in problems of mathematical economics]. *Optim-*

- al'noe upravlenie, Sovremennaya matematika i ee prilozheniya*. Tbilisi, 2003, vol. 11, pp. 3-161.
4. Sethi S.P., Thompson G.L. *Optimal control theory: applications to management science and economics*. N.Y., 2005, 511 p.
5. Klepfish B.R. *Analiz chuvstvitel'nosti mekhanicheskikh sistem s neuderzhivayushchimi svyazyami* [Sensitivity analysis of mechanical systems with unilateral constraints]. *Prikladnaya matematika i mekhanika*, 2003, vol. 67, no 5, p. 713.
6. Minyuk S.A., Rovba E.A., Kuz'mich K.K. *Matematicheskie metody i modeli v ekonomike* [Mathematical methods and models in economics]. Minsk, 2002, 432 p.
7. Lagosha B.A., Apal'kova T.G. *Optimal'noe upravlenie v ekonomike: teoriya i prilozheniya* [Optimal control of the economy: theory and applications]. Moscow, 2008, 224 p.
8. Braison A., Yu-shi Kh. *Prikladnaya teoriya optimal'nogo upravleniya* [Applied theory of optimal control]. Moscow, 1972, 544 p.

Поступила в редакцию

5 мая 2015 г.

УДК 517.982.274

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-41-46

ВЕСОВЫЕ ПРОСТРАНСТВА ВЕКТОРНОЗНАЧНЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ*

© 2015 г. Н.Ю. Нестеров

Нестеров Никита Юрьевич – магистрант, Южный федеральный университет, ул. Мильчакова, 8а, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: samson47@bk.ru

Nesterov Nikita Yur'evich – Master Student, Southern Federal University, Milchakov St., 8a, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: samson47@bk.ru

Исследуются весовые пространства векторнозначных аналитических функций, определённых на области в комплексной плоскости. Для данных пространств рассмотрены задачи о нетривиальности, размерности и о вложениях одного пространства в другое.

Ключевые слова: весовые пространства, векторнозначные аналитические функции, непрерывное и компактное вложение.

We research weighted spaces of the vector-valued analytic functions defined on a domain in the complex plane. For these spaces we consider problems about nontriviality, dimension and inclusion of one space to another.

Keywords: weighted spaces, vector-valued analytic functions, continuous and compact inclusion.

Различные весовые пространства непрерывных, гладких и аналитических функций изучаются достаточно давно. Наиболее близко относящимися к настоящему исследованию являются работы [1–3], в которых рассматривались некоторые общие вопросы для подобных пространств (нетривиальность, полнота, непрерывность и компактность вложений). Именно в [1] и [3] изучались весовые пространства $\tilde{N}_V(\mathbb{G})$ комплекснозначных функций, непрерывных на локально-компактном (хаусдорфовом) или произвольном метрическом пространстве X . Работа [2] посвящена пространствам $A_V(\mathbb{G})$ комплекснозначных функций, аналитических в области $G \subset \mathbb{C}$ со значениями в $\mathbb{C}$.

Не менее актуально изучение векторнозначных функций [4–9]. В связи с этим в настоящей работе рассматриваются весовые пространства $A_V(\mathbb{G})$ функций, голоморфных в области $G \subset \mathbb{C}$ со значениями в произвольном банаховом пространстве B (в качестве B может выступать произвольная банахова алгебра с единицей или банахова алгебра ограниченных линейных операторов). Основной целью является перенос результатов из [2] на данные пространства.

Классы $A_V(\mathbb{G})$ и их основные свойства

Пусть G – область в $\mathbb{C}$; B – некоторое банахово пространство. Напомним, что функция $f: G \rightarrow B$ называется голоморфной в G , если для каждого $z_0 \in G$ существует конечный предел

$$\lim_{z \rightarrow z_0} \frac{f(z) - f(z_0)}{z - z_0};$$

слабоголоморфной, если для всех $z_0 \in G$ и $l \in B'$ существует конечный предел

$$\lim_{z \rightarrow z_0} \frac{l \circ f(z) - l \circ f(z_0)}{z - z_0}, \quad \text{т.е. если функция}$$

$l \circ f: G \rightarrow \mathbb{C}$ голоморфна в G . Согласно [4, с. 144], сильная и слабая голоморфность эквивалентны. Поэтому в дальнейшем мы будем использовать для функции $f: G \rightarrow B$ термин «голоморфная», или «аналитическая». Как известно, на векторнозначные аналитические функции переносятся все основные результаты теории функций комплексного переменного.

Через $A(G, B)$ будем обозначать пространство всех аналитических функций $f: G \rightarrow B$, наделённое топологией τ_{co} равномерной сходимости на компактах. Отметим, что если $f \in A(G, B)$, то $\|f(z)\|_B$ является непрерывной субгармонической в G функцией.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 14-01-31083.

Перейдём к определению весового пространства $A_v(G)$. Под весом, как в [2], будем понимать непрерывную функцию $v: G \rightarrow \mathbb{R}_{+}^{\infty}$.

Положим

$$A_v(G) = \left\{ f \in A(G, B) : \|f\|_v = \sup_{z \in G} \frac{\|f(z)\|_B}{v(z)} < \infty \right\}.$$

Из локальной ограниченности веса v на G , вытекающей из непрерывности v , как и в случае пространств непрерывных функций [3], следует полнота пространства $A_v(G)$ относительно нормы $\|\cdot\|_v$. Таким образом, $A_v(G)$ – банахово пространство. Очевидно, что нормированная топология в $A_v(G)$ мажорирует топологию τ_{co} .

Первые возникающие вопросы для пространств $A_v(G)$ – это, как обычно, вопросы нетривиальности и неискоезаемости в точках из G . Напомним, что пространство $A_v(G)$ нетривиально, если существует отличная от тождественного нуля функция $f \in A_v(G)$. Далее, говорят, что $A_v(G)$ не исчезает в точке $z_0 \in G$, если имеется $f \in A_v(G)$ такая, что $f(z_0) \neq 0$.

Как известно [3], в случае пространств непрерывных функций тот факт, что весовое пространство не исчезает в каждой точке (и, как следствие, его нетривиальность), легко вытекает из локальной ограниченности веса от нуля. Для пространств $A_v(G)$ голоморфных функций это уже не так. Действительно, пусть, например, $G = D := \{z \in \mathbb{C} : |z| < 1\}$. Вес $v(z) = 1 - |z|$ непрерывен на D . Для произвольной функции $f \in A_v(D)$ имеем, что $\|f(z)\|_B \leq \|f\|_v (1 - |z|)$. По принципу максимума субгармонических функций $\|f(z)\|_B \equiv 0$. Следовательно, пространство $A_v(D)$ тривиально. Заметим, что окончательный ответ на вопрос о нетривиальности пространств $A_v(G)$ даже в случае $B = \mathbb{C}$ до сих пор неизвестен.

Из локальной ограниченности от нуля веса v , обеспечиваемой непрерывностью веса v на G , вытекают свойства пространства $A_v(G)$.

Если функция $f \in A_v(G)$ имеет нуль кратности p в точке $\lambda \in G$, то f так же, как и для стандартных аналитических функций, представима в виде $f(z) = (z - \lambda)^p \xi(z)$, где $\xi \in A_v(G)$ и $\xi(z) \neq 0$. Как следствие, если пространство $A_v(G)$ нетривиаль-

но, то оно не исчезает ни в одной точке из G . Далее аналогично [2, лемма 2.3] проверяется, что функции из $A_v(G)$ можно умножать на рациональные функции $R(z) = \frac{P(z)}{Q(z)}$, $\deg P \leq \deg Q$, не выходя из пространства $A_v(G)$.

В дальнейшем будем рассматривать только нетривиальные пространства $A_v(G)$.

Перейдём к вопросу о размерности пространства $A_v(G)$. Вновь отметим [3], что если весовое пространство $A_v(G)$ непрерывных функций на любом бесконечном множестве X является бесконечномерным, то для пространств голоморфных функций это не так. Например, рассмотрим в области $G = \mathbb{C}$ вес $v(z) = (1 + |z|)^s$, $s \in \mathbb{N}_0$, по обобщённой теореме Лиувилля получим, что весовой класс $A_v(\mathbb{C})$ совпадает с пространством всех полиномов степени не выше s , а значит, имеет размерность $s + 1$.

В данном направлении установлены следующие результаты.

Предложение 1. Следующие утверждения эквивалентны:

- (i) $A_v(G)$ конечномерно;
- (ii) τ_{co} индуцирует на $A_v(G)$ нормированную топологию;
- (iii) $\exists K \subset \subset G \quad \exists C > 0: \quad \|f\|_v \leq C \cdot \|f\|_K$, $\forall f \in A_v(G)$ (здесь $\|f\|_K = \sup_{z \in K} \|f(z)\|_B$).

Справедливость импликации (i) $\Rightarrow$ (ii) очевидна, поскольку на конечномерном пространстве существует единственная отделимая локально-выпуклая топология. Условие (iii) означает, что нормированная топология мажорируется топологией τ_{co} . Поскольку обратное всегда выполнено, то получаем (ii) $\Leftrightarrow$ (iii).

Докажем (ii) $\Rightarrow$ (i). Единичный шар $S_v(G)$ банахова пространства $A_v(G)$ является равномерно ограниченным множеством на любом компакте в G . По теореме Монтеля тогда $S_v(G)$ – предкомпактное множество в $A(G, B)$, а значит, и в $A_v(G)$. Поэтому $A_v(G)$ конечномерно.

Следующий результат является аналогом теоремы из [2, теорема 2.2] и содержит полное описание конечномерных весовых пространств. Обозначим через $n(f)$ число нулей нетривиальной функции $f \in A(G, B)$ с учётом их кратностей.

Теорема 1. Следующие утверждения эквивалентны:

- (i) $A_v \mathbb{G}^-$ имеет размерность $p \in \mathbb{N}$;
 - (ii) $A_v \mathbb{G}^- = \text{span } z^k \cdot f_0(z) : k = 0, \dots, p-1$, где f_0 голоморфна в G и не имеет нулей в G ;
 - (iii) $n(g) \leq p-1$ для всех $g \in A_v \mathbb{G}^- \setminus \{0\}$ и существует $f \in A_v \mathbb{G}^-$ такая, что $n(f) = p-1$.
- (iii) $\Rightarrow$ (ii). Проверим, что если $q := \max \{n(g) : g \in A_v \mathbb{G}^-, g \neq 0\} < \infty$,

то $A_v \mathbb{G}^- = \text{span } z^k \cdot f_0(z) : k = 0, \dots, q$, где f_0 голоморфна в G и не имеет нулей в G . Так как $q < \infty$, то существует функция $f \in A_v \mathbb{G}^-$ с $n(f) = q$. Она имеет вид $f(z) = P_0(z) \cdot f_0(z)$, где P_0 – полином степени q , а f_0 голоморфна в G и не имеет нулей в G . Зафиксируем точку $a \in G$. Можем считать, что $f_0(a) = 1$.

Произвольная нетривиальная функция g из $A_v \mathbb{G}^-$ имеет вид $g(z) = Q(z) \cdot g_0(z)$, где Q – полином степени, не превосходящей q , а $g_0 \in A_v \mathbb{G}^-$ не обращается в нуль на G . Снова будем считать, что $g_0(a) = 1$. Рассмотрим функцию $h(z) = P(z) \cdot f_0(z) - g_0(z)$, где P – полином степени, не превосходящей q , определяемый равенствами $P \equiv 1, P \cdot f_0 \equiv g_0 \pmod{z^k}$, где $k = 1, \dots, q$. Тогда $h \equiv 0$, $1 \leq k \leq q$. Так как $P f_0 = \frac{P}{P_0} \cdot f \in A_v \mathbb{G}^-$, то $h \in A_v \mathbb{G}^-$. При этом $n(h) \geq q+1$. По определению q заключаем, что $h \equiv 0$. Поскольку g_0 не имеет нулей, то $P \equiv 1$ и $g_0 \equiv f_0$. Таким образом, $g \equiv Q \cdot f_0$. Так как это верно для произвольной функции $g \in A_v \mathbb{G}^-$, то получим (ii).

(i) $\Rightarrow$ (iii). Рассмотрим нетривиальную функцию $g \in A_v \mathbb{G}^-$ и предположим, что она имеет нули $z_1, \dots, z_n$ кратностей $s_1, \dots, s_n$, $n \in \mathbb{N}$ (возможно, у неё есть и другие нули). Тогда функции $g_{k,m} \equiv \frac{g}{(z - z_k)^{m+1}}, 1 \leq k \leq n, 0 \leq m \leq s_k - 1$, принадлежат $A_v \mathbb{G}^-$. Положим $g_{0,0} \equiv g$. Стандартно проверяется, что система $\{g_{k,m} : 0 \leq k \leq n, 0 \leq m \leq s_k - 1\}$ является линейно независимой. Так как $A_v \mathbb{G}^-$ имеет размерность

$p \in \mathbb{N}$, то $1 + \sum_{k=1}^n s_k \leq p$, так что $n(g) \leq p-1$. Предположим, что не существует функции $f \in A_v \mathbb{G}^-$ такой, что $n(f) = p-1$. Значит, $n(g) \leq p-2$ для любой $g \in A_v \mathbb{G}^-$ и, следовательно, $q := \max \{n(g) : g \in A_v \mathbb{G}^-, g \neq 0\} \leq p-2$.

Исходя из доказательства импликации (iii) $\Rightarrow$ (ii), получаем, что произвольная функция $g \in A_v \mathbb{G}^-$ представима в виде $g = Q \cdot f_0$, $\deg Q \leq p-2$, т.е.

$A_v \mathbb{G}^- = \text{span } z^k \cdot f_0(z) : k = 0, \dots, p-2$. Таким образом, $\dim A_v \mathbb{G}^- = p-1$, что неверно.

(ii) $\Rightarrow$ (i). Очевидно.

Следствие 1. Пространство $A_v \mathbb{G}^-$ является бесконечномерным тогда и только тогда, когда для любого $k \in \mathbb{N}$ существует нетривиальная функция $f \in A_v \mathbb{G}^-$ такая, что $n(f) \geq k$.

Следствие 2. Если существует нетривиальная функция $f \in A_v \mathbb{G}^-$, имеющая счётное число нулей, то $A_v \mathbb{G}^-$ бесконечномерно.

Ассоциированный вес. Теоремы вложения

Настоящий параграф посвящён вопросам непрерывности и компактности вложения пространства $A_v \mathbb{G}^-$ в пространство $A_w \mathbb{G}^-$. Как известно, эти вопросы не решаются в терминах самих весов, поэтому в [1–3] вводится понятие ассоциированного веса.

Определение 1. Пусть v – произвольный вес на G . Ассоциированным с v весом называется функция

$$\tilde{v}(z) := \sup \{ \|f(z)\|_B : f \in A_v(G), \|f\|_v \leq 1, z \in G \}.$$

Нетрудно видеть, что $0 < \tilde{v}(z) \leq v(z)$ для всех $z \in G$. Как и в [1], проверяется, что $\tilde{v}$ является субгармонической локально-липшицевой на G функцией. Таким образом, $\tilde{v}$ также является весом на G . При этом $\|f\|_{\tilde{v}} = \|f\|_v$ для всех $f \in A(G, B)$, так что пространства $A_{\tilde{v}} \mathbb{G}^-$ и $A_v \mathbb{G}^-$ совпадают и изометричны. Из этого вытекает, что при исследовании пространств $A_v \mathbb{G}^-$ можно, вообще говоря, ограничиться субгармоническими локально-липшицевыми весовыми функциями.

Отметим ещё, что супремум в определении $\tilde{v}$ достигается, т.е. для любого $z \in G$ существует такая функция $f \in A_v \mathbb{G}^-$ с $\|f\|_v \leq 1$, что $\|f(z)\|_B = \tilde{v}(z)$.

Рассмотрим вопрос о вложении $A_v \mathbf{G} \subset A_w \mathbf{G}$. Заметим сразу, что из теоремы Банаха о замкнутом графике вытекает, что если данное вложение имеет место, то оно обязательно является непрерывным.

Теорема 2. Пусть v, w – произвольные веса на G (задающие нетривиальные пространства $A_v \mathbf{G}$ и $A_w \mathbf{G}$). Следующие утверждения эквивалентны:

- (i) $A_v \mathbf{G}$ (непрерывно) вложено в $A_w \mathbf{G}$;
- (ii) $\sup_{z \in G} \frac{\tilde{v}(z)}{w(z)} < \infty$;
- (iii) $\sup_{z \in G} \frac{\tilde{v}(z)}{\tilde{w}(z)} < \infty$.

В случае если вложение $A_v \mathbf{G} \subset A_w \mathbf{G}$ имеет место, норма тождественного оператора $\text{id}: A_v \mathbf{G} \rightarrow A_w \mathbf{G}$ совпадает с $\sup_{z \in G} \frac{\tilde{v}(z)}{w(z)}$.

(i) $\Rightarrow$ (ii). Пусть тождественный оператор $\text{id}: A_v \mathbf{G} \rightarrow A_w \mathbf{G}$ непрерывен и $\tilde{N}$ – его норма. Тогда $\|f(z)\|_B \leq C \|f\|_v w(z)$ для любых $f \in A_v \mathbf{G}$ и $z \in G$. Следовательно, $\|f(z)\|_B \leq C w(z)$ при всех $f \in A_v \mathbf{G}$ с $\|f\|_v \leq 1$ и $z \in G$. Значит, $\tilde{v}(z) \leq C w(z)$, $z \in G$. При этом $\sup_{z \in G} \frac{\tilde{v}(z)}{w(z)} \leq \tilde{N} = \|\text{id}\|$.

(ii) $\Rightarrow$ (i). Пусть $M := \sup_{z \in G} \frac{\tilde{v}(z)}{w(z)} < \infty$ и $f \in A_v \mathbf{G}$.

Тогда имеем, что

$$\|f\|_w = \sup_{z \in G} \frac{\tilde{v}(z) \|f\|_B}{w(z) \tilde{v}(z)} \leq \sup_{z \in G} \frac{\tilde{v}(z)}{w(z)} \sup_{z \in G} \frac{\|f\|_B}{\tilde{v}(z)} \leq M \cdot \|f\|_v.$$

Таким образом, $A_v \mathbf{G}$ непрерывно вложено в $A_w \mathbf{G}$, причём $\|\text{id}\| \leq M = \sup_{z \in G} \frac{\tilde{v}(z)}{w(z)}$.

Из равносильности условий (i) и (ii) с учётом равенства $A_w \mathbf{G} = A_{\tilde{w}} \mathbf{G}$ вытекает, что (i) $\Leftrightarrow$ (iii).

В связи с доказанной теоремой 2, вслед за [2], введём понятие канонического веса. Вес v будем называть каноническим, если $\sup_{z \in G} \frac{v(z)}{\tilde{v}(z)} < \infty$. Соот-

ветственно, для канонических весов вопрос о вложении $A_v \mathbf{G} \subset A_w \mathbf{G}$ может быть решён в терминах самих весов. Именно справедливо

Следствие 3. Если v – канонический вес, то $A_v \mathbf{G}$ (непрерывно) вложено в $A_w \mathbf{G}$ тогда и

только тогда, когда $\sup_{z \in G} \frac{v(z)}{w(z)} < \infty$. Если вес w так-

же канонический, то пространства $A_v \mathbf{G}$ и $A_w \mathbf{G}$ совпадают в том и только в том случае,

если $\sup_{z \in G} \frac{v(z)}{w(z)} < \infty$ и $\sup_{z \in G} \frac{w(z)}{v(z)} < \infty$.

Оставшаяся часть параграфа посвящена вопросу о компактности вложения $A_v \mathbf{G} \subset A_w \mathbf{G}$.

Заметим, что если пространство $A_v \mathbf{G}$ конечномерно, то вложение $A_v \mathbf{G}$ в $A_w \mathbf{G}$ обязательно является компактным. Таким образом, имеет место

Предложение 2. Пусть $A_v \mathbf{G}$ – конечномерное пространство. Тогда для того чтобы $A_v \mathbf{G}$ было компактно вложено в $A_w \mathbf{G}$, необходимо и достаточно, чтобы $\sup_{z \in G} \frac{\tilde{v}(z)}{w(z)} < \infty$.

Необходимость вытекает из теоремы 2.

Достаточность. Пусть $\sup_{z \in G} \frac{\tilde{v}(z)}{w(z)} < \infty$, т.е.

$A_v \mathbf{G}$ непрерывно вложено в $A_w \mathbf{G}$. Рассмотрим произвольную ограниченную последовательность $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ в $A_v \mathbf{G}$. Пусть $\|f_n\|_v \leq M$, $n \in \mathbb{N}$. Так как вес v непрерывен на G , то последовательность $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ равномерно ограничена на любом компакте $K \subset G$: $\|f_n\|_B \leq M \cdot v(z) \leq M \cdot M_{v,K}$ для любого $z \in K$, где $M_{v,K} = \max_{z \in K} v(z)$. Следовательно,

по теореме Монтеля существует подпоследовательность $\{f_{n_p}\}_{p \in \mathbb{N}}$, которая по топологии τ_{co}

сходится к некоторой функции $\varphi \in A_v \mathbf{G}$. Учитывая предложение 1, получаем, что $\{f_{n_p}\}_{p \in \mathbb{N}}$ схо-

дится к φ в $A_v \mathbf{G}$. Но $A_v \mathbf{G}$ непрерывно вложено в $A_w \mathbf{G}$, значит, $f_{n_p} \rightarrow \varphi$ в $A_w \mathbf{G}$.

Таким образом, имеет смысл исследовать лишь случай бесконечномерного пространства $A_v \mathbf{G}$.

Общий функциональный критерий [10, лемма 2] компактности вложения содержится в следующей теореме.

Теорема 3. $A_v \mathbf{G}$ компактно вложено в $A_w \mathbf{G}$ тогда и только тогда, когда любая ограниченная последовательность $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subseteq A_v \mathbf{G}$ такая, что $f_n \rightarrow 0$ в топологии τ_{co} , сходится к нулю в $A_w \mathbf{G}$.

Необходимость. Пусть $A_v \mathbf{G}^-$ компактно вложено в $A_w \mathbf{G}^-$, а последовательность $f_n \mathbf{G}^-$ ограничена в $A_v \mathbf{G}^-$ и сходится к нулю по топологии τ_{co} . Предположим, что $\|id \mathbf{G}_n\|_w$ не стремится к нулю при $n \rightarrow \infty$. Тогда существует подпоследовательность $f_{n_p} \mathbf{G}^-$ и $C > 0$, такие что $\|id \mathbf{G}_{n_p}\|_w \geq C$ для любого $p \in \mathbf{N}$. Но $f_{n_p} \mathbf{G}^-$ ограничена в $A_v \mathbf{G}^-$ и id – компактный оператор, поэтому $id \mathbf{G}_{n_p} \mathbf{G}^-$ имеет сходящуюся подпоследовательность в $A_w \mathbf{G}^-$. Можно для удобства считать, что сама последовательность $id \mathbf{G}_{n_p} \mathbf{G}^-$ сходится в $A_w \mathbf{G}^-$. Так как топология в $A_w \mathbf{G}^-$ мажорирует топологию τ_{co} и в τ_{co} данная последовательность сходится к нулю, получаем, что $\lim_{n \rightarrow \infty} \|id \mathbf{G}_n\|_w = 0$, что невозможно.

Достаточность. Рассмотрим ограниченную последовательность $f_n \mathbf{G}^- \subseteq A_v \mathbf{G}^-$. Используя те же рассуждения и обозначения, что и в доказательстве достаточности предложения 2, заключаем, что существует подпоследовательность $f_{n_p} \mathbf{G}^-$, которая равномерно внутри G сходится к некоторой функции $\varphi \in A \mathbf{G}, B^-$. При этом

$$\frac{\|\varphi \mathbf{G}\|_B}{v \mathbf{G}} = \frac{\lim_{p \rightarrow \infty} \|f_{n_p} \mathbf{G}\|_B}{v \mathbf{G}} \leq M \text{ для всех } z \in G, \text{ так}$$

что $\varphi \in A_v \mathbf{G}^-$. Таким образом, $f_{n_p} - \varphi \mathbf{G}^-$ – ограниченная последовательность в $A_v \mathbf{G}^-$, которая сходится к нулю по топологии τ_{co} . Тогда по условию $f_{n_p} \rightarrow \varphi$ по топологии $A_w \mathbf{G}^-$. Поэтому $id : A_v \mathbf{G}^- \rightarrow A_w \mathbf{G}^-$ – компактный оператор.

На основании теоремы 3 устанавливается следующий результат, представляющий собой аналог теоремы из [2, теорема 3.13].

Теорема 4. Пусть G – область в $\tilde{\mathbf{N}}$. Для компактности вложения $A_v \mathbf{G}^-$ в $A_w \mathbf{G}^-$ достаточно, чтобы $\lim_{z \rightarrow \partial G} \frac{\tilde{v}(z)}{w(z)} = 0$, т.е. чтобы для любого $\varepsilon > 0$ существовал компакт K в G такой, что $\frac{\tilde{v}(z)}{w(z)} < \varepsilon$ для всех $z \in G \setminus K$. В случае когда $G \neq \tilde{\mathbf{N}}$ и допол-

нение G не имеет одноточечных компонент, данное условие является и необходимым.

Доказательство достаточности является стандартным, а необходимость доказывается на основании [11, теорема 2]. Приведём коротко схему доказательства. Предположим, что $A_v \mathbf{G}^-$ компактно вложено в $A_w \mathbf{G}^-$, но условие $\lim_{z \rightarrow \partial G} \frac{\tilde{v}(z)}{w(z)} = 0$

нарушено. Тогда существует последовательность $z_k \mathbf{G}^-$ точек области G такая, что $z_k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} z_0 \in \partial G$ и $\frac{\tilde{v}(z_k)}{w(z_k)} \geq C > 0$, $k \in \mathbf{N}$. Граница

∂G области G берётся в расширенной комплексной плоскости $\mathbf{C}^*$.

Пусть L – связная компонента дополнения $\mathbf{C}^* \setminus G$ области G . Рассмотрим множество $\Sigma := \mathbf{C}^* \setminus L$. Тогда Σ – односвязная область в $\mathbf{C}^*$, причём граница $\partial \Sigma$ области Σ содержит более одной точки и $z_0 \in \partial \Sigma$. Следовательно, существует конформное отображение θ области Σ на единичный круг $\mathbf{D} := \{z \in \mathbf{C} : |z| < 1\}$, $\theta \mathbf{G}_0 \mathbf{G}^- = 1$. Тогда $w_k = \theta \mathbf{G}_k \mathbf{G}^- \rightarrow 1$ при $k \rightarrow \infty$. Согласно [12, с. 204], из последовательности $f_k \mathbf{G}^-$ можно выделить интерполирующую подпоследовательность (определение интерполирующей последовательности [12]). Для простоты будем считать, что сама последовательность $f_k \mathbf{G}^-$ является интерполирующей в

$$H^\infty \mathbf{G}^- = \left\{ h \in A \mathbf{G}^- : \|h\|_\infty = \sup_{t \in \mathbf{D}} |h \mathbf{G}| < \infty \right\}. \text{ Используя}$$

[13, с. 285], находим функции $h_j \mathbf{G}^- \in H^\infty \mathbf{G}^-$ такие, что $h_j \mathbf{G}_k \mathbf{G}^- \rightarrow \delta_{jk}$, $j \in \mathbf{N}$, $k \in \mathbf{N}$, и $\sum_j |h_j \mathbf{G}| < M$ при

всех $w \in \mathbf{D}$. Из последнего условия вытекает, что

$$h_j \mathbf{G}^- \xrightarrow{\mathbf{D}} 0. \text{ Таким образом, мы получили ограниченные аналитические в области } \Sigma \text{ функции}$$

$h_j \circ \theta$, причём $\mathbf{G}_j \circ \theta \mathbf{G}_k \mathbf{G}^- \rightarrow \delta_{jk}$, $j \in \mathbf{N}$, $k \in \mathbf{N}$, и

$$\mathbf{G}_j \circ \theta \mathbf{G}^- \xrightarrow{\Sigma} 0. \text{ По обобщённой теореме Витали}$$

тогда $\mathbf{G}_j \circ \theta \mathbf{G}^- \xrightarrow{\mathbf{C}} 0$ равномерно. Далее по

свойствам ассоциированного веса при каждом $k \in \mathbf{N}$ найдётся функция g_k из $A_v \mathbf{G}^-$ с $\|g_k\|_v \leq 1$

такая, что $\tilde{v} \mathbf{G}_k \mathbf{G}^- = \|g_k \mathbf{G}_k\|_B$. Положим

$\xi_k = g_k \cdot \mathbf{G}_k \circ \theta$, $k \in \mathbf{N}$. Тогда последовательность $\xi_k \mathbf{G}^-$ ограничена в $A_v \mathbf{G}^-$ и $\xi_k \mathbf{G}^-$ сходится

к нулю в топологии τ_{co} . По теореме 3 получаем, что $\xi_k \rightarrow 0$ в $A_w \mathbb{G}$. Но при всех $k \in \mathbb{N}$

$$\|\xi_k\|_w = \sup_{z \in G} \frac{\|\xi_k\|_B}{w(z_k)} \geq \frac{\|\xi_k(z_k)\|_B}{w(z_k)} = \frac{\|g_k\|_B \cdot \|h_k\|_B}{w(z_k)} = \frac{\tilde{v}}{w(z_k)} \geq C.$$

Получилось противоречие, доказывающее необходимость и теореме в целом.

Литература

1. Bierstedt K.D., Bonet J., Taskinen J. Associated weights and spaces of holomorphic functions // *Studia Math.* 1998. Vol. 127. P. 137–168.
2. Abanin A.V., Pham Trong Tien. Painleve null sets, dimension and compact embedding of weighted holomorphic spaces // *Studia Math.* 2012. Vol. 213. P. 169–187.
3. Нестеров Н.Ю. Весовые классы непрерывных функций на метрических пространствах // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки.* 2013. № 3. С. 9–13.
4. Dineen S. *Complex analysis in locally convex spaces.* Amsterdam, 1981. 506 p.
5. Grothendieck A. Sur certains espaces de fonctions holomorphes // *J. Reine Angew. Math.* 1953. Vol. 192. P. 35–64.
6. Gleason A.M. The abstract theorem of Cauchy – Weyl // *Pacif. J. Math.* 1962. Vol. 12, № 2. P. 511–525.
7. Ryan R. Boundary values of analytic vector valued functions // *Proc. Koninkl. Nederl. Akad. Ser. A.* 1962. Vol. 65, № 5. P. 558–572.
8. Tillmann H. G. Vector-valued distributions and the spectral theorem for selfadjoint operators in Hilbert spaces // *Bull. Amer. Math. Soc.* 1963. Vol. 69, № 1. P. 67–72.
9. Jordi Juan Huguet. *Iterates of differential operators and vector valued functions on non quasi analytic classes: dissertation.* València, 2011.
10. Garcia D., Maestre M., Sevilla-Peris P. Weakly compact composition operators between weighted spaces // *Note di Mat.* 2005/2006. Vol. 25. P. 205–220.
11. Bonet J., Domański P., Lindström M. Essential norm and weak compactness of composition operators on weighted Banach spaces of analytic functions // *Canad. Math. Bull.* 1999. Vol. 42. P. 139–148.

12. Hoffman K. *Banach spaces of analytic functions.* Prentice-Hall, 1962. 226 p.
13. Garnett J. B. *Bounded analytic functions.* San Diego, 1981. 486 p.

References

1. Bierstedt K.D., Bonet J., Taskinen J. Associated weights and spaces of holomorphic functions. *Studia Math.*, 1998, vol. 127, pp. 137-168.
2. Abanin A.V., Pham Trong Tien. Painleve null sets, dimension and compact embedding of weighted holomorphic spaces. *Studia Math.*, 2012, vol. 213, pp. 169-187.
3. Nesterov N.Yu. Vesovye klassy nepreryvnykh funktsii na metricheskikh prostranstvakh [Weight class of continuous functions on metric spaces]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*, 2013, no 3, pp. 9-13.
4. Dineen S. *Complex analysis in locally convex spaces.* Amsterdam, 1981, 506 p.
5. Grothendieck A. Sur certains espaces de fonctions holomorphes. *J. Reine Angew. Math.*, 1953, vol. 192, pp. 35-64.
6. Gleason A.M. The abstract theorem of Cauchy-Weil. *Pacif. J. of Math.*, 1962, vol. 12, no 2, pp. 511-525.
7. Ryan R. Boundary values of analytic vector valued functions. *Proc. Koninkl. Nederl. Akad. Ser. A.*, 1962, vol. 65, no 5, pp. 558-572.
8. Tillmann H.G. Vector-valued distributions and the spectral theorem for selfadjoint operators in Hilbert space. *Bull. Amer. Math. Soc.*, 1963, vol. 69, no 1, pp. 67-72.
9. Jordi Juan Huguet. *Iterates of differential operators and vector valued functions on non quasi analytic classes: dissertation.* Valencia, 2011.
10. Garcia D., Maestre M., Sevilla-Peris P. Weakly compact composition operators between weighted spaces. *Note di Mat.*, 2005/2006, vol. 25, pp. 205-220.
11. Bonet J., Domański P., Lindström M. Essential norm and weak compactness of composition operators on weighted Banach spaces of analytic functions. *Canad. Math. Bull.*, 1999, vol. 42, pp. 139-148.
12. Hoffman K. *Banach spaces of analytic functions.* Prentice-Hall, 1962, 226 p.
13. Garnett J. *Bounded analytic functions.* San Diego, 1981, 486 p.

УДК 541.127

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-47-52

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ КОНЦЕНТРАЦИЙ ИОНОВ В ДВОЙНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ СЛОЕ

© 2015 г. Л.Ж. Паланджянц, А.А. Попова, С.К. Куижева

Паланджянц Левон Жирайрович – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра высшей математики и системного анализа, Майкопский государственный технологический университет, ул. Первомайская, 191, г. Майкоп, 385000, e-mail: levonmgtu@rambler.ru

Попова Ангелина Алексеевна – доктор химических наук, профессор, заведующая кафедрой химии, физики и физико-химических методов исследования, Майкопский государственный технологический университет, ул. Первомайская, 191, г. Майкоп, 385000, e-mail: ang.popova@gmail.com

Куижева Саида Казбековна – кандидат физико-математических наук, доцент, ректор Майкопского государственного технологического университета, ул. Первомайская, 191, г. Майкоп, 385000, e-mail: info@mkgtu.ru

Palandzhyants Levon Zhirairovich – Candidate of Physical and Mathematical Science, Associate Professor, Department of Higher Mathematics and Systems Analysis, Maykop State Technological University, Pervomayskaya St., 191, Maykop, 385000, Russia, e-mail: levonmgtu@rambler.ru

Popova Angelina Alekseevna – Doctor of Chemical Science, Professor, Head of Department of Chemistry, Physics and Physico-Chemical Methods of Analysis, Maykop State Technological University, Pervomayskaya St., 191, Maykop, 385000, Russia, e-mail: ang.popova@gmail.com

Kuizheva Saida Kazbekovna – Candidate of Physical and Mathematical Science, Associate Professor, Rector of Maykop State Technological University, Pervomayskaya St., 191, Maykop, 385000, Russia, e-mail: info@mkgtu.ru

Найдены новые решения системы уравнений, описывающей избыточную концентрацию катионов и анионов в двойном электрическом слое при постоянной относительной диэлектрической проницаемости. Установлено, что в области нулевого заряда существует дискретное периодическое изменение избыточной концентрации катионов, а на фазовой плоскости наблюдается предельный цикл.

Ключевые слова: двойной электрический слой, адсорбция, модель адсорбции, емкость двойного электрического слоя.

New decisions of the system of equations described ion distribution in the double layer at constant permittivity were observed. It was found periodic change of excess concentration of the cation in zero charge field. The limit cycle is observed on the phase plane.

Keywords: electrical double layer, adsorption, adsorption model, capacity of double layer.

Протекание тока, распределение потенциала и изменение емкости в двойном электрическом слое на границе металла с электролитом оказывают значительное влияние на электрохимические процессы, применяющиеся во многих технологических и биологических системах [1–5].

Основываясь на представлениях Гельмгольца [6], предложившего для описания двойного слоя на границе электрод – раствор модель неограниченного плоского конденсатора, и более поздних теориях Гуи–Чапмена [7, 8], Штерна [9], Грэма [10, 11], исследователи межфазных границ выделяют в двойном слое плотную и диффузную части, характеризующиеся однородностью и непрерывностью электрического поля вдоль эквипотенциальной поверхности электрода или нормально к ней. Соответствие теоретической модели [10, 11] экспериментальным данным для переходных металлов в органических средах проверялось в работах [12–15]. Данные модели неоднократно уточнялись с учетом влияния взаимодействий молекул или ионов растворителя, строения его диполей, электронного

строения металла электрода и других факторов, что не отражалось на основополагающих тезисах теорий. Однако количественные расчеты по данным теориям, например, емкости двойного электрического слоя приводят к значениям, не согласующимся с экспериментальными данными.

С другой стороны, на основе подхода [16, 17], предполагающего дискретное изменение состояний на поверхности электрода при адсорбции частиц растворителя, которые можно представить совокупностью энергетически независимых микроячеек, содержащих минимальное число избыточных противоположных зарядов и обладающих свойствами микроконденсатора, получены новые сведения о распределении концентраций ионов в двойном электрическом слое, определяющем основные его свойства.

В настоящей работе исследовали систему уравнений, описывающую избыточную концентрацию ионов в двойном электрическом слое при постоянной относительной диэлектрической проницаемости среды.

Отождествляя уровень эквипотенциальной поверхности $\varphi = \psi$, при относительно медленной волнообразной деформации уровня расположения избыточных ионов рассмотрим систему дифференциальных уравнений [16], характеризующую распределение катионов (для определенности) по толщине обкладки двойного электрического слоя:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \Psi \frac{1}{2\xi} \frac{\partial u}{\partial \xi} - \frac{\xi}{\varepsilon} uv = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} - \frac{n_a n_k}{n_k^2 + n_a^2} \frac{\xi}{\varepsilon} uv = 0, \quad 1 \leq \xi < \infty, \quad (2)$$

где $\varphi(z)$ – функциональная зависимость потенциала от расстояния избыточного иона до поверхности электрода; ψ – сдвиг потенциала электрода относительно потенциала нулевого заряда; $u = \frac{C_e}{C_{s0}}$;

$v = \frac{C_a}{C_{s0}}$; C_{s0} – концентрация раствора в глубине фазы, моль·л⁻¹; $C_e = C_k + (n_a/n_k)C_a$ – избыточная концентрация катионов; $\xi = (z + z_e)/(z_0 \xi_0)$,

$z_e = z_0(\xi_0 - 1)$, м; $\xi_0 = \varepsilon_e/\varepsilon_k$; $\Psi = \psi n_k F/(RT)$; $\varsigma = -n_a(n_a^2 + n_k^2)C_{s0}z_0^2 F^2/(\varepsilon_0 RT)$; Z_0 – минимальное значение z ; $n_k > 0$ и $n_a < 0$ – заряды катиона и аниона; F – число Фарадея, Кл; R – газовая постоянная, Дж·моль⁻¹·К⁻¹; T – абсолютная температура, К; ε_s и ε_e – эффективные значения диэлектрической проницаемости раствора при $z < z_0$ и $z > z_0$ соответственно; $\varepsilon_e = \varepsilon_0 \varepsilon$, ε_0 – электрическая постоянная; $\psi = E_0 - E$ – сдвиг потенциала E электрода от потенциала нулевого заряда E_0 , В; $\varepsilon = \varepsilon \left[\frac{\Psi}{z + z_0} \right]$ –

относительная диэлектрическая проницаемость как функция поля.

Решение системы уравнений в силу их однородности имеет вид

$$u(\xi, \Psi) = u_0(\Psi) f(\xi, \Psi), \quad v(\xi, \Psi) = v_0(\Psi) f(\xi, \Psi),$$

$$u_0(\Psi) = u(1, \Psi), \quad v_0(\Psi) = v(1, \Psi).$$

Интегральная и дифференциальная емкости $C_i(\Psi)$, C_d двойного слоя вычисляются по формулам [16]:

$$C_i(\Psi) = \frac{\int_{z_0 \xi_0}^{\infty} \varepsilon_e f(\xi, \Psi) d\xi}{1 - \int_1^{\infty} \xi f(\xi, \Psi) d\xi - z_0(\xi_0 - 1) \int_1^{\infty} f(\xi, \Psi) d\xi}, \quad (3)$$

$$C_d = C_i + \Psi \frac{\partial C_i}{\partial \Psi}. \quad (4)$$

Отметим, что при $\varepsilon_e = \text{const}$ можно ввести безразмерные емкости $\hat{G}_i = \frac{z_0}{\varepsilon_e} C_i$ и $\hat{G}_d = \frac{z_0}{\varepsilon_e} C_d$.

1. Введем обозначения $\frac{\xi}{\varepsilon} = a_1$, $\frac{n_a n_k}{n_k^2 + n_a^2} \frac{\xi}{\varepsilon} = a_2$. Будем искать решение системы уравнений (1), (2) в виде $u = \frac{k_1}{\xi^2}$, $v = \frac{k_2}{\xi^2}$. Имеем $u' = \frac{-2k_1}{\xi^3}$, $u'' = \frac{6k_1}{\xi^4}$, $v' = \frac{-2k_2}{\xi^3}$, $v'' = \frac{6k_2}{\xi^4}$. Система уравнений (1), (2) запишется в виде

$$\frac{6k_1}{\xi^4} + \frac{\Psi}{2\xi} \cdot \frac{-2k_1}{\xi^3} - a_1 \frac{k_1}{\xi^2} \frac{k_2}{\xi^2} = 0,$$

$$\frac{6k_2}{\xi^4} - a_2 \frac{k_1}{\xi^2} \frac{k_2}{\xi^2} = 0.$$

Откуда следует, что $k_1 = \frac{6}{a_2}$, $k_2 = \frac{6 - \Psi}{a_1}$. Следовательно, $u(\xi) = \frac{6}{a_2 \xi^2}$, $v(\xi) = \frac{6 - \Psi}{a_1 \xi^2}$ – решение системы уравнений (1), (2).

Вычислим соответствующие линейно независимые решения.

$$\text{Пусть } u_1(\xi) = \frac{6}{a_2 \xi^2}.$$

Известно, что если u_1 – решение уравнения $u'' + p(\xi)u' + q(\xi)u = 0$, то $u_2 = u_1 \int \frac{\exp\left(\int p(\xi) d\xi\right)}{u_1^2} d\xi$ – линейно независимое решение. Следовательно,

$$u_2(\xi) = \frac{k_1}{\xi^2} \int \frac{\exp\left(-\int \frac{\Psi}{2\xi} d\xi\right) \cdot \xi^4}{k_1^2} d\xi =$$

$$= \frac{k_1}{\xi^2} \int \xi^{4 - \frac{\Psi}{2}} d\xi = \frac{a_2 \xi^{3 - \frac{\Psi}{2}}}{3(10 - \Psi)}.$$

Тот факт, что $u_2(\xi)$ – решение уравнения (1) при $v(\xi) = \frac{6 - \Psi}{a_1 \xi^2}$, легко проверяется. В самом деле,

$$u'_2 = \frac{a_2 \left(3 - \frac{\Psi}{2}\right)}{3(10 - \Psi)} \cdot \xi^{2 - \frac{\Psi}{2}}, \quad u''_2 = \frac{a_2 \left(3 - \frac{\Psi}{2}\right) \left(2 - \frac{\Psi}{2}\right)}{3(10 - \Psi)} \cdot \xi^{1 - \frac{\Psi}{2}}.$$

Подставляя v, u_2, u'_2, u''_2 в уравнение (1), получаем тождество.

$$\frac{a_2 \left(3 - \frac{\Psi}{2}\right) \left(2 - \frac{\Psi}{2}\right)}{3(10 - \Psi)} \cdot \xi^{1 - \frac{\Psi}{2}} + \frac{\Psi}{2\xi} \frac{a_2 \left(3 - \frac{\Psi}{2}\right)}{3(10 - \Psi)} \cdot \xi^{2 - \frac{\Psi}{2}} -$$

$$- a_1 \frac{6 - \Psi}{a_1 \xi^2} \frac{a_2 \xi^{3 - \frac{\Psi}{2}}}{3(10 - \Psi)} \equiv 0.$$

Аналогично вычисляется линейно независимое решение для $v_1(\xi) = \frac{6 - \Psi}{a_1 \xi^2}$. Имеем

$$v_2 = v_1 \int \frac{d\xi}{v_1^2} = \frac{6-\Psi}{a_1 \xi^2} \int \frac{a_1^2 \xi^4}{(6-\Psi)^2} = \frac{a_1 \xi^3}{5(6-\Psi)}.$$

Тот факт, что $v_2(\xi)$ – решение уравнения (2)

при $u_1(\xi) = \frac{6}{a_2 \xi^2}$, легко проверяется.

В самом деле, подставляя u_1, v_2, v_2'' в уравнение (2), получаем тождество $\frac{6a_1 \xi}{5(6-\Psi)} - a_2 \frac{6}{a_2 \xi^2} \frac{a_1 \xi^3}{5(6-\Psi)} \equiv 0$.

Таким образом, получаем следующую пару линейно независимых решений системы уравнений (1), (2):

$$u_1(\xi) = \frac{6}{a_2 \xi^2}, \quad v_1(\xi) = \frac{6-\Psi}{a_1 \xi^2}; \quad u_2(\xi) = \frac{a_2 \xi^{3-\frac{\Psi}{2}}}{3(10-\Psi)}, \quad v_2(\xi) = \frac{a_1 \xi^3}{5(6-\Psi)}.$$

Для каждой пары решений $u_1(\xi)$ и $u_2(\xi, \Psi)$ вычислим интегральную и дифференциальную емкости.

Начнем с решения $u_1(\xi)$, поскольку оно не зависит от Ψ . Вычислим соответствующие интегралы.

$$\int u_1(\xi) d\xi = -\frac{6}{a_2 \xi}, \quad \int \xi u_1(\xi) d\xi = \frac{6 \ln \xi}{a_2}.$$

Безразмерная интегральная емкость:

$$G_i(\xi) = \frac{-\frac{6}{a_2 \xi} + \frac{6}{a_2}}{\xi_0 \frac{6 \ln \xi}{a_2} - (\xi_0 - 1) \frac{6}{a_2 \xi} + (\xi_0 - 1) \frac{6}{a_2}}.$$

При $\xi \rightarrow \infty$ получаем $G_i = 0$, следовательно, $G_d = 0$.

Перейдем к решению $u_2(\xi, \Psi)$. Вычислим соответствующие интегралы.

$$\int u_2(\xi, \Psi) d\xi = \frac{2a_2}{3(10-\Psi)} \cdot \frac{\xi^{4-\frac{\Psi}{2}}}{8-\Psi}, \quad \int \xi u_2(\xi, \Psi) d\xi = \frac{2a_2 \xi^{5-\frac{\Psi}{2}}}{3(10-\Psi)^2}.$$

При $\Psi \geq 8$ имеем

$$\int_1^\xi u_2(\xi, \Psi) d\xi = \frac{2a_2}{3(10-\Psi)} \cdot \frac{1}{(8-\Psi)\xi^{\frac{\Psi}{2}-4}} - \frac{2a_2}{3(10-\Psi)(8-\Psi)}.$$

При $\xi \rightarrow \infty$ получаем

$$\int_1^\infty u_2(\xi, \Psi) d\xi = \frac{2a_2}{3(10-\Psi)(\Psi-8)}.$$

Аналогично при $\Psi \geq 10$ имеем

$$\int_1^\xi u_2(\xi, \Psi) d\xi = \frac{2a_2}{3(10-\Psi)} \cdot \frac{1}{(10-\Psi)\xi^{\frac{\Psi}{2}-4}} - \frac{2a_2}{3(10-\Psi)^2}.$$

При $\xi \rightarrow \infty$ получаем

$$\int_1^\infty u_2(\xi, \Psi) d\xi = \frac{2a_2}{3(10-\Psi)(\Psi-8)}.$$

Таким образом, безразмерная интегральная емкость, соответствующая решению $u_2(\xi, \Psi)$, примет вид

$$G_i(\Psi) = \frac{\Psi-10}{\Psi-10+10\xi_0}.$$

Безразмерная дифференциальная емкость, вычисленная по формуле (4),

$$G_d = \frac{(\Psi-10)(\Psi-10+10\xi_0)+10\xi_0\Psi}{(\Psi-10+10\xi_0)^2}.$$

Отметим, что интегральная и дифференциальная емкости имеют такой же вид, как и в случае разбавленного раствора, $\xi = 0$, но определены при большем значении Ψ (рис. 1).

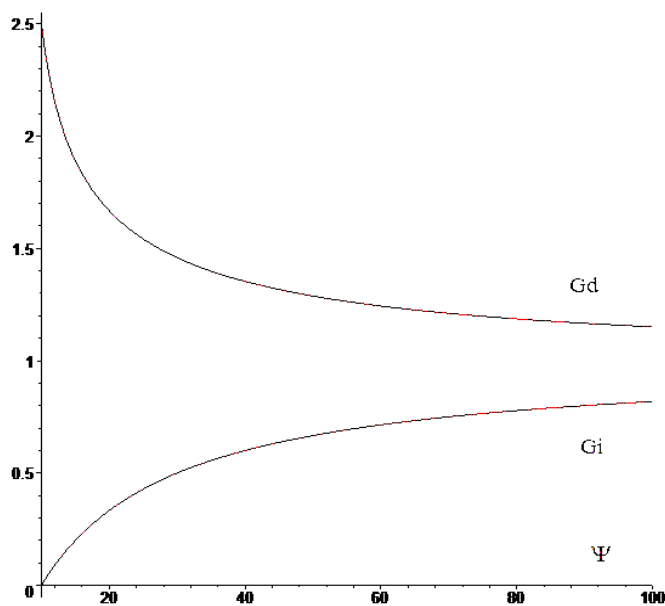


Рис. 1. Схематические графики зависимостей дифференциальной емкости G_d и интегральной емкости G_i от скачка потенциала относительно потенциала нулевого заряда Ψ

2. Рассмотрим случай $\Psi = 0$ (окрестность нулевого заряда), $\varepsilon_e = \text{const}$.

В [16] вычисляется точное решение системы уравнений (1), (2) при $v=1$, $\varepsilon_e = \text{const}$. Найдем новые решения.

При $\Psi = 0$ система уравнений (1), (2) примет вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} - a_1 u v = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} - a_2 u v = 0, \quad 1 \leq \xi < \infty, \quad (6)$$

где $a_1 = \frac{\zeta}{\varepsilon}$, $a_2 = \frac{n_a n_k}{n_a^2 + n_k^2} \cdot \frac{\zeta}{\varepsilon}$, $n_k > 0$, $n_a < 0$.

Из системы уравнений (1), (2) имеем $\frac{u''}{v''} = \frac{a_1}{a_2}$, откуда следует, что

$$u = \frac{a_1}{a_2} v + c_1 \xi + c_2, \quad (7)$$

где $c_1 = u'(\xi_0) - \frac{a_1}{a_2} v'(\xi_0)$,

$$c_2 = u(\xi_0) - \frac{a_1}{a_2} v(\xi_0) - (u'(\xi_0) - \frac{a_1}{a_2} v'(\xi_0)) \xi_0.$$

Подставляя равенство (7) в уравнение (6), получаем

$$v'' - a_1 v^2 - a_2 c_1 \xi v - a_2 c_2 v = 0. \quad (8)$$

Отметим, что уравнения типа (8) применяются при решении химических задач [18].

Пусть $c_1 = 0$. Тогда уравнение (8) преобразуется в уравнение

$$v'' - a_1 v^2 - a_2 c_2 v = 0. \quad (9)$$

В общем случае решение уравнения (9) выражается через функцию Вейерштрасса $v = \wp(\xi)$:

$$\xi - \xi_0 = \int_{\xi_0}^{\xi} \frac{dv}{\sqrt{\frac{2}{3} a_1 v^3 + a_2 c_2 v^2 + 2c_3}},$$

где $\tilde{n}_3$ – постоянная интегрирования.

Будем искать частное решение уравнения (9) в виде $v = \frac{k}{\cos^2 \alpha \xi}$.

Тогда $v' = \frac{2k\alpha \sin \alpha \xi}{\cos^3 \alpha \xi}$, $v'' = \frac{-4k\alpha^2}{\cos^2 \alpha \xi} + \frac{6k\alpha^2}{\cos^4 \alpha \xi}$. Подставляя v, v'' в уравнение (9), получаем $-4k\alpha^2 - a_2 c_2 k = 0$, $6k\alpha^2 - a_1 k^2 = 0$, откуда следует, что $\alpha = \frac{\sqrt{-a_2 c_2}}{2}$, $k = \frac{-3a_2 c_2}{2a_1}$. Так как $a_2 < 0$, то α – действительное число.

Таким образом, получаем решение

$$v = -\frac{3a_2 c_2}{2a_1 \cos^2 \frac{\sqrt{-a_2 c_2}}{2} \xi}.$$

При этих ограничениях можно построить схематический график избыточной концентрации анионов $v = v(\xi)$ (рис. 2). Таким образом, в случае нулевого заряда ($\Psi = 0$) существует дискретное периодическое изменение избыточной концентрации ионов.

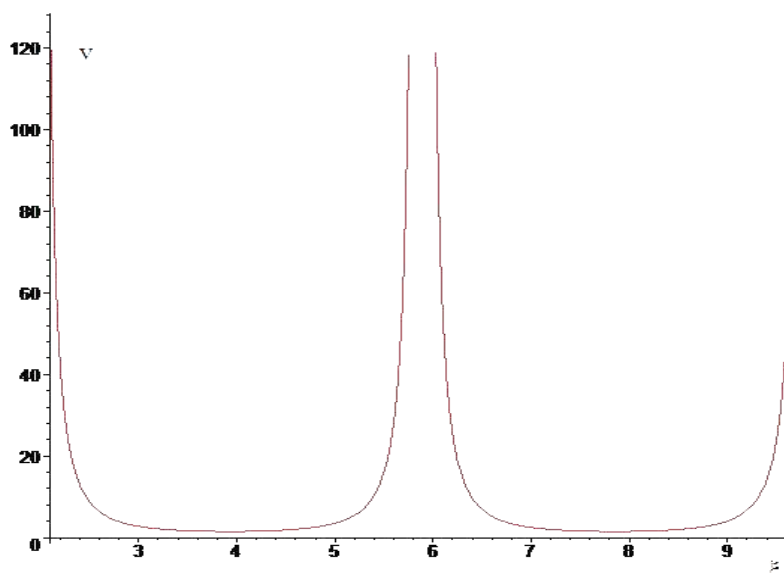


Рис. 2. Схематический график зависимости избыточной концентрации ионов v от ξ

Замечание 1. Частное решение уравнения (9) можно искать в виде $v = \frac{k}{ch^2 \alpha \xi}$. При этом выясняется,

$$\text{что } \alpha = \frac{\sqrt{a_2 c_2}}{2}, \quad k = \frac{-3a_2 c_2}{2a_1}.$$

Поскольку $a_2 < 0$, то $\alpha = \frac{i\sqrt{-a_2 c_2}}{2}$. Тогда с учетом равенства $ch\left(\frac{i\sqrt{-a_2 c_2}}{2}\right) = \cos\left(\frac{\sqrt{-a_2 c_2}}{2}\right)$ частное решение уравнения (9) представится в виде $v = \frac{k}{\cos^2 \alpha \xi}$.

Замечание 2. Поскольку существует периодическое решение, то на фазовой плоскости (u, u') должен существовать предельный цикл. Вычисления показывают, что предельный цикл представляет собой овал расходящейся параболы (рис. 3).

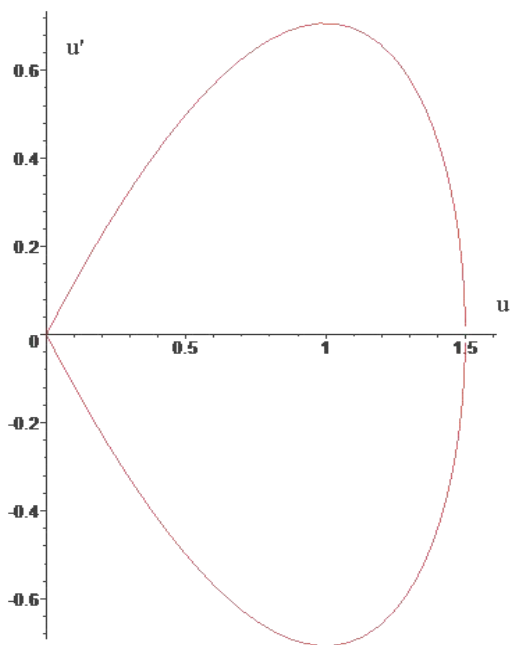


Рис. 3. Схематический график зависимости избыточной концентрации катионов u от функции диэлектрической проницаемости среды ξ

В самом деле, из уравнения (9) посредством интегрирования получаем

$$\frac{v'^2}{2} = \frac{a_1 v^3}{3} + \frac{a_2 c_2 v^2}{2} + c_3, \quad (10)$$

где c_3 — постоянная интегрирования.

Подставляя $v = \frac{a_2}{a_1}(u - c_2)$ в уравнение (10), после некоторых преобразований получаем

$$u'^2 = \frac{2a_2}{3}u^3 - a_2 c_2 u^2 + \frac{a_2 c_2^3}{3} + 2c_3 \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2 \quad (11)$$

Ввиду произвольности c_3 положим $\frac{a_2 c_2^3}{3} + 2c_3 \left(\frac{a_1}{a_2}\right) = 0$.

Тогда уравнение (11) запишется в виде

$$u'^2 = \frac{2a_2}{3}u^2 \left(u - \frac{3c_2}{2}\right). \quad (12)$$

На фазовой плоскости (u, u') кривая (12) представляет собой расходящуюся параболу (рис. 3).

Замечание 3. Из равенства $c_e = c_k + (n_a/n_k)c_a$ получаем соотношение между функциями $u(\xi)$ и $v(\xi)$. Обозначим концентрацию катионов через

$$w(\xi) = \frac{c_k}{c_{s0}}. \quad \text{Тогда имеет место равенство}$$

$$u(\xi) = w(\xi) + \frac{n_a}{n_k} v(\xi). \quad (13)$$

При $c_1 = 0$ из равенств (7) и (13) имеем

$$w + \frac{n_a}{n_k} v = \frac{n_k^2 + n_a^2}{n_k n_a} v + c_2 \quad \text{или}$$

$$w(\xi) = \frac{n_k}{n_a} v(\xi) + u(\xi_0) - \frac{n_a n_k}{n_a^2 + n_k^2} v(\xi_0).$$

Таким образом, найдены новые решения системы уравнений (1), (2) в предположении, что ε — постоянная. Построены графики зависимостей интегральной и дифференциальной емкостей двойного слоя от Ψ .

Литература

1. Monk P.M.C., Mortimer R.J., Rossinsky D.R. Electrochromism: fundamentals and applications. Cambridge, 2007. 488 p.
2. Rajeshwar K., Ibanez J.G. Environmental electrochemistry — fundamentals and applications in pollution abatement. San Diego, 1997. 804 p.
3. Hanawa T. Electrochemical techniques to obtain biofunctional materials // Applications of electrochemistry and nanotechnology in biology and medicine / ed. N. Eliaz. N.Y., 2011. P. 343–376.
4. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А., Цирлина Г.А. Электрохимия. М., 2001. 624 с.
5. Попова А.А. Анодное поведение переходных металлов в водных и органических средах. Ростов н/Д., 2006. 184 с.
6. Helmholtz H. Ueber einige Gesetze der Vertheilung elektrischer ströme in körperlichen Leitern mit Anwendung auf die thierisch-elektrischen Versuche // Pogg. Ann. Phys. und Chem. 1853. Vol. 89. S. 211.
7. Gouy L.G. Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte // J. Phys. Theor. Appl. 1910. Vol. 9, № 1. P. 457.
8. Chapman D. A contribution to the theory of electrocapillarity // Philos. Mag. Ser. VI. 1913. Vol. 25. P. 475.
9. Stern O. Zur Theorie der elektrolytischen Doppelschicht // Z. Electrochem. 1924. Vol. 30. S. 508.
10. Grahame D.C. The electrical double layer and the theory of electrocapillarity // Chem. Rev. 1947. Vol. 41, № 3. P. 441.
11. Grahame D.C., Parsons R. Components of charge and potential in the inner region of the electrical double layer:

- Aqueous potassium chloride solutions in contact with mercury at 25 °C // *J. Am. Chem. Soc.* 1961. Vol. 83. P. 1291.
12. Попова А.А., Паланджянц Л.Ж. Анализ адсорбционных параметров и кривых дифференциальной емкости переходных металлов в растворах насыщенных спиртов // *Коррозия: материалы, защита*. 2009. № 2. С. 41.
 13. Попова А.А., Паланджянц Л.Ж. Расчет кривых дифференциальной емкости при адсорбции насыщенных спиртов из нейтральных растворов на поверхности некоторых переходных металлов // *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2010. Т. 12, № 4. С. 386.
 14. Попова А.А., Паланджянц Л.Ж. Возникновение пиков дифференциальной емкости на поверхности переходных металлов при анодной поляризации // *Вестн. ВГУ. Химия, биология, фармация*. 2009. № 1. С. 32.
 15. Попова А.А., Паланджянц Л.Ж. Расчет кривых дифференциальной емкости титана, ванадия, ниобия в спиртовых средах // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*. 2008. № 2. С. 67.
 16. Гохштейн А.Я. О дискретности тока и диффузии в двойном слое // *Докл. РАН*. 1996. Т. 350, № 5. С. 632.
 17. Гохштейн А.Я. Электролиз и поверхностные явления. К 200-летию публикации Вольты о первом источнике постоянного тока // *Успехи физ. наук*. 2000. Т. 170, № 7. С. 779.
 18. Jüttner E. Die chemische Reaktionskinetik und eine neue Painlevésche Transzendente // *Zeitschrift f. Math. Phys.* 1910. Vol. 58. S. 385.
 7. Gouy L.G. Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte. *J. Phys. Theor. Appl.*, 1910, vol. 9, no 1, p. 457.
 8. Chapman D. A contribution to the theory of electrocapillarity. *Philos. Mag.* Ser. 6, 1913, vol. 25, p. 475.
 9. Stern O. Zur Theorie der elektrolytischen Doppelschicht. *Z. Elektrochem.*, 1924, vol. 30, s. 508.
 10. Grahame D.C. The electrical double layer and the theory of electrocapillarity. *Chem. Rev.*, 1947, vol. 41, no 3, p. 441.
 11. Grahame D.C., Parsons R. Components of charge and potential in the inner region of the electrical double layer: Aqueous potassium chloride solutions in contact with mercury at 25°. *J. Am. Chem. Soc.*, 1961, vol. 83, p. 1291.
 12. Popova A.A., Palandzhyants L.Zh. Analiz adsorbtsionnykh parametrov i krivyykh differentsial'noi emkosti nekotorykh perekhodnykh metallov v rastvorakh nasyschennykh spirtov [Analysis of adsorption parameters and curves differential capacitance certain transition metals in solutions saturated alcohols]. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2009, no 2, p. 41.
 13. Popova A.A., Palandzhyants L.Zh. Raschet krivyykh differentsial'noi emkosti pri adsorbtsii nasyschennykh spirtov iz neutral'nykh rastvorov na poverkhnosti nekotorykh perekhodnykh metallov [Calculating differential capacity curves in adsorption of saturated alcohols from neutral solutions on the surface of certain transition metals]. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy*, 2010, vol. 12, no 4, p. 386.
 14. Popova A.A., Palandzhyants L.Zh. Vozniknovenie pikov differentsial'noi emkosti na poverkhnosti perekhodnykh metallov pri anodnoi polarizatsii [The emergence of the peaks on the surface of the differential capacitance of transition metals in the anodic polarization]. *Vestnik VGU. Khimiya, biologiya, farmatsiya*, 2009, no 1, p. 32.
 15. Popova A.A., Palandzhyants L.Zh. Raschet krivyykh differentsial'noi emkosti dlya titana, vanadiya, niobiya v spirtovykh sredakh [Calculating differential capacity curves for titanium, vanadium, niobium in an alcoholic medium]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*, 2008, no 2, p. 67.
 16. Gokhshtein A.Ya. O diskretnosti toka i diffuzii v dvoimom sloe [Discreteness current and diffusion in the double layer]. *Dokl. RAN*, 1996, vol. 350, no 5, p. 632.
 17. Gokhshtein A.Ya. Elektroliz i poverkhnostnye yavleniya. K 200-letiyu publikatsii Vol'ta o pervom istochnike postoyannogo toka [Electrolysis and surface phenomena. By the 200th anniversary of the Volt's publication about the first source of direct current]. *Uspexi fizicheskikh nauk*, 2000, vol. 170, no 7, p. 779.
 18. Jüttner F. Die chemische Reaktionskinetik und eine neue Painlevésche Transzendente. *Zeitschrift. f. Math. Phys.* 1910, vol. 58, s. 385.

References

1. Monk P.M.S., Mortimer R.J., Rossinsky D.R. *Electrochromism: fundamentals and applications*. Cambridge, 2007, 488 p.
2. Rajeshwar K., Ibanez J.G. *Environmental electrochemistry – fundamentals and applications in pollution abatement*. San Diego, 1997, 804 p.
3. Hanawa T. Electrochemical techniques to obtain biofunctional materials. *Applications of electrochemistry and nanotechnology in biology and medicine* (Ed. N. Eliaz). N.Y., 2011, pp. 343-376.
4. Damaskin B.B., Petrii O.A., Tsirlina G.A. *Elektrokhimiya* [Electrochemistry]. Moscow, 2001, 624 p.
5. Popova A.A. *Anodnoe povedenie perekhodnykh metallov v vodnykh i organicheskikh sredakh* [Anodic behavior of transition metals in aqueous and organic media]. Rostov-on-Don, 2006, 184 p.
6. Helmholtz H. Ueber einige Gesetze der Vertheilung elektrischer Ströme in körperlichen Leitern mit Anwendung auf die thierisch-elektrischen Versuche. *Pogg. Ann. Phys. und Chem.*, 1853, vol. 89, s. 211.

УДК 550.385.3, 550.343

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-53-59

О ДИЛАТАНСКИХ ОБРАЗОВАНИЯХ, УЧАСТВУЮЩИХ В ФОРМИРОВАНИИ КОРНЕВЫХ СТРУКТУР И ВЫВОДЯЩИХ КАНАЛОВ ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ*

© 2015 г. Л.Е. Собисевич, А.Л. Собисевич, Х.Д. Канониди, К.Х. Канониди, Д.В. Лиходеев, Д.А. Преснов

Собисевич Леонид Евгеньевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, 10, г. Москва, 123995, e-mail: sobis@ifz.ru

Собисевич Алексей Леонидович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, 10, г. Москва, 123995, e-mail: alex@ifz.ru

Канониди Харлампий Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, заведующий сектором магнитно-ионосферных взаимодействий, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Троицк, Московская обл., 142190, e-mail: kanonidi@izmiran.ru

Канониди Константин Харлампиевич – старший научный сотрудник, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Троицк, Московская обл., 142190, e-mail: kkkh@izmiran.ru

Лиходеев Дмитрий Владимирович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, 10, г. Москва, 123995, e-mail: dmitry@ifz.ru

Преснов Дмитрий Александрович – ведущий инженер, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, 10, г. Москва, 123995, e-mail: presnov@ifz.ru

Sobisevich Leonid Evgen'evich – Doctor of Technical Science, Main Researcher, Schmidt Institute of Physics of Earth RAS, Bolshaya Gruzinskaya St., 10, Moscow, 123995, Russia, e-mail: sobis@ifz.ru

Sobisevich Aleksei Leonidovich – Doctor of Physical and Mathematical Science, Head of the Laboratory, Schmidt Institute of Physics of Earth RAS, Bolshaya Gruzinskaya St., 10, Moscow, 123995, Russia, e-mail: alex@ifz.ru

Kanonidi Kharlampii Dmitrievich – Candidate of Physical and Mathematical Science, Head of Sector of Magnetic-Ionospheric Interactions, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Troitsk, Moscow Region, 142190, Russia, e-mail: kanonidi@izmiran.ru

Kanonidi Konstantin Kharlampievich – Senior Researcher, Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Troitsk, Moscow Region, 142190, Russia, e-mail: kkkh@izmiran.ru

Likhodeev Dmitrii Vladimirovich – Candidate of Physical and Mathematical Science, Researcher, Schmidt Institute of Physics of Earth RAS, Bolshaya Gruzinskaya St., 10, Moscow, 123995, Russia, e-mail: dmitry@ifz.ru

Presnov Dmitrii Aleksandrovich – Leading Engineer, Schmidt Institute of Physics of Earth RAS, Bolshaya Gruzinskaya St., 10, Moscow, 123995, Russia, e-mail: presnov@ifz.ru

Развиваются новые подходы к анализу некоторых геолого-геофизических структур дилатансного типа, которые обнаружены нами в теле вулканической постройки грязевых вулканов. Показано, что на всех этапах существования эти структуры определяют в конечном итоге степень и масштабы активности вулкана. Получены новые экспериментальные данные, подтверждающие важную роль дилатансных процессов в «жизни» грязевулканических образований.

Ключевые слова: дилатансные образования, грязевые вулканы, грязебрекчии, извержение вулкана.

In this paper new approaches to the analysis of specific geological structures of dilatational type inside a mud volcanic edifice are developed. It is shown that at all stages of existence those structures control the level and scale of activity of a mud volcano. The new experimental data confirming an important role the processes of dilatancy in the «life-cycle» of mud-volcanic processes are obtained.

Keywords: dilatancy education, mud volcano, mud breccias, eruption.

Грязевые вулканы представляют собой известное явление в геологии, механизмы которого до сих пор не получили всестороннего объяснения. На планете насчитывается более 1700 надводных и подводных грязевулканических построек. Извержения начинаются с взрыва газов в кратере, разрушения кратерной пробки и поступления на поверхность потоков полужидких грязебрекчий. Одновременно из жерла выбра-

сываются твердые обломки и глыбы пород, нередко происходит самовозгорание углеводородных газов. Массы грязебрекчий, содержащих большие количества воды, иногда с примесями нефти, сероводорода и рассеянных сульфидов, растекаясь по поверхности вулканической постройки, надстраивают старый вулканический конус. Примером такого извержения является событие, связанное с извержением вулкана

* Работа выполнена при финансовой поддержке программы № 18 фундаментальных исследований Президиума РАН.

горы Карabetова (Керченско-Таманская грязевулканическая провинция) в 2001 г. Очевидцы отмечали, что пламя во время взрыва вулкана поднялось на большую высоту, и было видно далеко за пределами Тамани в г. Новороссийске [1].

Извержение грязевого вулкана, как правило, длится несколько дней, сопровождается слабыми сейсмическими событиями и подземным гулом. В ряде случаев оно распадается на отдельные фазы, в течение которых преобладают то одни, то другие продукты грязевулканической деятельности. Затем вулкан затихает. Затишье может продолжаться многие годы. В этот период на кратерной площадке грязевого вулкана появляются многочисленные сальзы и грифоны, непрерывно поставляющие на поверхность жидкую грязь, газ, воду, в которой появляются нефтяные пленки. Здесь у каждого источника, пробивающегося на поверхность, отлагается масса плотных глинистых корок, которые, нарастаясь, превращаются в миниатюрное подобие вулканических построек настоящих вулканов. С подобными явлениями мы встречались на вулкане Шуго, который может быть отнесен к наиболее представительным геологическим образованиям этого типа в Керченско-Таманской грязевулканической провинции [2, 3].

Систему грязевулканических камер, вертикальных и наклонных выводящих каналов, по которым на поверхность поступает масса грязебрекчий разной консистенции, воды, жидких и газообразных углеводородов, в геологической литературе принято называть корнями грязевых вулканов. В настоящей статье под корневой структурой грязевого вулкана мы понимаем область, соответствующую основной грязевулканической камере и очагу. Выше лежат структуры, именуемые нами как выводящие каналы. Глубины, на которые проникают корни грязевых вулканов, определялись несколькими независимыми методами [4, 5].

Изучая грязевой вулканизм, необходимо принимать во внимание, что грязевулканические провинции, в пределах которых наблюдается значительное число действующих грязевых вулканов, расположены в зонах повышенной сейсмической опасности. Здесь в результате развития тектонических процессов возникают области высокой концентрации напряжений. Они в свою очередь вызывают значительные реологические изменения в геологической среде отдельного региона и формируют структуры дилатансного типа, которые ответственны за генерацию физических полей (сейсмических, деформационных и др.) [5].

Согласно современным представлениям, извержения грязевых вулканов могут быть инициированы местными сейсмическими событиями [6]. Однако спусковым механизмом момента начала извержения выступают и другие природные процессы, протекающие в различных геосферах [7].

Но как объяснить появление избыточного давления углеводородных газов, сконцентрированных в

недрах? Сегодня существует несколько гипотез, проясняющих эту проблему. Каждая из них имеет право на существование [8, 9]. Мы не будем на них останавливаться, отсылая читателя к цитируемой литературе, а обратим внимание на другую сторону проблемы и выясним, как формируются и развиваются корневые структуры и выводящие каналы грязевого вулкана.

Е.А. Рогожин из Института физики Земли РАН в одной из своих лекций «Проявление грязевого вулканизма в зонах интенсивных сотрясений сильнейших землетрясений», прочитанной на геологическом факультете МГУ в 2005 г., показал, что ряд землетрясений с магнитудами $M \geq 7$ продемонстрировали особый тип вторичных сейсмодислокаций на поверхности Земли: разжижения, грифоны, грязевые вулканы. Эти аномальные эффекты были изучены в зонах Нью-Мадридских землетрясений, 1811, 1812 ($M = 8,2-8,3$) в США; Зайсанского землетрясения на Алтае, 1990 ($M = 7,0$); Нефтегорского землетрясения на Северном Сахалине, 1995 ($M = 7,6$); Алтайского землетрясения, 2003 ($M = 7,3$) и в некоторых зонах потенциальных очагов сильнейших землетрясений на Центральном Кавказе. Во всех случаях наиболее универсальным механизмом развития изменений в корневых структурах грязевых вулканов является разномасштабная трансформация геологических структур [5, 7]. Начальную стадию раскрытия трещин в геологической среде грязевулканической постройки и последующие геологические трансформации корневых структур и выводящих каналов связывают с состоянием дилатансии [10].

Отметим, что процессы дилатансии были проанализированы еще в середине XX в. В.Н. Николаевским [10]. Он показал, что дилатансия – это нелинейное разуплотнение геологической среды за счет протекания ряда геолого-геохимических процессов, образования трещин сдвига или каких-либо других трансформаций.

Характеризуя этот процесс, А.С. Алексеев относит к области дилатансии все множество точек упругой или пластичной геологической среды, для которых при заданном поле напряжений $\sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{13}, \sigma_{23}$ в рассматриваемой области выполнено условие (для упругого D полупространства при $z > 0$, которым мы моделируем глинистую толщу в корневых структурах грязевых вулканов).

$$D_{\tau} \equiv \tau - \alpha(P + \rho gz) - Y \geq 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность пород; g – ускорение свободного падения; z – глубина точки приложения силы; P – геостатическое давление $P = -(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$; α – коэффициент внутреннего трения; Y – сцепление породы; τ – интенсивность касательных напряжений

$$\tau = \frac{\sqrt{3}}{2} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2)]^{\frac{1}{2}}.$$

Условие (1) совпадает с критерием Шлейхера – Надаи разрушения материала под действием касательных нагрузок. На примере математической модели дилатантной структуры, развивающейся в изотропно-упругом полупространстве, был показан сложный характер зарождения зон дилатансии. Такие численные эксперименты впервые провели ученики А.С. Алексеева, В.Е. Петренко и А.С. Белоносов (эти данные были любезно предоставлены нам академиком Анатолием Семеновичем Алексеевым). Результаты представлены ниже для случая, когда в некоторой области сплошной геологической среды действует под некоторым углом к свободной поверхности сосредоточенная сила.

Обращаясь к данным численных экспериментов [7, 11], можно заметить, что дилатансия проявляется уже в

случаях, когда источником тектонических напряжений является единичная сосредоточенная сила F (рис. 1).

На рис. 1 изображена граница области $D_t = 0$ для единичной силы. Параметры упругого полупространства здесь были следующие: $v_p = 6000$ м/с; $v_s = v_p / \sqrt{3}$; $\lambda = \mu = \rho v_s^2 = 3,48 \cdot 10^{10}$ Па; $\rho = 2900$ кг/м³; $g = 9,8$ м/с²; $Y = 310$ Па; $\alpha = 0,5$; $F = 5 \cdot 10^{16}$ Н. Внутри области $D_t \geq 0$ касательные напряжения доминируют над сжимающими напряжениями. Сопротивление среды касательным усилиям за счет сцепления здесь преодолено, и сложились условия, благоприятные для роста числа трещин, которые заполняются флюидом.

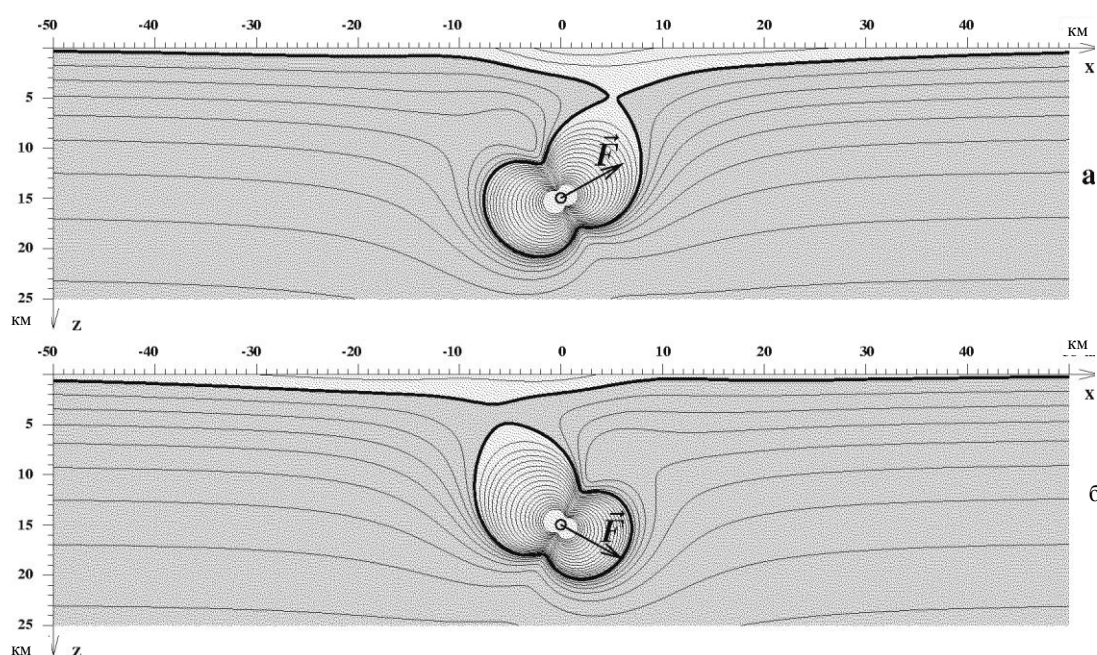


Рис. 1. Формы областей дилатансии на поверхности и вблизи источника в сечении $y = 0$. Источник расположен на глубине $h = 15$ км. Сила $\vec{F} = F \cdot \vec{n}$, $\vec{n} = (\cos(\alpha), 0, \sin(\alpha))$, $F = 5 \cdot 10^{16}$ Н. Расчёт выполнен для двух вариантов направления действия силы: а – $\alpha = -30^\circ$; б – $\alpha = +30^\circ$ [11]. Образовавшийся в первом случае выводящий канал при изменении направления силы в районе расположения очага замкнулся, перекрыв поступление флюидов в район пограничного слоя дилатансии

Интересным фактом оказывается образование двух зон дилатансии: очаговой, в окрестности точки приложения силы, соответствующей очагу грязевого вулкана, и пограничной – в слое около свободной поверхности, где формируется система выводящих каналов, образующаяся в процессе деятельности грязевого вулкана. Такие структуры наблюдались на всех исследованных нами вулканах в Керченско-Таманской грязевулканической провинции. В результате образуются кратерные площадки грязевых вулканов, которые обычно ос-

ложнены многочисленными сальзами и грифонами – миниатюрными подобиями материнской грязевулканической постройки (рис. 2). Они постоянно выделяют воду, жидкую грязь, газовые пузыри и пленки нефти.

Понятие пограничного слоя дилатансии, открытое А.С. Алексеевым, сегодня становится определяющим в проблеме построения модели как грязевого вулкана, так и других сложнопостроенных структур геологической среды, включая и зоны подготовки сейсмических событий [5].



Рис. 2. Вулкан горы Гнилой (Керченско-Таманская грязевулканическая провинция)

В процессе проведения экспедиционных работ в Керченско-Таманской грязевулканической провинции нам удалось впервые зафиксировать на грязевом вулкане Шуго аппаратными методами геофизический процесс, связанный с кратковременным прекращением функционирования (закупоркой) питающей системы вулкана (рис. 3). Объяснение подобных эпизодов в деятельности грязевулканических камер и выводящих каналов следует искать в кратковременном изменении пластового давления в грязевулканическом очаге. В рассматриваемом случае, скорее всего, имела место закупорка основного выводящего канала, соединяющего корневые структуры вулкана с разуплотнением геологической среды в области пограничного слоя дилатансии. Это и привело к прекращению деятельности сразу всех сопков и грифонов вулкана. Затем последовало повышение давления флюидов непосредственно в очаге и, как следствие, в корневых дилатантных структурах, которое изменило строение дилатантных зон в теле вулканической постройки, обеспечившее открытие выводных каналов. Именно флюктуации высокого давления в корневых структурах вулкана Шуго и явились, по нашему мнению, тем пусковым механизмом, который открывал и закрывал пути поступления флюидов в основной питающий канал.

Обнаруженное экспериментально геологическое явление четко отражено на сейсмических записях. В момент прекращения функционирования вулкана наблюдается резкое уменьшение уровня сейсмических шумов, которые снижаются до фонового уровня. Эксперимент свидетельствует в пользу того, что основная причина запираания – быстрая перестройка дилатантных структур, обусловленная протекающими тектоническими процессами в разломных структурах, к которым приурочена вулканическая постройка.

Процесс установления фоновых уровней сейсмических и акустических шумов, свойственных данному периоду развития грязевого вулкана, происходит довольно быстро: в течение 10–12 мин. Скорее всего, за этот промежуток времени в камере и выводящих каналах режим течения грязебрекчии стабилизируется на прежнем уровне, который может быть охарактеризован как своего рода релаксационные автоколебания. Проведенные измерения подтверждают их наличие. Каждая фаза этих колебаний состоит из релаксационных (затухающих) движений, которые в камере и выводящих каналах грязевого вулкана, рассматриваемого как волновод, по характеру ближе к волновым движениям.

Помимо этого, на полученных записях удастся наблюдать четкие низкочастотные волновые формы. Если выражаться образно, то вся разломно-блоковая структура грязевого вулкана напоминает большой природный «орган», через резонансные «трубы» – выводящие каналы разного масштаба – которого прокачиваются флюиды, увлекающие грязебрекчию. В духовых музыкальных инструментах акустические волны, как правило, являются стоячими. Однако в обоих случаях режим автоколебаний существенно связан с особыми свойствами вещества, извергаемого грязевыми вулканами. В «органной трубе» особым свойством обладают вихревые структуры на языке свистка. В волноводе особыми являются свойства самого вещества волновода и структура «стенок» условного волновода. Именно эти свойства превращают имеющие место горизонтальные и вертикальные движения геофизической среды в сложные автоколебания, которые порождают наблюдаемые в эксперименте волновые формы.

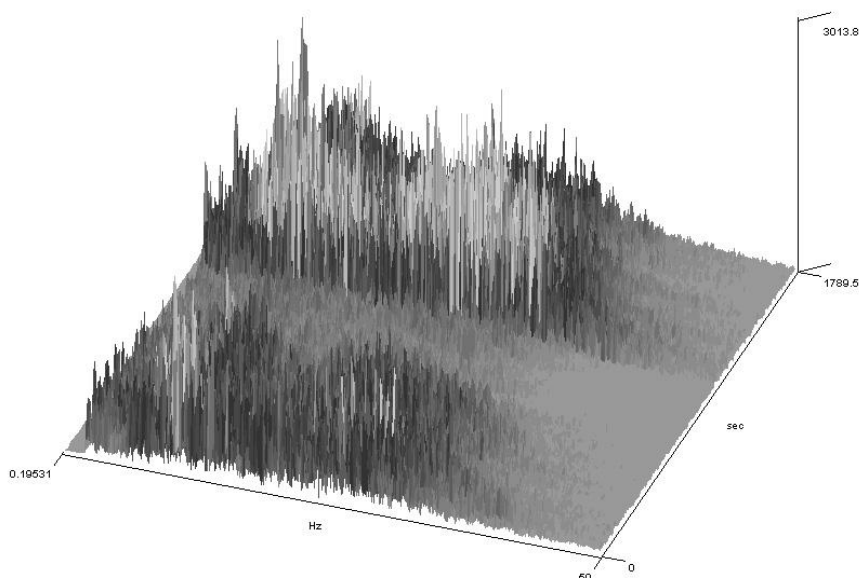


Рис. 3. Изменение спектра в диапазоне 1–30 Гц на этапе вулканического затишья. Резонансный отклик дилатантных структур максимальный в диапазоне 8–12 Гц

Приведенные выше данные позволяют по-новому взглянуть на глубинное строение грязевого вулкана Шуго, полученное нами в результате проведения полевых экспериментов (рис. 4). Здесь отчетливо удается проследить за изменением структуры дилатантных образований в теле вулканической постройки вплоть до глубин 25 км.

Проведенные численные эксперименты и данные натурных наблюдений, полученные на вулканах в Керченско-Таманской грязевулканической провинции, позволили сделать следующие выводы [5, 12, 13]:

1. Когда в районе грязевулканической постройки геофизическая среда имеет «нормальное» строение (жесткость слоев, лежащих выше области корневых структур Ω , возрастает с глубиной), в приповерхностном слое, при интенсивном нагружении, всегда имеет место пограничный слой дилатансии.

2. Когда грязевулканическая постройка характеризуется «аномальным» строением (один из слоев, лежащих выше дилатантной структуры, более жесткий, чем расположенный ниже), характер распределения напряжений и смещений значительно сложнее. При достаточной контрастности жесткостей и толщине более жесткого слоя появляется ситуация частичного или полного экранирования, характеризующая отсутствием в приповерхностных слоях выраженного пограничного слоя дилатансии, вулкан запирается и затихает.

В «мягком» поверхностном слое при такой структуре также наблюдается аналогичный эффект, но он имеет локализованный характер (локализован вблизи границ раздела слоев) и значительно менее выражен, чем в структуре «нормального» строения.

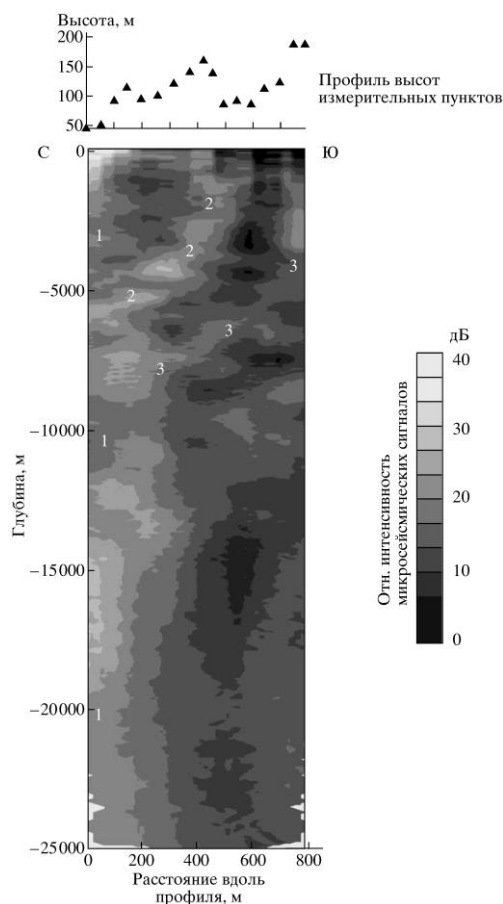


Рис. 4. Разрез по контрастам сейсмических скоростей вдоль профиля, проходящего через грязевой вулкан Шуго. Увеличение относительной интенсивности реакции среды соответствует уменьшению сейсмических скоростей, и наоборот; зоны пониженных скоростей, ассоциируемые с разломами: 1 – Ахтырским; 2 – вулкана Шуго; 3 – Гладковским [14]

При достаточной интенсивности нагружения уровень этих напряжений может достичь критического и привести к появлению достаточно локализованного не пограничного, а заглубленного слоя дилатансии. Следует отметить, что последний имеет существенно меньшую протяженность, чем поверхностный. При наличии внутреннего слоя с меньшей жесткостью, чем выше- и нижележащие, в нем также могут возникать системы усилий, по характеру и интенсивности аналогичные поверхностному пограничному слою дилатансии. Наличие такой ситуации можно связать с появлением промежуточной (приповерхностной) грязевулканической камеры.

Поскольку с зонами дилатансного типа естественно связывать и области вариаций различных геофизических полей [5], то для исследования источников этих вариаций возможно использование современных аппаратных методов в процессе проведения полевых экспериментов непосредственно на грязевых вулканах.

Литература

1. Войтов Г.И., Микадзе Э.И., Пузич И.Н. О генерации органических структур нефтяного ряда в свете механо-химической модели синтеза в сейсмических процессах // *Геохимия*. 2005. № 6. С. 661–672.
2. Глинский Б.М., Собисевич А.Л., Хайретдинов М.С. Опыт активного мониторинга сложно построенных геологических структур (на примере грязевого вулкана Шуго) // Докл. РАН (Науки о Земле). 2007. Т. 413, № 3. С. 398–402.
3. Глинский Б.М., Собисевич А.Л., Фатьянов А.Г., Хайретдинов М.С. Математическое моделирование и экспериментальные исследования грязевого вулкана Шуго // *Вулканология и сейсмология*. 2008. Т. 2, № 5. С. 69–77.
4. Руденко О.В., Собисевич А.Л., Ратнер С.В. Модель непрерывного истечения газосодержащей жидкости из полости через канал // *Вестн. Южн. науч. центра РАН*. 2009. Т. 5, № 2. С. 5–10.
5. Собисевич А.Л. Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. М., 2012. 510 с.
6. Lupi M., Saenger E., Fuchs F., Miller S. Lusi mud eruption triggered by geometric focusing of seismic waves // *Nat. Geosci.* 2013. Vol. 6(8). P. 642–646.
7. Собисевич А.Л. Мониторинг слоистых неоднородных сред. М., 2001. 354 с.
8. Холодов В.Н. О роли песчаного диапиризма в трактовке грязевых вулканов // *Литология и полезные ископаемые*. 1987. № 4. С. 12–27.
9. Шнюков Е.Ф., Соболевский Ю.В., Гнатенко Г.И., Науменко П.И., Кутний В.А. Грязевые вулканы Керченско-Таманской области: атлас. Киев, 1986. 152 с.
10. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика (с приложениями к проблемам газовых и нефтяных пластов). М., 1996. 448 с.
11. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Ковалевский В.В., Маништейн А.К., Селезнев В.С., Сердюков С.В., Соловьев В.М., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Хайретдинов М.С., Чичинин И.С., Юшин В.И. Новые геотехнологии и комплексные геофизические методы изучения внутренней структуры и динамики геосфер. М., 2002. 475 с.
12. Ляпин А.А., Собисевич А.Л. Об особенностях формирования пограничного слоя дилатансии в многослойном полупространстве с заглубленной полостью // Докл. РАН. 2000. Т. 372, № 2. С. 243–247.
13. Лаверов Н.П., Добрецов Н.Л., Богатилов О.А., Бондур В.Г., Гурбанов А.Г., Карамурзов Б.С., Коваленко В.И., Мелекесцев И.В., Нечаев Ю.В., Пономарёва В.В., Рогожин Е.А., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Федотов С.А., Хренов А.П., Ярмолюк В.В. Новейший и современный вулканизм на территории России / отв ред. Н.П. Лаверов. М., 2005. 450 с.
14. Горбатиков А.В., Собисевич А.Л., Овсяченко А.Н. Развитие модели глубинного строения Ахтырской флексуно-разрывной зоны и грязевого вулкана Шуго // Докл. РАН (Геофизика). 2008. Т. 421, № 5. С. 670–674.

References

1. Voitov G.I., Mikadze E.I., Puzich I.N. O generatsii organicheskikh struktur neftyanogo ryada v svete mekhanokhimi-cheskoi modeli sinteza v seismicheskikh protsessakh [Generation of organic structures in light of a number of oil mechano-chemical synthesis model in seismic processes]. *Geokhimiya*, 2005, no 6, pp. 661–672.
2. Glinskii B.M., Sobisevich A.L., Khairtdinov M.S. Opyt aktivnogo monitoringa slozhno postroennykh geologicheskikh struktur (na primere gryazevogo vulkana Shugo) [Experience of active monitoring difficult geological structures constructed (for example, a mud volcano Shugo)]. *Dokl. RAN (Nauki o Zemle)*, 2007, vol. 413, no 3, pp. 398–402.
3. Glinskii B.M., Sobisevich A.L., Fat'yanov A.G., Khairtdinov M.S. Matematicheskoe modelirovanie i eksperimental'nye issledovaniya gryazevogo vulkana Shugo [Mathematical modeling and experimental studies of the mud volcano Shugo]. *Vulkanologiya i seismologiya*, 2008, vol. 2, no 5, pp. 69–77.
4. Rudenko O.V., Sobisevich A.L., Ratner S.V. Model' nepre-ryvnogo istecheniya gazosoderzhashchei zhidkosti iz polos-ti cherez kanal [Model of continuous expiration of the gas-containing fluid from the cavity through the channel]. *Vest-nik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN*, 2009, vol. 5, no 2, pp. 5–10.
5. Sobisevich A.L. *Izbrannye zadachi matematicheskoi geofiziki, vulkanologii i geoekologii* [Selected problems of mathematical geophysics, volcanology and geoecology]. Moscow, 2012, 510 p.
6. Lupi M., Saenger E. H., Fuchs F., Miller S. A. Lusi mud eruption triggered by geometric focusing of seismic waves. *Nat. Geosci.*, 2013, vol. 6(8), pp. 642–646.
7. Sobisevich A.L. *Monitoring sloistykh neodnorodnykh sred* [Monitoring layered inhomogeneous media]. Moscow, 2001, 354 p.
8. Kholodov V.N. O roli peschanogo diapirizma v traktovke genezisa gryazevykh vulkanov [On the role of sandy diapirism in the interpretation of the genesis of mud volcanoes]. *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 1987, no 4, pp. 12–27.
9. Shnyukov E.F., Sobolevskii Yu.V., Gnatenko G.I., Nau-menko P.I., Kutnii V.A. *Gryazevye vulkany Kerchensko-Tamanskoi oblasti* [Mud volcanoes of the Kerch-Taman Region]: atlas. Kiev, 1986, 152 p.

10. Nikolaevskii V.N. *Geomekhanika i flyuidodinamika (s prilozheniyami k problemam gazovykh i neftyanykh plastov)* [Geomechanics and fluid dynamics (with applications to the problems of oil and gas reservoirs)]. Moscow, 1996, 448 p.
11. Alekseev A.S., Glinskii B.M., Emanov A.F., Kashun V.N., Kovalevskii V.V., Manshtein A.K., Seleznev V.S., Serdyukov S.V., Solov'ev V.M., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Khairtudinov M.S., Chichinin I.S., Yushin V.I. *Novye geotekhnologii i kompleksnye geofizicheskie metody izucheniya vnutrennei struktury i dinamiki geosfer* [New geotechnology and integrated geophysical methods for studying the internal structure and dynamics of geosphere]. Moscow, 2002, 475 p.
12. Lyapin A.A., Sobisevich A.L. Ob osobennostyakh formirovaniya pogrannichnogo sloya dilatatsii v mnogosloinnoy poluprosranstve s zaglublennoy polost'yu [On peculiarities of the formation of the boundary layer in a multi-dilatancy half a recessed cavity]. *Dokl. RAN*, 2000, vol. 372, no 2, pp. 243-247.
13. Laverov I.P., Dobretsov N.L., Bogatkov O.A., Bondur V.G., Gurbanov A.G., Karamurзов B.S., Kovalenko V.I., Melekestsev I.V., Nechaev Yu.V., Ponomareva V.V., Rogozhin E.A., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Fedotov S.A., Khrenov A.P., Yarmolyuk V.V. *Noveishii i sovremenniy vulkanizm na territorii Rossii* [The newest and modern volcanism in Russia]. Ed. N.P. Laverov. Moscow, 2005, 450 p.
14. Gorbatikov A.V., Sobisevich A.L., Ovsyuchenko A.N. Razvitiye modeli glubinnogo stroeniya Akhtyrskoi fleksurno-razryvnoi zony i gryazevogo vulkana Shugo [Development of a model of deep structure Akhtyr flexure-tensile zone and mud volcano Shugo]. *Dokl. RAN (Geofizika)*, 2008, vol. 421, no 5, pp. 670-674.

Поступила в редакцию

24 марта 2015 г.

УДК 539.3

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-60-64

КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ТРЕХСЛОЙНОГО СФЕРИЧЕСКОГО ШАРНИРА*

© 2015 г. М.И. Чебаков, М.В. Абрамович, Е.М. Колосова

Чебаков Михаил Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией механики деформируемых тел и конструкций, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета, пр. Стачки, 200/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: chebakov@math.sfedu.ru

Абрамович Михаил Валерьевич – аспирант, лаборатория механики деформируемых тел и конструкций, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета, пр. Стачки, 200/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: MAbramovich@sfedu.ru

Колосова Елена Михайловна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория механики деформируемых тел и конструкций, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета, пр. Стачки, 200/1, г. Ростов-на-Дону, 344090, e-mail: a_lena_ch@mail.ru

Chebakov Mikhail Ivanovich – Doctor of Physical and Mathematical Science, Professor, Head of the Laboratory of Solid Mechanics and Structures, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences of the Southern Federal University, Stachki St., 200/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: chebakov@math.sfedu.ru

Abramovich Mikhail Valerievich – Post-Graduate Student, Laboratory of Solid Mechanics and Structures, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences of the Southern Federal University, Stachki St., 200/1, Rostov-on-Don, Russia, 344090, e-mail: MAbramovich@sfedu.ru

Kolosova Elena Mikhailovna – Candidate of Physical and Mathematical Science, Leading Researcher, Laboratory of Solid Mechanics and Structures, Vorovich Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Sciences of the Southern Federal University, Stachki St., 200/1, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: a_lena_ch@mail.ru

Рассмотрена контактная задача о взаимодействии абсолютно жесткого шара (штампа) с внутренней поверхностью трехслойного сферического основания. Предполагается, что внешняя поверхность сферического основания закреплена, слои имеют различные упругие постоянные и между собой жестко соединены. Задача сведена к решению интегрального уравнения (ИУ) первого рода, трансформанта ядра которого построена в явном аналитическом виде. Решение ИУ построено с помощью методов: асимптотического, прямых коллокаций и конечных элементов. Проведен расчет распределения контактных напряжений, размеров области контакта и перемещения штампа. Проведено сравнение результатов расчетов, полученных этими методами.

Ключевые слова: контактное взаимодействие, теория упругости, трехслойное сферическое основание, асимптотический метод, метод коллокаций, метод конечных элементов.

We consider the contact problem of the interaction of a rigid sphere (stamp) on the inside surface of a three-layer spherical base. It is assumed that the outer surface of the spherical base is fixed, the layers have different elastic constants and are rigidly interconnected to each other. For this problem with the help a program of analytical calculations, an exact integral equation (IE) of the first kind with a kernel is obtained in explicit analytic form. The solution of IE is obtained by using the asymptotic method, the direct method of collocation and finite element method. Distribution of contact stresses, the size of the contact area, the relationship of the movement stamp are calculated with the help of the proposed methods. A comparison of results of calculations by these methods is presented.

Keywords: contact interaction, theory of elasticity, three-layer spherical base, asymptotic method, collocation method, finite element method.

Постановка контактной задачи теории упругости для тройного сферического слоя

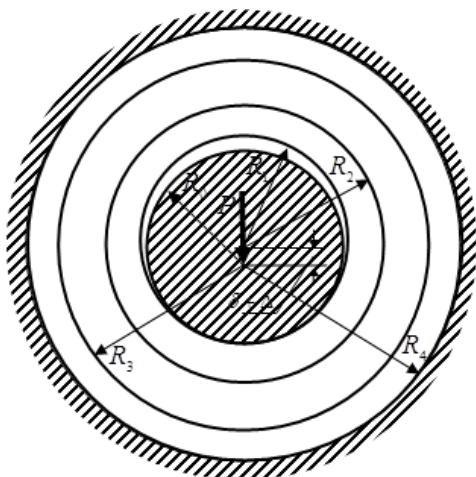
В [1, 2] исследована аналогичная задача для однослойного и двухслойного сферических оснований. Для шаровой полости задача рассмотрена в [3], где получено замкнутое решение.

В сферических координатах (r, θ, φ) рассмотрим три сферических слоя $R_1 \leq r \leq R_2$ (слой 1),

$R_2 \leq r \leq R_3$ (слой 2), $R_3 \leq r \leq R_4$ (слой 3) с различными упругими постоянными; G_i – модуль сдвига; ν_i – коэффициент Пуассона (i – номер слоя). Слои жестко соединены по сферической поверхности $r = R_2$ и $r = R_3$. Пусть поверхность $r = R_4$ неподвижна, а в $r = R_1$ вдавливается силой P штамп в форме шара радиуса $R_0 = R_1 - \Delta$ с точкой первоначального касания $r = R_1$, $\varphi = 0$. На рисунке изо-

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 213.01-11 / 2014-28) и гранта РФФИ № 14-08-31663 мол_а.

бражено сечение сферического слоя плоскостью, проходящей через его центр и точку первоначального касания шара (штампа) и слоя. Предполагаем, что трение между штампом и сферическим слоем отсутствует, сила P направлена вдоль прямой $\varphi = 0$, а величина Δ мала.



В этом случае приходим к решению осесимметричной краевой задачи для уравнений Ляме в сферических координатах с граничными условиями:

$$u_r^{(1)} = (\delta + \Delta) \cos \varphi - \Delta, \quad \tau_{r\varphi}^{(1)} = 0 \quad (r = R_1, \quad |\varphi| \leq \gamma),$$

$$\sigma_r^{(1)} = 0, \quad \tau_{r,\varphi}^{(1)} = 0 \quad (r = R_1, \quad |\varphi| > \gamma),$$

$$u_r^{(2)} = u_\varphi^{(2)} = 0 \quad (r = R_4),$$

$$u_r^{(i)} = u_r^{(i+1)}, \quad u_\varphi^{(i)} = u_\varphi^{(i+1)}, \quad \tau_{r,\varphi}^{(i)} = \tau_{r,\varphi}^{(i+1)}, \quad \sigma_r^{(i)} = \sigma_r^{(i+1)}$$

$$(r = R_2 \text{ и } r = R_3, \quad i = 1, 2),$$

где δ – смещение штампа; u_r^i – перемещение вдоль оси r ; $\sigma_r^i, \tau_{r\varphi}^i$ – компоненты тензора напряжений ($i = 1, 2, 3$); $|\varphi| \leq \gamma$ – область контакта.

Решение задачи может быть сведено [2] к исследованию парного ряда – уравнения

$$\sum_{k=0}^{\infty} a_k K(\alpha_k) P_k(\cos \varphi) = f(\varphi) \quad (0 \leq \varphi \leq \gamma),$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} a_k P_k(\cos \varphi) = 0 \quad (\gamma < \varphi < \pi), \quad (1)$$

$$f(\varphi) = \frac{G_1}{R_1(1-\nu_1)} ((\delta + \Delta) \cos \varphi - \Delta), \quad \alpha_k = k + \frac{1}{2},$$

где $P_k(\cos \varphi)$ – полиномы Лежандра.

Неизвестные контактные напряжения под штампом $\sigma_r(R_1, \varphi) = q(\varphi)$ определяются через решение парного ряда – уравнения (1) из соотношения

$$q(\varphi) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k P_k(\cos \varphi).$$

В парном уравнении (1) функция $K(u)$ получена с использованием программы аналитических вычислений MAPLE; она имеет довольно громоздкую структуру, и поэтому не представляется возможным полностью привести ее здесь, но основные ее свойства изучены, например, $K(u)$ представима в виде

$$K(u) = K_1(u)/K_2(u),$$

$$K_i(u) = G_{31}^2 \eta_{02}^i(u) + G_{21} G_{31} \eta_{11}^i(u) + G_{21}^2 \eta_{20}^i(u) + G_{21}^2 G_{31} \eta_{22}^i(u) + G_{21}^3 \eta_{30}^i(u) + G_{21}^2 G_{31} \eta_{21}^i(u) + G_{21}^4 \eta_{40}^i(u),$$

где $G_{i1} = G_i/G_1$ ($i = 2, 3$), а найденные функции $\eta_{ij}^l(u)$ ($l = 1, 2$) содержат степенные и экспоненциальные функции, зависят только от коэффициентов Пуассона материала слоев и отношения радиусов $r_j = R_j/R_1$ ($j = 2, 3, 4$).

$$K(u) = 1/u + O(1/u^2) \quad (u \rightarrow \infty), \quad K(0) = A = A_1/A_2.$$

Здесь величины A_i также имеют громоздкий вид и представимы как

$$A_i = G_{31}^2 \kappa_{02}^i + G_{21} G_{31} \kappa_{11}^i + G_{21}^2 \kappa_{20}^i + G_{21}^2 G_{31} \kappa_{22}^i + G_{21}^3 \kappa_{30}^i + G_{21}^2 G_{31} \kappa_{21}^i + G_{21}^4 \kappa_{40}^i,$$

где κ_{ij}^l имеют ту же структуру, что и $\eta_{ij}^l(u)$.

Парное уравнение (1) эквивалентно интегральному уравнению (ИУ) [1]

$$\int_0^\gamma q(\psi) k(\psi, \varphi) d\psi = f(\varphi), \quad (0 \leq \varphi \leq \gamma) \quad (2)$$

с ядром

$$k(\psi, \varphi) = \sin \psi \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_k K(\alpha_k) P_k(\cos \psi) P_k(\cos \varphi),$$

которое можно представить в виде двух слагаемых

$$k(\psi, \varphi) = k_0(\psi, \varphi) + k_1(\psi, \varphi),$$

где

$$k_0(\psi, \varphi) = \sin \psi \sum_{k=0}^{\infty} P_k(\cos \psi) P_k(\cos \varphi), \quad (3)$$

$$k_1(\psi, \varphi) = \sin \psi \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_k L(\alpha_k) P_k(\cos \psi) P_k(\cos \varphi). \quad (4)$$

Здесь $L(u) = K(u) - 1/u$.

Ряд (4) сходится при любых значениях параметров, а ряд (3) может быть просуммирован

$$k_0(\psi, \varphi) = \frac{\sqrt{2} \sin \psi}{\pi \sqrt{1 - \cos(\psi + \varphi)}} \mathbf{K} \left(\sqrt{\frac{2 \sin \psi \sin \varphi}{1 - \cos(\psi + \varphi)}} \right), \quad (5)$$

где $\mathbf{K}$ – полный эллиптический интеграл.

На основе свойства эллиптического интеграла [4] можно показать, что

$$k_0(\psi, \varphi) = -\frac{1}{\pi} \ln |\psi - \varphi| + O(1) \quad (\psi \rightarrow \varphi).$$

Решение парного ряда – уравнения (1). Асимптотический метод

В реальных конструкциях, например в самосмазывающихся подшипниках скольжения, толщина слоев мала по сравнению с их радиусом, поэтому относительные радиусы r_2 , r_3 и r_4 близки к единице. В этом случае, как показывают расчеты, A является малой величиной ($A < 0,5$), и поэтому решение парного ряда – уравнения (1) при малых A может быть получено на основе асимптотического метода, изложенного в [1, 2]. Не останавливаясь подробно на изложении этого подхода, заметим, что окончательные выражения для определения распределения контактных напряжений $q(\varphi)$, перемещения штампа δ и области контакта γ при заданном значении действующей силы P и других параметров приведены в [2, формулы (2.2)–(2.6)]. Отметим только, что идея метода основана на сведении парных рядов – уравнений к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений первого рода с сингулярной матрицей и получении ее асимптотического решения при малых A после аппроксимации функции $K(u)$ функцией $K^*(u) = u^{-1} \ln Au$.

Решение ИУ (2). Метод коллокаций

Для решения ИУ (5) используем прямой метод коллокаций [2], который не требует аппроксимации функции $K(u)$, для чего ИУ (2) дискретизируем по схеме [2] с учетом логарифмической особенности его ядра при $\psi \rightarrow \varphi$. Получим систему

$$\varepsilon \sum_{i=1, i \neq j}^N q_i (a_{ji}^0 + a_{ji}^1) - \frac{\varepsilon}{\pi} \left(\ln \frac{\varepsilon}{2} - 1 \right) q_j = f(\varphi_j),$$

$$a_{ji}^0 = k_0(\psi_i, \varphi_j), \quad a_{ji}^1 = k_1(\psi_i, \varphi_j), \quad (6)$$

где $q_i = q(\varphi_i)/G_1$, $\varepsilon = \gamma/N$ – интервал коллокации; $\psi_i = \varepsilon/2 + \varepsilon(i-1)$ и $\varphi_j = \varepsilon/2 + \varepsilon(j-1)$ – узлы коллокации.

Таким образом, задача сведена к конечной системе линейных алгебраических уравнений, решение которой можно получить стандартными методами, при этом коэффициенты a_{ji}^0 и a_{ji}^1 системы могут быть вычислены с высокой точностью, имея в виду, что ряд сходится, а функция $L(u)$ имеет явное аналитическое выражение через элементарные функции.

Метод конечных элементов

Поставленная задача также исследовалась методом конечных элементов с использованием пакета

ANSYS. Не останавливаясь подробно на изложении метода применительно к поставленной осесимметричной контактной задаче для трехслойного сферического основания, приведем ниже некоторые результаты для сравнения с теми, которые получены асимптотическим методом и методом коллокаций. Отметим, что при расчетах методом конечных элементов модуль сдвига шара полагался в 1000 раз больше, чем G_1 .

Числовые расчеты

На основе асимптотического метода проведен расчет угла области контакта γ , град., перемещения штампа δ и контактных напряжений $q(\varphi)$ в точках $\varphi_n = \gamma n/5$ ($n=0-4$) и параметра A при некоторых значениях исходных параметров G_{11} , $P^* = P/G_1$, Δ , r_2 , r_3 и r_4 . Результаты расчетов при $P^* = 0,001$, $\Delta = 0,0001$, $r_2 = 1,1$, $R_1 = 1$, $v_1 = 0,3$, $v_2 = 0,3$ и $v_3 = 0,3$ приведены в табл. 1, в которой $q_n = q(\varphi_n) \cdot 10^3 / G_1$.

Следует отметить, что в аналогичной задаче для двухслойного основания функция $K(u)$ имеет значительно менее громоздкую структуру и более проста для вычисления. Поэтому для контроля точности проведено сравнение результата расчетов, проведенных на основе функции $K(u)$ для двухслойного основания и аналогичного двухслойного основания на основе формул для трехслойного основания при соответствующих геометрических и механических параметрах.

В нечетных строках табл. 1 приведены результаты расчетов для двухслойного сферического основания $R_1 \leq r \leq R_3$ при $r_3 = 1,2$ и различных G_{21} , полученных на основе работы [2], а в четных строках – на основе формул для трехслойного сферического основания в случае $G_{21} = G_{31}$, $r_3 = 1,15$ и $r_4 = 1,2$. Относительные радиусы r_3 и r_4 подобраны так, что из трехслойного сферического основания получаем соответствующее двухслойное. Приведенные в табл. 1 результаты показывают хорошее совпадение.

При проведении расчетов по схеме метода коллокаций в качестве исходных параметров более естественным является задание вместо приложенной силы P перемещения штампа δ с последующим нахождением приложенной силы P . В то же время метод коллокаций позволяет при заданной величине силы P путем ряда итераций подобрать соответствующее перемещение δ .

Таблица 1

№ п.п.	G_{21}	G_{31}	$\delta \cdot 10^4$	γ	q_0	q_1	q_2	q_3	q_4	$A \cdot 10^3$
1	0,2	–	1,06	56,0	0,752	0,725	0,645	0,515	0,338	0,215
2	0,2	0,2	1,04	55,7	0,749	0,720	0,638	0,509	0,332	0,212
3	0,5	–	0,700	51,2	0,898	0,889	0,762	0,596	0,370	0,114
4	0,5	0,5	0,697	50,9	0,887	0,885	0,759	0,591	0,367	0,112
5	2,0	–	0,462	45,4	1,13	1,08	0,950	0,734	0,438	0,0589
6	2,0	2,0	0,458	45,2	1,09	1,03	0,943	0,728	0,434	0,0580
7	5,0	–	0,405	43,4	1,22	1,17	1,03	0,792	0,468	0,0476
8	5,0	5,0	0,403	43,3	1,21	1,16	1,02	0,790	0,468	0,0470

В рассматриваемой задаче область контакта γ нелинейным образом зависит от задаваемого смещения штампа δ , она заранее неизвестна, и поэтому эта величина при использовании метода коллокаций находилась итерационным способом по следующей схеме: на первом этапе, полагая область контакта фиксированной, на основе пробных расчетов путем решения системы (6) подбиралась величина γ таким образом, чтобы на границе области контакта контактные напряжения имели меньшее по модулю значение, чем во внутренних точках этой области. Далее процесс нахождения γ автоматизировался таким образом, что если при заданной величине γ напряжения на границе имели знак, противоположный знаку напряжений в первоначальной точке контакта, то для следующей итерации величина γ уменьшалась на малую заданную величину $\Delta\gamma$, а если напряжения на границе имели тот же знак, что и в точке первоначального касания, то величина γ увеличивалась на малую величину $\Delta\gamma$. Затем производился перерасчет контактных напряжений и процесс итераций проводился до тех пор, пока

относительная величина $q_* = |q(\varphi_N)/q(\varphi_1)|$ контактных напряжений на границе не достигала наперед заданного минимума. Заметим, что при очередной итерации величина шага $\Delta\gamma$ уменьшалась в два раза. Первоначальная величина $\Delta\gamma$, как и γ , подбиралась вручную.

Точность получаемых численных результатов контролировалась путем увеличения числа уравнений в системе (6).

Следует отметить, что с увеличением параметров G_{21}, G_{31} требуется меньшее число уравнений в системе (6) для получения результата с заданной точностью. Также следует отметить, что в окрестности точки первоначального касания примерно при $r < \gamma/20$ и $N=1000$ метод коллокаций дает несколько заниженный результат для величины контактных напряжений.

В табл. 2, как и в табл. 1, на основе метода коллокаций приведено сравнение результатов расчетов, полученных по формулам двухслойного основания (нечетные строки) и трехслойного основания при $N=1000$ и таких же значениях Δ , относительных радиусов r_2, r_3 и r_4 .

Таблица 2

№	G_{21}	G_{31}	$\delta \cdot 10^4$	γ	q_1	q_2	q_3	q_4	$P^* \cdot 10^3$
1	0,5	–	0,700	52,0	0,842	0,738	0,569	0,344	0,979
2	0,5	0,5	0,700	50,9	0,836	0,711	0,549	0,333	0,938
4	2,0	–	0,462	45,7	1,06	0,931	0,715	0,423	0,985
5	2,0	2,0	0,462	43,8	0,997	0,918	0,703	0,418	0,966
6	5,0	–	0,405	43,6	1,15	1,01	0,774	0,456	0,981
7	5,0	5,0	0,405	42,4	1,09	0,988	0,767	0,442	0,969

Как видно из табл. 2, результаты, приведенные в ней, хорошо согласуются, если механические характеристики третьего слоя положить равными второму. Также они хорошо согласуются с результатами, приведенными в табл. 1.

В табл. 3, 4 приведены сравнительные результаты расчетов приложенной к штампу силы P , перемещения δ , контактных напряжений q_n и

величины области контакта γ , полученные на основе метода коллокаций, асимптотического метода и метода конечных элементов для некоторых заданных значений параметра G_{31} , $\Delta=0,0001$; $r_2=1,1$; $r_3=1,15$; $r_4=1,2$; $R_1=1$ и соответственно при $G_{21}=0,5$ (табл. 3), $G_{21}=2,0$ (табл. 4).

Таблица 3

№	G_{31}	$\delta \cdot 10^4$	γ	q_1	q_2	q_3	q_4	$P^* \cdot 10^3$
1	0,5	0,700	50,9	0,836	0,711	0,549	0,333	0,938
2	0,5	0,685	50,3	0,839	0,722	0,559	0,346	0,938
3	0,5	0,702	51,0	0,847	0,724	0,564	0,354	0,938
4	1,0	0,700	49,5	0,862	0,735	0,569	0,347	0,986
5	1,0	0,689	49,4	0,866	0,740	0,582	0,355	0,986
6	1,0	0,705	49,7	0,875	0,749	0,603	0,365	0,986
7	2,0	0,700	46,7	0,889	0,759	0,590	0,362	1,03
8	2,0	0,695	46,4	0,919	0,765	0,601	0,369	1,03
9	2,0	0,713	47,0	0,934	0,771	0,614	0,369	1,03
10	3,0	0,700	45,6	0,917	0,784	0,607	0,376	1,08
11	3,0	0,703	46,2	0,935	0,803	0,625	0,391	1,07
12	3,0	0,723	46,5	0,938	0,814	0,29	0,399	1,08
13	4,0	0,700	43,4	0,945	0,808	0,630	0,391	1,13
14	4,0	0,701	43,9	0,970	0,827	0,648	0,412	1,13
15	4,0	0,715	44,0	0,977	0,836	0,660	0,425	1,13

Таблица 4

№	G_{31}	$\delta \cdot 10^4$	γ	q_1	q_2	q_3	q_4	$P^* \cdot 10^3$
1	0,5	0,462	59,7	0,847	0,780	0,598	0,356	0,821
2	0,5	0,449	59,9	0,851	0,792	0,603	0,355	0,821
3	0,5	0,516	60,0	0,847	0,788	0,607	0,349	0,820
4	1,0	0,462	51,2	0,927	0,853	0,653	0,388	0,898
5	1,0	0,460	51,8	0,932	0,860	0,662	0,395	0,898
6	1,0	0,495	51,9	0,930	0,865	0,670	0,402	0,900
7	2,0	0,462	43,8	0,997	0,918	0,703	0,418	0,966
8	2,0	0,455	44,8	1,01	0,935	0,722	0,429	0,966
9	2,0	0,501	45,0	0,999	0,927	0,725	0,422	0,966
10	3,0	0,462	39,7	1,08	0,998	0,766	0,456	1,05
11	3,0	0,465	40,2	1,12	1,01	0,782	0,462	1,05
12	3,0	0,498	40,3	1,09	1,02	0,785	0,460	1,05
13	4,0	0,462	35,5	1,19	1,092	0,837	0,497	1,14
14	4,0	0,473	36,0	1,23	1,12	0,845	0,501	1,15
15	4,0	0,505	36,4	1,27	1,14	0,854	0,512	1,15

В строках таблиц с номерами $1+3i$, $2+3i$ и $3+3i$ ($i=0, 1, 2, 3, 4$) приведены результаты, полученные методом коллокаций, асимптотическим и методом конечных элементов. Как видно из таблиц, результаты хорошо согласуются между собой.

Литература

1. Александров В.М., Чебаков М.И. Аналитические методы в контактных задачах теории упругости. М., 2004. 304 с.
2. Колосова Е.М., Чебаков М.И. К теории расчета двухслойного цилиндрического подшипника // ПММ. 2010. Т. 72, вып. 10. С. 945–952.
3. Карпенко В.А. О замкнутом решении первой краевой задачи теории упругости для пространства с шаровой полостью // ПММ. 1975. Т. 39, № 5. С. 951–955.
4. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М., 1971. 1108 с.

References

1. Aleksandrov V.M., Chebakov M.I. *Analiticheskie metody v kontaktnykh zadachakh teorii uprugosti* [The analytical methods in contact problems of the theory of elasticity]. Moscow, 2004, 304 p.
2. Kolosova E.M., Chebakov M.I. K teorii rascheta dvukhsloinogo tsilindricheskogo podshipnika [The theory of calculating the two-layered cylindrical bearing]. *PMM*, 2010, vol. 72, no 10, pp. 945-952.
3. Karpenko V.A. O zamknutom reshenii pervoi kraevoi zadachi teorii uprugosti dlya prostranstva s sharovoi polost'yu [About closed the first boundary value problem of elasticity for a space with a spherical cavity]. *PMM*, 1975, vol. 39, no 5, pp. 951-955.
4. Gradshteyn I.S., Ryzhik I.M. *Tablitsy integralov, summ, ryadov i proizvedenii* [Tables of integrals, sums, series and products]. Moscow, 1971, 1108 p.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 631.4

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-65-68

БОРЬБА С ОПУСТЫНИВАНИЕМ ЗЕМЕЛЬ АРИДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ
МЕТОДОМ АЭРАЦИИ ПОЧВ

© 2015 г. Э.М.-Р. Мирзоев, И.А. Магомедов

Мирзоев Энвер Магомед-Расулович – ведущий научный сотрудник, лаборатория почвенных и растительных ресурсов, Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского научного центра РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, 367000, e-mail: pibrdncran@mail.ru

Магомедов Иса Абулкасумович – научный сотрудник, лаборатория почвенных и растительных ресурсов, Прикаспийский институт биологических ресурсов Дагестанского научного центра РАН, ул. М. Гаджиева, 45, г. Махачкала, 367000, e-mail: pibrdncran@mail.ru

Mirzoev Enver Magomed-Rasulovich – Leading Researcher, Laboratory of Soil and Vegetable Resource, Caspian Institute of Biological Resource of the Dagestan Scientific Centre RAS, M. Gadzhiev St., 45, Makhachkala, 367000, Russia, e-mail: pibrdncran@mail.ru

Magomedov Isa Abulkasumovich – Researcher, Laboratory of Soil Resource and Vegetable Resource, Caspian Institute of Biological Resource of the Dagestan Scientific Centre RAS, M. Gadzhiev St., 45, Makhachkala, 367000, Russia, e-mail: pibrdncran@mail.ru

Разработан и исследован метод аэрации почв для конденсации парообразной влаги атмосферы в почве, направленной на борьбу с опустыниванием земель аридных территорий. Метод аэрации почв основан на создании под почвой множества кротовин и макро-, мезо-, микро- и нанотрещин. Циркуляция воздуха в кротовинах и трещинах приводит к конденсации парообразной влаги атмосферы из-за разности температурного режима в системе «почва – атмосфера». Объем конденсации в аэрированных почвах составляет более 23 мм/га ежедневно в летний жаркий период года. Аэрация почв увеличивает биологическое разнообразие подверженных опустыниванию земель аридных территорий, повышает продуктивность и плодородие почв.

Ключевые слова: почва, аэрация, конденсация, парообразная влага, опустынивание, аридная территория, борьба.

The method of airing of soils is worked out and investigational for condensation of vaporous moisture of atmosphere in the soil sent to the fight against the desertification of earth of arid territories. Method of airing of soils based on creation under soil of great number of mole-hill and great number of macro(s)-, meso(s)-, micro(s)- and nan(nos)cracks. Circulation of air in mole-hills and cracks results in condensation of vaporous moisture of atmosphere from the difference of temperature condition in the system «soil-atmosphere». The volume of condensation in the aerated soils makes a more than 23 mm/ha every day in a summer hot period of year. Airing of soils increases a biological variety subject to the desertification of earth of arid territories, promotes the productivity and fertility of soils.

Keywords: soil, airing, condensation, vaporous moisture, desertification, arid territory, fight.

Масштабы деградации почв и опустынивания земель приобрели глобальный характер, в связи с чем, по Конвенции ООН, эта проблема признана не только социальной, но и имеющей политические и технологические аспекты. По данным исполнительного секретаря ЮНСЕД [1], от деградации почв и опустынивания земель страдают более 900 млн человек в 110 странах мира.

Многовековое воздействие человека на экосистемы аридных территорий, занимающих около 1/3 площади земной поверхности, вызвало возникновение и мощный рост деградации и опустынивание земель, которое приобрело в настоящее время глобальный характер.

Практически вся территория Юга России более (27 млн га) расположена в аридной зоне и является ареной интенсивной деградации и опустынивания земель. Это – Нижнее Поволжье, Черные земли, Кизлярские пастбища и др.

В аридных регионах опустынивание развивается в трех направлениях: формирование пустынь материкового происхождения в экстрааридных условиях с коэффициентом увлажнения $K=0,05$; деградация наземных экосистем (физическая, биогенная, техногенная) в аридных климатических условиях с коэффициентом увлажнения $K = 0,2...0,5$; в субгумидных – $K = 0,51...0,65$; колебание продуктивности растительного покрова в зависимости от коле-

баний количества осадков и температурного режима [2].

Известно, что основная причина низкой продуктивности почв аридных экосистем полупустыни и пустыни – дефицит атмосферного увлажнения и недостаток влаги в почвенном профиле. В то же время первоисточником пресной воды служит водяной пар атмосферы. В системе «почва – атмосфера» происходит регулярный суточный влагообмен. Парадоксально, но факт, что самый крупный источник – вода атмосферы – почти не используется.

В атмосфере в виде пара содержится 14 тыс. км³, а во всех речных руслах – всего 1,2 тыс. км³ влаги.

С поверхности суши и океана ежегодно испаряется 577 тыс. км³ воды, столько же потом выпадает в виде осадков. Атмосферная вода в течение года обновляется 45 раз [3]. У земной поверхности глобально средняя абсолютная влажность составляет 11 г/м³, а в тропических регионах она доходит до 25 г/м³ и выше. В пустынях Аравийского полуострова и в Сахаре над каждым квадратом поверхности со стороны 10 км проносится в сутки такое же количество воды, какое содержалось бы в озере площадью 1 км и глубиной 50 м [3].

Ученые подсчитали, что в центральной полосе РФ ветер, дующий со скоростью 5 м/с, за сутки несет столько воды над участком в 100 км длиной и 1 км шириной, что из нее можно создать озеро длиной 10 км, глубиной 60 м и шириной 5 м. В засушливых районах с более сильными ветрами влаги проносится над почвой гораздо больше [4].

Секрет садов Семирамиды – одного из семи чудес света (VII век до н.э.) – разгадан. С полной вероятностью можно утверждать, что древние инженеры использовали эффект конденсации атмосферной влаги [5].

Вода из воздуха попадает в почву при малейших изменениях атмосферного давления. При его повышении воздух проникает в почву, неся с собой воду, при понижении – уходит из почвы. И в том, и в другом случае разность температуры почвы и воздуха приводит к конденсации капелек воды на стенках многочисленных пустот, имеющих в девственной почве. При повышенном давлении воздуха обильно смачиваются корни, а при пониженном – образуется роса, которая затем уходит глубоко в землю [6].

В летние месяцы при перепадах температуры 10÷12 °С и влажности воздуха 50÷60 % осажается роса на почву, причем на каждый квадратный метр до нескольких сотен граммов воды [7].

Относительная влажность воздуха Терско-Кумской полупустыни Северо-Западного Прикаспия составляет 66,5 % сейчас (1951÷2010 гг.) против 49 % прежде за 100–120 лет (1881÷1948 гг.) [8].

Увеличение относительной влажности воздуха на 19,5 % вызвано расширением площадей орошаемых земель, особенно под затопляемый рис [8], а также увеличением площадей зеркала воды как Каспийского моря из-за повышения уровня ее, так и построенных каскадов ГЭС на реке Сулак.

Основой экологического функционирования плодородия почв подверженных опустыниванию земель аридных территорий служит содержание влаги в почве.

Проблема конденсации и увеличения почвенной влаги озвучена еще более века назад в новой системе аэрации земель, предложенной И.Е. Овсинским [9].

В условиях степи постоянно меняющееся атмосферное давление приводит к циркуляции воздуха в кротовинах, где происходит конденсация парообразной влаги атмосферы из-за разности температурного режима в системе «почва – атмосфера» [4, 10].

Цель и задачи исследования

Цель работы – борьба с опустыниванием земель аридных территорий. Поставленная цель достигается конденсацией парообразной влаги атмосферы в почве методом аэрации.

Экспериментальные исследования проводились в условиях Терско-Кумской полупустыни Западного Прикаспия.

Почва светло-каштановая, карбонатная средне-суглинистая солончаковая сильнодефлированная.

Для конденсации влаги в почве подверженных опустыниванию земель нами разработан метод аэрации почв. Он включает рабочий орган кротователя, не имеющий аналогов [11].

Разработанный рабочий орган кротователя (рис. 1) включает горизонтальный нож, выполненный в форме расходящихся крыльев.

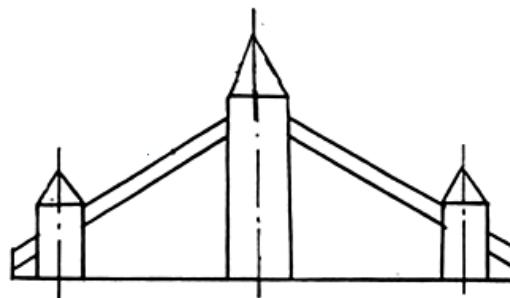


Рис. 1. Рабочий орган кротователя

В центре ножа вставлен крот-уширитель диаметром 80 мм, на концах – кроты-уширители диаметром 60 мм.

Рабочий орган кротователя крепится наглухо (сваркой) к вертикальному ножу кротователя (рис. 2).

Кротователь навешивается на тяжелый гусеничный трактор С-100 или Т-130.

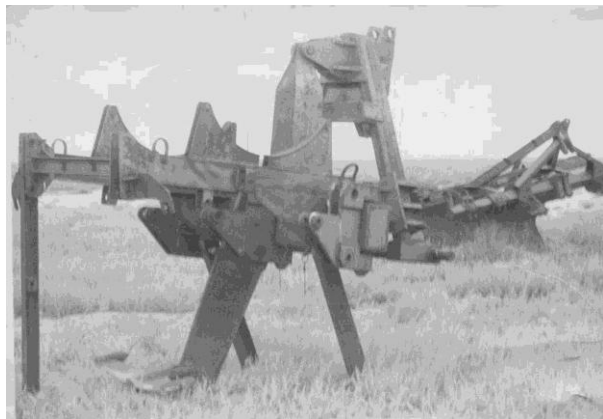


Рис. 2. Кротователь

При прохождении трактора с кротователем через 1,0 м по следу создается под почвой на заданной глубине 60–80 см множество кротовин (рис. 3) и макро-, мезо-, микро- и нанотрещин горизонтального и вертикального направлений. Рабочий орган кротователя работает под почвой, не нарушая генетических горизонтов почв и растительного покрова.

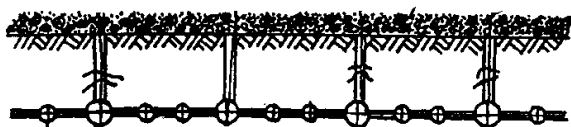


Рис. 3. Кротовины под почвой

На экспериментальных участках (контроль – естественные деградированные пастбища и аэрированные почвы) (рис. 4, 5) определение влажности в метровом слое почвы проводилось термостатно-весовым методом в трехкратной повторности в летние жаркие месяцы – июнь – август; определение урожайности пастбищных трав – методом случайных выборок площадок 1 м² в 10-кратной повторности.

Полевые эксперименты за годы исследований показали высокую эффективность разработанного метода аэрации почв для конденсации парообразной влаги в почвах подверженных опустыниванию земель аридных территорий.

В аэрированной почве содержание влаги в метровом слое ежедневно в среднем за 6 лет составило более 150 мм/га (127 мм/га – на контроле в летний жаркий период года).



Рис. 4. Участок контрольный (Терско-Кумская полупустыня)



Рис. 5. Участок аэрированный (Терско-Кумская полупустыня)

Разница к контролю на аэрированной почве составляет более 23 мм/га ежедневно в метровом слое почвы в летний жаркий период года (табл. 1).

Биологическая продуктивность на экспериментальном участке была выше, чем на контроле, за годы исследований.

Урожайность пастбищных трав на экспериментальных аэрированных участках за годы наблюдений (6 лет) в среднем составила 4,0 ц/га против 2,4 на контроле; разница в среднем за 6 лет – 1,5 ц/га (табл. 2).

Из приведенных данных видно, что аэрация почв подверженных опустыниванию земель аридных территорий увеличивает продуктивность почв в 1,5–2 раза.

Результаты исследования, проведенного в условиях полупустыни, обращают внимание на то, что изъятие влаги из атмосферы и ее конденсации в почве позволит предупредить и противостоять естественному процессу опустынивания аридных территорий.

Таблица 1

Среднесуточное содержание влаги в метровом слое почвы в жаркий период года (июнь – сентябрь), мм/га

Вариант эксперимента	Год						Среднее за 6 лет	Разница к контролю	
	1990	1991	1992	1993	1994	1995		мм/га	%
Контроль (естественные пастбища)	93,76	156,10	130,57	110,35	133,50	137,86	127,02	–	100,0
Аэрированные почвы	95,96	177,69	164,36	141,36	153,52	169,48	150,39	23,37	118,40

Таблица 2

Урожайность естественных пастбищ, ц/га воздушно-сухой массы

Варианты эксперимента	Год						Среднее за 6 лет	Разница к контролю	
	1990	1991	1992	1993	1994	1995		мм/га	%
Контроль (естественные пастбища)	1,5	3,0	2,7	2,0	2,7	2,7	2,4	–	100
Аэрированные почвы	3,0	4,9	4,5	4,0	3,7	3,9	4,0	1,5	163,5

Выводы

1. Разработан и исследован метод аэрации почв подверженных опустыниванию земель аридных территорий.

2. Объем конденсации влаги из приземного слоя атмосферы в аэрированных почвах составляет более 23 мм/га ежесуточно в летний жаркий период года.

3. Аэрация подверженных опустыниванию земель аридных территорий увеличит биологическое разнообразие, повысит продуктивность и плодородие почв.

Литература

1. Диалло Х.А. Человеческий фактор // Наша планета. 1994. Т. 6, № 5. С. 10–12.
2. Залибеков З.Г. Процессы опустынивания и их влияние на почвенный покров. М., 2000. 220 с.
3. Алексеев В.В., Березкин М.Ю. Пресная вода из атмосферного воздуха // Природа. 1988. № 6. С. 91–95.
4. Янович П. Вода из воздуха // Наука и жизнь. 1968. № 11. С. 64–66.
5. Шаров В.В. Секрет садов Семирамиды разгадан // Мелиорация и водное хозяйство. 1990. № 11. С. 44–45.
6. Моргунов Ф.Т. Обработка почвы и урожай. М., 1977. 150 с.
7. Алишаев М.Г. О конденсации и осаждении атмосферной влаги в приземном слое атмосферы // Метеорология и гидрология. 2013. № 8. С. 17–28.
8. Гасанов Г.Н., Асварова Т.А., Гаджиев К.М., Ахмедова З.Н., Абдуллаева А.С., Баширов Р.Р., Султанакмедов М.С., Салихов С.А. Гидротермические условия формирования видового состава и продуктивности фитоценозов Терско-Кумской низменности // Аридные экосистемы. 2014. Т. 20, № 4. С. 93–98.
9. Овсинский И.Е. Новая система земледелия. Киев, 1899. 178 с.
10. Черкасов А.А. Мелиорация и сельскохозяйственное водоснабжение. М., 1958. 220 с.

11. А.с. № 1656064. Рабочий орган кротователя / Э.М.-Р. Мирзоев. 1991.

References

1. Diallo Kh.A. Chelovecheskii faktor [Human factor]. *Nasha planeta*, 1994, vol. 6, no 5, pp. 10-12.
2. Zalibekov Z. G. *Protsessy opustynivaniya i ikh vliyaniya na pochvennyi pokrov* [Process of desertification and its impact on soil]. Moscow, 2000, 220 p.
3. Alekseev V.V., Bereskin M.Yu. Presnaya voda iz atmosfernogo vozdukha [Fresh water from the air]. *Priroda*, 1988, no 6, pp. 91-95.
4. Yanovich P. Voda iz vozdukha [Water from the air]. *Nauka i zhizn'*, 1968, no 11, pp. 64-67.
5. Sharov V.V. Sekret sadov Semiramidy razgadan? [Secret Gardens of Babylon cracked?]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo*, 1990, no 11, pp. 44-45.
6. Morgun F. T. *Obrabotka pochvy i urozhai* [Soil cultivation and harvest]. Moscow, 1977, 150 p.
7. Alishaev M.G. O kondensatsii i osazhdenii atmosfernoi vlagi v prizemnom sloe atmosfery [About condensation and deposition of atmospheric moisture in the surface layer of the atmosphere]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2013, no 8, pp. 17-28.
8. Gasanov G.N., Asvarova T.A., Gadzhiev K.M., Akhmedova Z.N., Abdulaeva A.S., Bashirov R.R., Sultanakhmedov M.S., Salikhov S.A. Gidrotermicheskie usloviya formirovaniya vidovogo sostava i produktivnosti fitotsenozov Tersko-Kumskoi nizmennosti [Hydrothermal conditions of formation of species composition and phytocenoses productivity of the Terek-Kuma Lowland]. *Aridnye ekosistemy*, 2014, vol. 20, no 4 (61), pp. 93-98.
9. Ovsinskii I.E. *Novaya sistema zemledeliya* [The new system of agriculture]. Kyiv, 1899, 178 p.
10. Cherkasov A. A. *Melioratsiya i sel'skokhozyaistvennoe vododnabzhenie* [Reclamation and agricultural water supply]. Moscow, 1958, 220 p.
11. Mirzoev E.M.-R. *Rabochii organ krotovatelya* [The working body of krotovatel]. Certificate, no 1656064. 1991.

УДК 633.854.78:632954+631.51

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-69-76

АДАПТИВНЫЕ СПОСОБЫ ОСНОВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ В ЗВЕНЕ ЗЕРНОПРОПАШНОГО СЕВООБОРОТА

© 2015 г. В.С. Полоус, В.Г. Шурупов

Полоус Виктор Стефанович – доктор сельскохозяйственных наук, директор сельскохозяйственного научно-производственного предприятия «Кушевское», ул. Гагарина, 10, ст. Кушевская, Краснодарский край, 352030.

Шурупов Василий Георгиевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заместитель директора по научной работе, Донская опытная станция им. Л.А. Жданова Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур, ул. Жданова, 2, п. Опорный, Ростовская область, 346754, e-mail: gnudos@mail.ru

Polous Biktop Stefanovich – Doctor of Agricultural Science, Director of the Agricultural Research and Production Enterprise «Kushchevskoe», Gagarin St., 10, Kushchevskaya, Krasnodar Region, Russia, 352030.

Shurupov Vasilii Georgievich – Doctor of Agricultural Science, Professor, Deputy Director, Zhdanov Don Experimental Station of the All-Russian Research Institute of Oil Crops, Zhdanov St., 2, Oporny, Rostov Region, Russia, 346754, e-mail: gnudos@mail.ru

Рассматривается влияние различных видов основной обработки почвы (вспашка – 22–24 см, минимальная – 12–14 см, поверхностная – 6–8 см, нулевая), сроков внесения преимущественно жидких комплексных удобрений, приемов ухода за полевыми культурами в звене зернопропашного севооборота, а также указанных факторов на агрохимические свойства почвы. Анализируется засоренность посевов при изменении глубины основной обработки почвы, использовании удобрений и различных приемов ухода за полевыми культурами. Показано комплексное действие различных агроприемов на урожайность зерновых культур и подсолнечника в звене зернопропашного севооборота. Приводятся данные экономической эффективности возделывания культур в звене севооборота при различной основной обработке почвы.

Ключевые слова: способы обработки почвы, плотность почвы, влажность, удобрения, гербициды, засоренность посевов, урожайность, подсолнечник, кукуруза, озимая пшеница, предшественник, качество урожая, экономическая эффективность.

The article examines the impact of different types of primary tillage (plowing - 22-24 cm, minimum - 12-14 cm, surface - 6-8 cm, zero), timing of mostly liquid compound fertilizers, reception care field crops tilled corn in the link crop rotation, as well as the above factors on the agrochemical properties of the soil. We analyze the contamination of crops when the depth of primary tillage, fertilizer use, and various methods of care for field crops. It is showing the effect of different agricultural practices integrated in the yield of grain crops and sunflower seed in the link tilled crop rotation. The data of the economic efficiency of crop rotation in a link with different primary tillage.

Keywords: tillage methods, soil density, moisture, fertilizer, herbicides, weed infestation of crops, yield, sunflower, corn, winter wheat, predecessor, crop quality, economic efficiency.

Совершенствование систем и способов основной обработки почвы в земледелии остаётся важной проблемой, поскольку применение одних и тех же её способов в различных почвенно-климатических зонах зачастую даёт противоречивые результаты. Выбор наиболее оптимального способа основной обработки почвы обусловлен типом последней, её физическими свойствами, подверженностью эрозии, предшественником, культурой земледелия, засоренностью поля, наличием растительных остатков на полях, погодными условиями, необходимостью применения гербицидов и внесения удобрений, техникой.

Особая роль отводится основной обработке почвы, при которой в сельскохозяйственном производстве широко используются различные её способы, обоснованные многолетними исследованиями в стационарных опытах.

Исследования проводились в севообороте (1979–1992 гг.) и его звеньях (2000–2006 гг.), причем в сочетании с другими способами под предшествующие культуры. При этом ведение опытов и полученные результаты увязывались с появлением в производстве новой почвообрабатывающей техники и высокоэффективных средств защиты растений.

Сегодня на полях Северного Кавказа применяются комбинированные системы в севооборотах с сочетанием отвальных, безотвальных, поверхностных и нулевых систем. Существуют сторонники мелких поверхностных и нулевых способов обработки, позволяющих экономить ГСМ, обеспечивать высокую производительность и рентабельность, а также способствующих защите почв от ветровой и водной эрозии, влагонакоплению, оптимизирующих плотность сложения пахотного слоя при одновременном увеличении засоренности почвы и посевов [1–3].

Вместе с тем освоение ресурсосберегающих технологий на основе минимальной или нулевой обработки почвы становится все более актуальным. Научные исследования, проведенные нами, и проверка на практике показывают, что на черноземе обыкновенном можно выращивать высокие урожаи зерновых, масличных и кормовых культур при подобной обработке. Их значимость возрастает ещё и потому, что за последние 20 лет появились принципиально новые трактора, сельскохозяйственные машины, высокоэффективные гербициды, средства защиты растений, которые широко применялись нами.

Условия, материалы и методы

Исследовательская работа проводилась в ЗАО СХНПП «Кушевское» Кушевского района Краснодарского края в течение семи лет (2000–2006 гг.). В районе исследований среднегодовая температура воздуха составляет +11,4 °С, безморозный период – 210 дней, а сумма эффективных температур достигает 3400 °С при годовых осадках от 429 до 750 мм, которые выпадают неравномерно.

Почвенная разность – чернозем обыкновенный тяжелосуглинистый, в пахотном слое которого содержится до 4 % гумуса с валовым содержанием азота в слое 0–30 см (0,26 %), фосфора – 0,19 %, калия – 1,70÷85 %. Почвенно-климатические условия зоны исследования позволяют возделывать различные полевые культуры.

Изучение продуктивности и качества полевых культур в зависимости от приёмов обработки почвы с применением удобрений и интенсивных приёмов ухода за растениями проводилось в звене зернопропашного севооборота с чередованием культур: подсолнечник – 2001÷2003; озимая пшеница – 2002÷2004; кукуруза на зерно – 2003÷2005; озимая пшеница – 2004÷2006 гг.

Разнообразные погодные условия в годы исследований позволили дать всестороннюю и достаточно полную оценку изучаемых приёмов и способов возделывания сельскохозяйственных культур.

Учётная площадь делянки в опыте составляла 500 м². Схематически опыты предусматривали различные способы и приемы основной обработки почвы под пропашные культуры и озимую пшеницу при применении удобрений и гербицидов.

При исследованиях изучались различные системы основной обработки почвы под пропашные культуры:

- отвальная – лущение стерни на 8–10 см, вспашка на 22–24 см;
- минимальная – лущение стерни на 8–10 см, основная обработка на 12–14 см;

- поверхностная – лущение стерни на 6–8 см, основная обработка на 6–8 см;
- нулевая.

При изучении первых трех систем обработки почвы использовали осенью смесь гербицидов «Раундап» (3,5÷4 л/га) и «Банвел» (0,1 л/га) по куртинам многолетних сорняков, а при нулевой применяли «Раундап» (2÷2,5 л/га) и «Банвел» (0,1 л/га) в августе и сентябре.

Кроме прямого посева, предпосевная обработка почвы во всех вариантах заключалась в культивации на 6–8 см.

Удобрения (ЖКУ 10-34-0, КАС 28, аммиачная селитра, хлористый калий) вносили осенью в вариантах основной обработки почвы, при нулевой с посевом под подсолнечник – № 40 Р 60, под кукурузу на зерно – № 90 Р 60 К 60.

До посева пропашных культур опытные участки обрабатывали гербицидом «Раундап» (2–2,5 л/га), при второй волне сорняков на подсолнечнике дополнительно проводили одну обработку с той же нормой. Уходные работы за посевами подсолнечника заключались в обработке гербицидом «Харнес» (2 л/га) до всходов, кукурузы – опрыскивание смесью «Базиса» (20 г/га) и «Банвела» (0,4 л/га) в фазе 4–5 листьев.

Иногда при необходимости проводили одну междурядную обработку, в отдельные годы – десикацию посевов «Реглоном» (2 л/га) при влажности семян 30–35 %.

Экономическую эффективность приемов и способов возделывания изучаемых полевых культур определяли по методике [3].

Обработку экспериментального материала проводили по методике [4].

Озимую пшеницу возделывали по пропашным предшественникам. В опытах изучались: 1) минимальная (12–14 см); 2) поверхностная (6–8 см); 3) нулевая (прямой посев) обработка почвы.

По предшественнику подсолнечнику проводили обработку:

- минимальную – дискование (8–10 и 10–12 см), предпосевная культивация (6–8 см), посев;
- поверхностную – однократное лущение (6–8 см), посев.

По предшественнику кукурузе на зерно: – поверхностную – однократное лущение (6–8 см), посев;

– прямой посев (нулевая обработка).

Удобрения вносили в дозе N 90 P60 K60, в том числе N 80 – подкормка весной.

Во время вегетации растений почву обрабатывали «Банвелом» (0,2 л/га) в фазе кущения озимой пшеницы; смесью «Фалькона» (0,4 л/га) и БИ-58 (1-

1,2 л/га) – при появлении флагового листа и «Кара-тэ» (0,2 л/га) – в фазе молочно-восковой спелости.

Агротехнику применяли общепринятую для зоны. Для посева использовали сорт подсолнечника Мастер; озимую пшеницу – сорт Таня; кукурузы на зерно – гибрид первого поколения Краснодарский 194 МВ. Качество семян изучаемых культур соответствовало ГОСТу Р52325-2005 для репродукционных семян. В опытах определяли влажность, плотность сложения почвы, засоренность и урожайность согласно существующим методам.

Результаты и обсуждение

Приемы и способы основной обработки почвы мало влияли на влажность почвы в слое 0–100 см и плотность сложения слоя 0–30 см (табл. 1).

Весной содержание продуктивной влаги в горизонте 0–100 см под пропашными культурами в среднем составило в варианте с нулевой обработкой 163,4 мм; поверхностной – 166,6; минимальной – 168,1; отвальной – 170,0 мм.

При возобновлении вегетации в посевах озимой пшеницы этот показатель варьировал от 161,1 до 165,7 мм.

Перед уборкой сельскохозяйственных культур севооборота в метровом слое почвы содержалось 49,2–57,5 мм продуктивной влаги. Следует отметить, что основное влияние на величину содержания продуктивной влаги в метровом слое оказали не способы основной обработки почвы, а количество осадков, выпадающих в весенне-летний период.

Таблица 1

Влияние способов основной обработки почвы на накопление продуктивной влаги и плотность сложения (среднее за 2001–2006 гг.)

Способ основной обработки почвы	Содержание продуктивной влаги в слое 0–100 см, мм		Плотность сложения почвы в слое 0–30 см, г/см ³	
	Весной	Перед уборкой	Весной	Перед уборкой
Подсолнечник				
Вспашка (22–24 см)	158,7	57,5	1,04	1,25
Минимальная (12–14 см)	155,6	56,4	1,07	1,26
Поверхностная (6–8 см)	154,1	55,4	1,10	1,26
Нулевая	149,8	54,0	1,12	1,27
Озимая пшеница после подсолнечника				
Минимальная (10–12 см)	164,2	52,6	1,13	1,21
Поверхностная (6–8 см)	161,1	49,2	1,14	1,21
Нулевая (прямой посев)	159,5	48,4	1,15	1,22
Кукуруза на зерно				
Вспашка (22–24 см)	183,3	55,2	1,02	1,21
Минимальная (12–14 см)	180,6	54,7	1,05	1,22
Поверхностная (6–8 см)	179,0	53,3	1,10	1,23
Нулевая	176,9	53,1	1,12	1,25
Озимая пшеница после кукурузы на зерно				
Поверхностная (6–8 см)	166,9	53,1	1,15	1,21
Нулевая	165,7	51,2	1,15	1,22

В звене севооборота перед уборкой пропашных культур плотность сложения почвы в слое 0–30 см увеличилась с 1,21 до 1,27 г/см³, что ниже критических показателей (1,35–1,40 г/см³) для обыкновенного чернозема.

Плотность сложения почвы после энергосберегающих обработок пропашных культур весной в слое 0–30 см увеличилась по сравнению со вспашкой на 0,02–0,10 г/см³, но не превышала 1,12 г/см³. Весной при возобновлении вегетации озимой пшеницы, возделываемой по подсолнечнику, при минимальной основной обработке этот показатель составил 1,13 г/см³. Поверхностное осеннее рыхление на 6–8 см и прямой посев (нулевая обработка)

способствовали незначительному уплотнению почвы на 0,1 и 0,2 г/см³ соответственно. По кукурузе на зерно озимая пшеница весной активно вегетировала по поверхностной осенней обработке при нулевом варианте и плотности сложения слоя 0–30 см почвы – 1,15 г/см³. Перед уборкой озимой пшеницы, возделываемой по пропашным предшественникам, при различной осенней основной подготовке почвы плотность сложения увеличилась на 0,06–0,08 г/см³ по сравнению с весенним определением и не превышала максимального значения (1,40 г/см³) для данной культуры.

Засоренность посевов пропашных культур на удобренных опытных участках заметно увеличилась

с уменьшением глубины основной обработки почвы. По поверхностной и нулевой обработке почвы на пропашных культурах однолетних сорняков было больше в 1,5–2,4 раза, чем по вспашке, а по сравнению с минимальной обработкой на 16–40 % [3, 4].

После уборки изучаемых культур до применения гербицидов в различных вариантах основной обработки почвы количество однолетних сорняков составляло от 42 до 72, многолетних – от 3,9–5,4 шт/м².

Предпосевная культивация почвы на 6–8 см под пропашные культуры севооборота уничтожала 95–97 % взошедших сорняков.

Наибольшее число однолетних и многолетних сорняков перед первым применением гербицида

«Раундапа» отмечено при возделывании подсолнечника по поверхностной и нулевой обработке почвы (92–146 и 1,3–1,9 шт/м² соответственно). При повторном применении «Раундапа» (2,5 л/га) до посева подсолнечника по второй волне сорняков, применение «Харнеса» (2 л/га) до всходов подсолнечника, смеси гербицидов «Банвела» (0,4 л/га) и «Базиса» (20 г/га) – на кукурузе в фазе 4–5 листьев, «Банвела» (0,2 л/га) – в фазе кущения озимой пшеницы заметно снизило засоренность посевов.

При неоднократной обработке посевов гербицидами засоренность посевов пропашных культур перед уборкой не превышала 18–32 шт/м², масса сорняков – 168–248 г/м² (табл. 2).

Таблица 2

Влияние способов основной обработки почвы на засоренность культур в звене севооборота (среднее за 2001 – 2006 гг.)

Основная обработка почвы	Засоренность перед уборкой	
	шт/м ²	г/м ²
Подсолнечник		
Вспашка (22–24 см)	18–0,2	168,3
Минимальная (12–14 см)	20–0,3	192,9
Поверхностная (6–8 см)	25–0,5	224,1
Нулевая	25–0,7	243,5
Озимая пшеница после подсолнечника		
Минимальная (10–12 см)	18–0,1*	153,0
Поверхностная (6–8 см)	21–0,2	164,0
Нулевая (прямой посев)	24–0,2	182,0
Кукуруза на зерно		
Вспашка (22–24 см)	23–0,1	182,5
Минимальная (12–14 см)	25–0,2	200,9
Поверхностная (6–8 см)	29–0,2	226,8
Нулевая	32–0,2	248,4
Озимая пшеница после кукурузы на зерно		
Поверхностная (6–8 см)	19–0,1	187,0
Нулевая	22–0,1	202,0

* – 1-я цифра – количество однолетних сорняков; 2-я – многолетних.

На посевах озимой пшеницы после подсолнечника и кукурузы на зерно более высокая засоренность однолетними сорняками была на варианте с прямым посевом (нулевой основной обработкой почвы) и составила соответственно 24 и 22 шт/м² при их массе 182–202 г/м².

При минимальной подготовке почвы (10–12 см) к уборке сохранилось 18 шт/м² однолетних сорняков, что в 1,2 раза меньше, чем при поверхностной обработке. Минимизация основной обработки почвы, особенно в варианте с нулевой, несмотря на применение химических средств защиты растений, приводила к некоторому увеличению засо-

ренности посевов, которая существенно влияла на рост, формирование репродуктивных органов, урожай и его качество.

По вспашке (22÷24 см) на посевах подсолнечника перед уборкой насчитывалось 54 тыс. шт/га культурных растений и 52 тыс. шт/га – по нулевой. Средний диаметр корзинки составлял 21,5–22,3 см по обработанным осенью вариантам, а без осенней обработки этот показатель был на 7÷13 % ниже. Энергосберегающие обработки почвы под подсолнечник увеличивали диаметр пустой середины корзинки на 4,2 см в сравнении с отвальной вспашкой.

По вспашке и минимальной основной обработке урожайность маслосемян подсолнечника была близкой и составила 2,3 т/га, при поверхностной – на 0,1 и при

нулевой – на 0,2 т/га меньше. При поверхностной (6–8 см) и нулевой обработке почвы снизилась натура семян на 4,4–5,8 % и сбор масла на 30–80 л/га (табл. 3).

Таблица 3

Влияние основной обработки почвы, удобрений, гербицида на урожайность, качество семян и сбор масла подсолнечника (среднее 2001 – 2003 гг.)

Основная обработка почвы	Урожайность, т/га	Натура, г/л	Масса 1000 семян, г	Масличность, %	Сбор масла, т/га
Вспашка (22–24 см)	2,26	412	65,7	54,2	1,22
Минимальная (12–14 см)	2,31	406	66,4	54,5	1,26
Поверхностная (6–8 см)	2,18	394	65,2	54,8	1,19
Нулевая	2,09	388	64,8	54,7	1,14
НСР _{0,05}	0,04				

Основная обработка почвы заметно влияла на густоту стояния растений кукурузы: при уборке по вспашке (22–24 см) и минимальной (12–14 см) – 51,5, поверхностной – 49,6 тыс. шт/га. При нулевой обработке культурных растений было на 8 % меньше, чем при отвальной.

Растения кукурузы на зерно при оптимальных погодных условиях имели высоту 2,4–2,1 м, при этом на делянках с поверхностной и нулевой основной обработкой почвы этот показатель снижался на 3–8 % по сравнению со вспашкой.

Анализ структуры урожая початков кукурузы показал, что с уменьшением глубины основной обра-

ботки почвы снижались длина початка на 3,9–7,7 – 11,4 %, число зерен в початке – на 4,5–11,2–12,6 %, масса зерна в початке – 5,4–11,5 (16 %) при минимальной, поверхностной и нулевой основной обработке почвы. По вспашке и минимальной основной обработке почвы урожайность зерна кукурузы составила 5,6–5,5 т/га. Существенное снижение сбора зерна этой культуры наблюдалось при поверхностной и нулевой основной обработке почвы (на 0,8–0,9 т/га). Это вызвано снижением густоты стояния культурных растений, засоренностью посевов, а также некоторым увеличением плотности сложения почвы (табл. 4).

Таблица 4

Биометрические показатели и урожайность зерна кукурузы в зависимости от основной обработки почвы (среднее 2003 – 2005 гг.)

Основная обработка почвы	Структура урожая			Урожайность, т/га	НСР _{0,05}
	Длина початка, см	Число зерен в початке, шт	Масса зерна в початке, г		
Вспашка (22–24 см)	18,2	421	131	5,61	0,34
Минимальная (12–14 см)	17,5	398	124	5,52	
Поверхностная (6–8 см)	16,8	374	116	4,84	
Нулевая	16,3	368	110	4,67	

Озимая пшеница на Кубани является основной зерновой культурой. Она определяет общий уровень урожайности, а также валовой сбор зерна. В северной почвенно-климатической зоне Краснодарского края озимая пшеница на 20–25 % возделывается по подсолнечнику и кукурузе на зерно, которые убираются в сентябре – октябре, т.е. на 40–60 дней позже озимого рапса, гороха, колосовых культур. В связи с этим вопрос основной обработки почвы после поздно убираемых пропашных предшественников очень важен для проведения

сева озимой пшеницы в рекомендованные сроки, получения дружных и хорошо развитых всходов перед уходом в зиму.

Как известно, подсолнечник сильно иссушает почву, поэтому по нему (как предшественнику) влаги и, главным образом азота, в осенний и ранневесенний период для озимой пшеницы бывает недостаточно.

В 2002–2006 гг. нами были изучены 3 способа основной обработки почвы под озимую пшеницу: после подсолнечника – минимальная (10–12 см) с использованием дискатора, поверхностная (6–8 см)

с использованием дискового агрегата Rubin и нулевая (прямой посев) (табл. 5) [5].

Нулевая основная обработка почвы, применяемая на подсолнечнике и кукурузе на зерно как предшественниках, не повлияла существенно на растения, структуру, урожайность и биометриче-

ские показатели озимой пшеницы [6, 7]. Наибольшее количество продуктивных стеблей формировалось на вариантах опыта, где предшественники озимой пшеницы обрабатывались поверхностно (6–8 см): по подсолнечнику – 552, кукурузе на зерно – 528 шт/м².

Таблица 5

Влияние приемов и способов основной обработки почвы на биометрические показатели и урожайность озимой пшеницы

Основная обработка почвы под предшественник		Число продуктивных стеблей, шт/м ²	Число зерен в колосе, шт	Масса зерна, г/м ²	Урожайность, т/га
озимую пшеницу					
Озимая пшеница по подсолнечнику (среднее 2002 – 2004 гг.)					
Вспашка (22–24 см)	Минимальная, 10–12 см	502	30,8	469	4,04
Минимальная (12–14 см)		508	32,0	483	4,06
Поверхностная (6–8 см)		481	30,6	448	3,99
Нулевая		488	30,4	462	4,01
НСР _{0,05}					0,10
Вспашка (22–24 см)	Поверхностная, 6–8 см	561	31,4	531	4,52
Минимальная (12–14 см)		550	31,6	553	4,55
Поверхностная (6–8 см)		555	31,2	521	4,51
Нулевая		542	31,0	514	4,49
НСР _{0,05}					0,22
Вспашка (22–24 см)	Нулевая	513	30,9	492	4,02
Минимальная (12–14 см)		505	31,1	479	4,10
Поверхностная (6–8 см)		509	31,3	483	4,15
Нулевая		499	30,8	471	4,02
НСР _{0,05}					0,18
Озимая пшеница по кукурузе на зерно (среднее 2004, 2005, 2006 гг.)					
Вспашка (22–24 см)	Поверхностная, 6–8 см	524	30,9	508	4,33
Минимальная (12–14 см)		532	31,0	516	4,36
Поверхностная (6–8 см)		515	30,8	494	4,29
Нулевая		540	31,2	522	4,34
НСР _{0,05}					0,28
Вспашка (22–24 см)	Нулевая	491	30,5	465	3,84
Минимальная (12–14 см)		478	30,2	442	3,79
Поверхностная (6–8 см)		482	30,4	448	3,82
Нулевая		498	30,1	472	3,86
НСР _{0,05}					0,27

Проведение минимальной (10–12 см) и нулевой основных обработок почвы снижало этот показатель на 8–10 %, число зерен в колосе – на 0,5–0,9 шт., массу зерна с одного 1 м² – на 9–16 %, урожайность озимой пшеницы – на 0,5 т/га. При прямом посеве последней по подсолнечнику урожайность зерна составила 4,02 т/га, по кукурузе на зерно – 3,86. Проведение поверхностной обработки пропашных предшественников обеспечивало урожайность зерна этой культуры (4,5–4,3 т/га). Используемый в наших опытах сорт озимой пшеницы Таня (селекции КНИИСХ им. П.П. Лукьяненко) обладает хорошим качеством зерна, относится к ценным пшеницам.

В многолетних опытах нами уделялось большое внимание улучшению качества зерна, которое в ос-

новном зависело от плодородия почвы и проведения ряда агротехнических приёмов. На качество зерна озимой пшеницы значительно влияют предшественники. Подсолнечник потребляет за период вегетации большое количество влаги, сильно иссушает почву и выносит из неё много питательных веществ. До посева озимой пшеницы в слое почвы 0–30 см содержалось 7–11 мг/кг нитратов и незначительное количество влаги. Удобрения как средство сильно влияют на качество зерна. Накопление белка и клейковины в зерне озимой пшеницы в основном зависит от обеспеченности растений азотом в течение вегетации.

Под озимую пшеницу, возделываемую по подсолнечнику и кукурузе на зерно, удобрения вносили в дозе N90 P60 K60, в том числе N80 весной при подкормке. Чтобы получить продовольственное (4-й

кл.), а тем более ценное (3-й кл.) зерно пшеницы, на опытных делянках проводили защиту от болезней и вредителей (в том числе вредной черепашки, которая является одной из основных причин снижения качества зерна) смесью «Фалькона» (0,4 л/га) и БИ-58 (1–1,2 л/га) при появлении флагового листа и «Каратэ» (0,2 л/га) – в фазу молочно-восковой спелости зерна. Применение азотных удобрений в дозе N90 повысило натуру зерна озимой пшеницы по подсолнечнику (740–755 г/л) и кукурузе на зерно (738–752 г/л), содержание клейковины (24,0–25,4 и 23,6–4,4 % соответственно). Качество клейковины по обоим предшественникам соответствовало второй груп-

пе (80–90 единиц), зараженность фузариозом не превышала 0,6–0,9 % при допустимой норме – 1 % (табл. 6).

Расчёт экономической эффективности различных способов основной обработки почвы в звене севооборота показал, что применение под пропашные культуры минимальной, а под озимую пшеницу – поверхностной основной обработки почвы обеспечило наибольшую их урожайность, и стоимость валовой продукции – 90,9 тыс. руб/га при суммарных затратах 57,2 тыс. руб/га, в том числе ГСМ – 3,1; удобрения – 17,2; гербициды – 6,6 тыс. руб/га. Суммарный условно чистый доход составил 33,4 тыс. руб/га, рентабельность – 59 %.

Таблица 6

Качество зерна озимой пшеницы в зависимости от предшественника основной обработки почвы

Основная обработка почвы под предшественник		Урожайность, т/га	Натура, г/л	Стекловидность, %	Содержание сырой клейковины, %	Качество клейковины, ИДК
озимую пшеницу						
Озимая пшеница по подсолнечнику (среднее 2002 – 2004 гг.)						
Вспашка (22–24 см)	Минимальная, 10–12 см	4,04	742	58	24,9	80
Минимальная (12–14 см)		4,06	745	59	25,2	80
Поверхностная (6–8 см)		3,99	740	57	25,4	85
Нулевая		4,01	740	58	25,0	90
Вспашка (22–24 см)	Поверхностная, 6–8 см	4,52	750	59	25,0	85
Минимальная (12–14 см)		4,55	755	59	24,5	80
Поверхностная (6–8 см)		4,51	740	57	24,0	85
Нулевая		4,49	745	57	24,2	90
Вспашка (22–24 см)	Нулевая	4,04	749	58	24,8	80
Минимальная (12–14 см)		4,10	745	59	25,0	85
Поверхностная (6–8 см)		4,15	750	58	25,3	85
Нулевая		4,02	741	57	24,7	90
Озимая пшеница по кукурузе на зерно (среднее 2004 – 2006 гг.)						
Вспашка (22–24 см)	Поверхностная, 6–8 см	4,33	748	59	24,1	85
Минимальная (12–14 см)		4,36	752	59	23,4	85
Поверхностная (6–8 см)		4,29	744	58	23,2	90
Нулевая		4,34	750	59	23,6	95
Вспашка (22–24 см)	Нулевая	3,84	740	58	24,4	90
Минимальная (12–14 см)		3,79	745	58	24,0	90
Поверхностная (6–8 см)		3,82	744	57	23,8	95
Нулевая		3,86	738	56	23,6	95

Возделывание пропашных культур и озимой пшеницы после кукурузы на зерно по нулевой обработке почвы обеспечивало устойчивое формирование урожаев выращиваемых культур при

стоимости валовой продукции 81,2 тыс. руб/га, суммарных производственных затратах – 53,6 тыс. руб/га, в том числе ГСМ – 2,6; удобрения – 17,2; гербициды – 7, тыс. руб/га. При этом условно –

чистый доход составил 27,6 тыс. руб/га, рентабельность – 52 %.

Выводы

1. Различные приемы и способы энергосберегающей основной обработки почвы, в том числе нулевой (no-till) с использованием удобрений, интенсивного ухода за культурами, пожнивных и корневых остатков обеспечивают высокие и устойчивые урожаи сельскохозяйственных культур.

2. Запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы весной по отвальной вспашке были на 1,4–2,7 % больше, чем по минимальной и нулевой обработке. В звене севооборота эти показатели составили 1,7–4,5 %.

3. Плотность почвы в слое 0–30 см до посева и перед уборкой возделываемых культур находилась в пределах оптимальных значений, в том числе в звене севооборота, для нормального роста и развития растений 1,07–1,12 и 1,17–1,28 г/см³.

4. Посевы полевых культур звена севооборота при энергосберегающих основных обработках почвы, особенно нулевой, были засорены в 1,9–2 раза более, чем по вспашке. При этих основных обработках применение гербицидов – обязательный агротехнический прием.

Неоднократное применение гербицидов в звене севооборота значительно снижало засоренность посевов пропашных культур и озимой пшеницы до 22–32 шт/м² сорняков при массе 168–248 г/м².

5. Внесение ЖКУ марки 10-34-0 и КАС марки 28-0-0 показало их высокую эффективность с использованием локально-ленточного способа внесения при посеве пропашных культур и поверхностного под основную обработку почвы на зерновых колосовых.

6. Коэффициент энергетической эффективности был наивысшим там, где применялась минимальная основная обработка почвы.

Литература

1. Орлова Л.В. Быть или не быть ресурсосберегающим технологиям в России? // Земледелие. 2007. № 2. С. 18.
2. Кудашова Л.М. Минимальная обработка почвы в севообороте // Земледелие. 1977. № 2. С. 37–39.
3. Фисюнов А.В. Справочник по борьбе с сорняками. М., 1984. 255 с.
4. Ярославская П.М., Бородин В.Н., Богомолов П.Я., Полосус В.С. Особенности борьбы с сорняками на посевах масличных культур при противоэрозийной обработке почвы // Научные основы почвозащитного земледелия в Краснодарском крае. Краснодар, 1988. С. 61–77.
5. Семихненко П.Г., Ярославская П.Н., Ригер А.Н. Система минимальной обработки почв в севообороте с масличными культурами // Вопросы обработки почв: тр. ВАСХНИЛ. М., 1979. С. 91–98.
6. Гоник Г.Е. Система обработки почвы под озимые культуры в севообороте // Сборник материалов краевого совещания. Краснодар, 2000. 19 с.
7. Нечаев В.И. Адаптивные высокопродуктивные технологии возделывания озимой пшеницы // Зерновые культуры. 2000. № 14. С. 18 – 20.

References

1. Orlova L.V. Byt' ili ne byt' resursosberegayushchim tekhnologiyam v Rossii? [To be or not to be resource-saving technologies in Russia?]. *Zemledelie*, 2007, no 2, p. 18.
2. Kudashova L.M. Minimal'naya obrabotka pochvy v sevooborote [Minimum tillage in crop rotation]. *Zemledelie*, 1977, no 2, pp. 37-39.
3. Fisyunov A. V. *Spravochnik po bor'be s sornyakami* [Manual weed control]. Moscow, 1984, 255 p.
4. Yaroslavskaya P.M., Borodin V.N., Bogomolov P.Ya., Polous V.S. [Features of weed control on crops of oilseeds under conservation tillage]. *Nauchnye osnovy pochvozashchitnogo zemledeliya v Krasnodarskom krae* [Scientific bases of conservation agriculture in the Krasnodar region]. Krasnodar, 1988, pp. 61-77.
5. Gonik T.E. [Tillage systems for winter crops in the rotation]. *Sbornik materialov kraevogo soveshchaniya* [The collection of materials of the regional meeting]. Krasnodar, 2000, 19 p.
6. Nechaev V.I. Adaptivnye vysokoproduktivnye tekhnologii vozdel'yvaniya ozimoi pshenitsy [Adaptive technology of cultivation of high-yielding winter wheat]. *Zernovye kul'tury*, 2000, no 4, pp. 18-20.

УДК 594.524.23, 504.54.056

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-77-82

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРА ВЛИЯНИЯ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСОБЕННОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ ГНЕЗДОВЫХ ПОСЕЛЕНИЙ И ПОВЕДЕНИЯ СЕРОЙ ВОРОНЫ (*CORVUS CORNIX*) В ГОРОДАХ ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ РАЗЛИЧНОЙ ВЕЛИЧИНЫ

© 2015 г. Д.С. Сухоносенко

Сухоносенко Денис Сергеевич – кандидат географических наук, доцент, кафедра природопользования, Волжский гуманитарный институт (филиал) Волгоградского государственного университета, ул. 40 лет Победы, 11, г. Волжский, 404133, e-mail: dsuhonosenko@mail.ru

Sukhonosenko Denis Sergeevich – Candidate of Geographical Science, Associate Professor, Department of Using of Nature, Volzhskiy Humanitarian Institute (Branch) of the Volgograd State University, 40 Let Pobedy St., 11, Volzhskiy, 404133, Russia, e-mail: dsuhonosenko@mail.ru

Представлены результаты исследования влияния характера градостроительной структуры на особенности гнездовой экологии и поведения серой вороны в пределах селитебной зоны городов Волгоградской области. Установлено, что в зависимости от степени урбанизированности территории изменяются параметры гнездовых поселений и поведения. Для различных микрорайонов и кварталов городов Волгоградской области приведены показатели, отражающие характер трансформации структуры гнездовых поселений серой вороны.

Ключевые слова: градостроительная структура, селитебная зона города, гнездовая экология, поведение серой вороны, фактор беспокойства, степень урбанизированности территории.

The results of studies on the influence of the elements of urban structure on the characteristics of the breeding ecology and behavior of gray crows within the residential areas of Volgograd region cities are submitted. Found that, depending on the degree of urbanization changes the parameters of the nesting territory of settlements and behavior of gray crows. For the various districts and neighborhoods of Volgograd region cities are indicators that reflect the nature of the transformation of structure of settlements gray crows nest.

Keywords: urban structure, residential areas of city, breeding ecology, behavior of gray crows, disturbance, the degree of urbanization.

Постановка проблемы

В процессе освоения серой вороной городских территорий происходит перестройка экологии птиц, оказавшихся в зоне воздействия антропогенных факторов. Одним из проявлений процесса синантропизации птиц в пределах урбогеосистемы является трансформация структуры гнездовых поселений; изменяются высота размещения гнезд над землей, плотность гнездования птиц, размер гнезд, используемый строительный материал, набор древесных пород, используемых для гнезд [1]. Кроме того, защитная реакция птиц на фактор беспокойства в городе выражается в виде изменения дистанции вспугивания, или дистанции взлета – расстояния, с которого птица взлетает при приближении хищника.

В конце XIX – начале XX в. серая ворона не гнездилась в городах низовья Волги [2]. К настоящему времени гнездовая популяция серых ворон в городах Волгоград и Волжский достигла значительных размеров. В пределах урбогеосистемы формируется среда обитания животных, существенно отличающаяся от природной. Особенности

структуры гнездовых поселений и поведения серой вороны в различных городах неодинаковы. Они обусловлены характером природно-ландшафтной основы урбогеосистемы, а также спецификой градостроительной структуры. В связи с этим в данной работе использован ландшафтно-экологический подход к изучению городов Волгоградской области, предполагающий исследование совместного влияния градостроительной структуры и природного ландшафта на особенности гнездовой экологии и поведения серой вороны [3].

Особенности структуры ее гнездовых поселений и поведения в городе во многом обусловлены степенью урбанизированности территории, которая определяется характером градостроительной структуры: плотностью и высотой застройки, плотностью проживающего населения и другими параметрами [4]. В городах различной величины эти показатели неодинаковы. В связи с этим в данной работе проведено исследование характера и степени влияния элементов градостроительной структуры малого, среднего, большого и крупного городов Волгоградской области на структуру гнездовых поселений и дистанцию вспугивания серой вороны.

Материалы и методы

Материал по гнездовой экологии серой вороны собран в 2012–2014 гг. В пределах каждого микрорайона и квартала селитебной зоны городов Волгоградской области число её гнезд определено методом прямого сплошного подсчета. При этом гнездование считалось доказанным, если обнаружена насиживающая птица. Площадь территории, в пределах которой проведены исследования, составляет 1900 га. Данная территория охватывает районы селитебных зон городов Волгоградской области с различным типом застройки (индивидуальной, малоэтажной, среднеэтажной и многоэтажной).

Величины дистанции вспугивания серой вороны в различных районах городов Волгоградской области получены в результате анализа порядка 150 подходов наблюдателей к птицам. Дистанция вспугивания определялась при индифферентном поведении человека во время его подхода к птице (без резких движений).

Исходные данные

В качестве объектов исследования выбраны Палласовка (малый город – 15,9 тыс. чел.); Михайловка (средний – 58,9 тысяч чел.); Камышин (большой – 118 тыс. чел.); Волжский (крупный город – 314 тыс. чел.).

Природно-ландшафтные особенности территории, занимаемой городами Волжский и Палласовка, обусловлены их принадлежностью к Заволжскому полупустынному ландшафтному району. Характерный тип ландшафта – плоские низменные равнины с развитым микрорельефом, белопольно-ромашниковой растительностью на светло-каштановых солонцеватых и солончаковатых поч-

вах с солонцами и солончаками [5]. Камышин расположен в пределах Приволжского возвышенного района. Для него характерны водораздельные поверхности, покатые придолинные и прибалочные склоны с каштановыми почвами. По характеру растительности район относится к типчаково-ковыльным степям. Михайловка расположена в пределах Медведицкого возвышенного района. Характерный тип ландшафта – холмистые водоразделы и их склоны с разнотравно-злаковыми ассоциациями.

Расположение городов Волжский и Палласовка (полупустынная зона), Камышин и Михайловка (степная зона) обуславливает формирование урбанистического градиента, который важен при изучении пространственной структуры гнездовых поселений серой вороны. Этот городской градиент характеризуется тем, что в центре города расположены крупные древесные насаждения, а в пригородной зоне они отсутствуют (Е-А-градиент, по Б. Клаусницеру [6]).

Особенности размещения гнездовых поселений и поведения серой вороны в пределах жилой зоны урбогеосистемы во многом зависят от характера градостроительной структуры. В связи с этим на территории каждого города Волгоградской области исследованы различные типы застройки: 1) одно- и двухэтажной индивидуальной; 2) двух- и трехэтажной; 3) пятиэтажной; 4) пяти- и девятиэтажной.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований получены данные о высоте расположения над землей гнезд серой вороны в пределах селитебной зоны городов Волгоградской области (табл. 1). Число учтенных гнезд – 575.

Таблица 1

Основные характеристики вариационного ряда высоты расположения гнезд серой вороны в пределах жилой зоны городов Волгоградской области

Город	Высота расположения гнезд, м				Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %	Число гнезд
	Среднее арифметическое	Минимальная	Максимальная	Среднее геометрическое			
Волжский	13,31	6	27	9,289	3,783	28,4	433
Камышин	12,15	7	16	11,9	2,40	19,8	90
Михайловка	12,96	9	18	12,76	2,44	18,8	32
Палласовка	12	8	16	11,6	2,805	23,4	20

Установлено, что средняя высота расположения гнезд серой вороны над землей в различных районах селитебной зоны зависит от высоты застройки. В связи с этим для каждого района

(квартала, микрорайона) жилой зоны исследуемых городов рассчитано значение средней высоты застройки. Данный параметр определен по формуле

$$h_{\bar{n}\bar{o}} = \frac{\sum_{I=1}^N h_I \cdot S_I}{\sum_{I=1}^N S_I}, \quad (1)$$

где h_{cp} – средняя высота застройки данного района, м; h_I – высота i -го здания, м; S_I – площадь территории под i -м зданием, м²; N – число зданий в данном районе (табл. 2).

Рассчитан коэффициент корреляции, позволяющий оценить характер и степень взаимосвязи между средней высотой застройки различных районов селитебной зоны города и средней высотой расположения гнезд серой вороны над землей. Выявленная связь между изучаемыми явлениями является статистической значимой, по степени проявления для г. Волжского – тесной; г. Камышина – средней; г. Палласовка – средней.

Таблица 2

Средняя высота застройки для городов Волгоградской области

Город	Средняя высота застройки, м	Усредненная высота, м	Коэффициент корреляции
Волжский	5÷22	12,8	$r=0,809$ ($t=9,022$; $p<0,01$)
Камышин	5÷26	8,5	$r=0,641$ ($t=3,233$; $p<0,01$)
Палласовка	5÷16	5,3	$r=0,633$ ($t=2,164$; $p<0,1$)

В зависимости от значения средней высоты застройки селитебную зону каждого из городов Волгоградской области можно разбить на четыре района: зона индивидуальной застройки (средняя высота до 6 м); район малоэтажной (двух- и трехэтажной) застройки – средняя высота 6÷10 м; район среднеэтажной (пятиэтажной) застройки – средняя высота 10÷16 м; район многоэтажной (смешанной пяти- и девятиэтажной) застройки – средняя высота более 16 м.

Высота застройки в различных районах селитебной зоны является показательным количественным критерием изменения высоты расположения

гнезд серой вороны. Зная значение средней высоты застройки, можно отнести каждый участок селитебной зоны к районам с той или иной высотой расположения гнезд серой вороны (табл. 3).

Данные, приведенные в табл. 3, показывают, что в разных городах один и тот же тип застройки характеризуется различными значениями средней высоты расположения гнезд над землей. Это свидетельствует о том, что средняя высота расположения гнезд серой вороны зависит также от высотных характеристик древесных насаждений в том или ином районе селитебной зоны.

Таблица 3

Районирование жилой зоны городов Волгоградской области по величине высоты расположения гнезд серой вороны

Город	Средняя высота расположения гнезд, м			
	Индивидуальная застройка	Малоэтажная застройка	Среднеэтажная застройка	Многоэтажная застройка
Волжский	<10	<10	10–14	>14
Камышин	<11	<11	11–13	>13
Михайловка	<10	10–14	>14	–*
Палласовка	<10	10–14	>14	–

* – прочерк в графе таблицы означает, что в городе данный тип застройки отсутствует.

Таким образом, одной из форм изменения структуры гнездовых поселений серой вороны в городах Волгоградской области под влиянием фактора урбанизированности территории (критерием которой выступает высота застройки жилой зоны) является увеличение высоты расположения гнезд над землей в пределах более урбанизированных районов.

В результате проведенных исследований получены данные о плотности расположения жилых гнезд серой вороны в различных районах селитеб-

ной зоны городов Волгоградской области (табл. 4). Число учтенных жилых гнезд – 315.

Для каждого города установлено, что значение плотности населения, проживающего в том или ином районе селитебной зоны, может служить показательным критерием плотности гнездования серой вороны в этом районе. Для различных районов (кварталов, микрорайонов) жилой зоны г. Волжского значение плотности проживающего населения варьирует в диапазоне от 25 до

380 чел/га (усредненное значение для селитебной зоны города – 210 чел/га); г. Камышина – от 25 до 272 чел/га (усредненное значение – 90 чел/га);

г. Михайловка – от 35 до 235 чел/га (усредненное значение – 60 чел/га); г. Палласовка – от 20 до 192 чел/га (усредненное значение – 25 чел/га).

Таблица 4

Плотность размещения жилых гнезд серой вороны в пределах жилой зоны городов Волгоградской области

Город	Волжский	Камышин	Михайловка	Палласовка
Среднее значение, гнезд/га	0,21	0,07	0,01	0,02

В зависимости от плотности проживающего населения все микрорайоны и квартала селитебной зоны городов Волгоградской области разбиты на несколько групп (табл. 5).

Выделенные группы районов селитебной зоны городов соответствуют четырем типам застройки. Районы индивидуальной застройки характеризуются очень низкой плотностью проживающего населения (до 50 чел/га).

Плотность населения в различных районах селитебной зоны города является показательным количественным критерием изменения плотности размещения жилых гнезд серой вороны. Зная значение плотности населения, можно отнести каждый участок селитебной зоны к районам с тем или иным значением плотности расположения гнезд серой вороны (табл. 6).

Таблица 5

Структура жилой зоны городов Волгоградской области в зависимости от плотности проживающего населения, %

Город	Доля территории со средней плотностью проживающего населения, чел/га:			
	до 50	от 50 до 180	от 180 до 250	более 250
Волжский	12,7	16,5	38,8	32
Камышин	69	3,3	16,2	11,5
Михайловка	83	8,5	8,5	—*
Палласовка	91	8,2	0,8	—

* – прочерк в графе таблицы означает, что в городе данный тип застройки отсутствует.

Таблица 6

Районирование жилой зоны городов Волгоградской области по величине плотности расположения гнезд серой вороны

Город	Плотность размещения жилых гнезд, гнезд/га			
	Индивидуальная застройка	Многоэтажная застройка	Среднеэтажная застройка	Малоэтажная застройка
Волжский	<0,05	0,05–0,2	0,2–0,4	>0,4
Камышин	<0,05	0,05–0,25	0,25–0,4	>0,4
Михайловка	<0,05	—*	0,05–0,2	>0,2
Палласовка	<0,05	—	0,05–0,2	>0,2

* – прочерк в графе таблицы означает, что в городе данный тип застройки отсутствует.

Анализ данных табл. 5, 6 позволяет сделать следующие выводы. В городах Волгоградской области плотность расположения жилых гнезд серой вороны в районе индивидуальной застройки меньше, чем во всех других районах селитебной зоны. Поскольку в небольших городах возрастает доля территории селитебной зоны, которая занята индивидуальной застройкой, то значения средней плотности гнездования серой вороны уменьшаются в ря-

ду: Волжский > Камышин > Михайловка, Палласовка. Выявленная закономерность может быть объяснена интенсификацией фактора беспокойства в районе индивидуальной застройки, где основная часть древесных насаждений расположена в пределах индивидуальных участков. Кроме того, в районе индивидуальной застройки каждого города преобладают относительно невысокие (до 5–10 м высоты) древесные насаждения (яблоня, груша,

абрикос, вишня), которые менее предпочтительны для гнездования серой вороны.

Для селитебной зоны города, не включающей район индивидуальной застройки, выявлен другой характер взаимосвязи между плотностью проживающего населения и средней плотностью размещения жилых гнезд серой вороны. В районах с высокой плотностью населения плотность гнездования серой вороны уменьшается. Рассчитан коэффициент корреляции, позволяющий оценить характер и степень взаимосвязи между плотностью гнездования серой вороны и плотностью населения в селитебной зоне города, не включающей район индивидуальной застройки. Значение коэффициента для городов Волжский $r = -0,704$ ($t = 6,501$; $p < 0,01$), Камышин – $r = -0,634$ ($t = 3,177$; $p < 0,01$), Михайловка – $r = -0,715$ ($t = 2,365$; $p < 0,05$), Палласовка – $r = -0,592$ ($t = 1,943$; $p < 0,1$). Установленная закономерность снижения плотности гнездования серой вороны при увеличении плотности проживающего

населения может быть объяснена интенсификацией фактора беспокойства в более урбанизированных районах жилой зоны города. Кроме того, в пределах наиболее урбанизированной части селитебной зоны города с высокой плотностью населения доля территории, занятая древесными насаждениями (и число деревьев, подходящих для устройства гнезд), как правило, ниже по сравнению с менее урбанизированными участками. Вследствие этого плотность расположения гнезд серой вороны уменьшается.

Таким образом, одной из форм изменения структуры гнездовых поселений серой вороны в городах под влиянием фактора беспокойства является уменьшение плотности размещения жилых гнезд в пределах индивидуальной застройки, а также в наиболее плотно заселенных районах многоэтажной застройки.

Получены данные о величинах дистанции вспугивания серой вороны в различных районах жилой зоны городов Волгоградской области (табл. 7).

Таблица 7

Средние значения дистанции вспугивания серой вороны в пределах жилой зоны городов Волгоградской области

Город	Волжский	Камышин	Михайловка	Палласовка
Среднее значение дистанции вспугивания, м	6,5	7	8	15

Установлено, что среднее значение дистанции вспугивания серой вороны в различных районах жилой зоны города зависит от плотности проживающего населения. Рассчитан коэффициент корреляции, позволяющий оценить характер и степень взаимосвязи между значением плотности проживающего населения в различных районах жилой зоны и средним значением дистанции вспугивания серой вороны. Для городов Волжский $r = -0,620$ ($t = 3,350$; $p < 0,01$), Камышин – $r = -0,931$ ($t = 4,419$; $p < 0,05$). Выявленная связь между изучаемыми явлениями является статистически значимой, по степени проявления для Волжского – умеренной, Камышина – тесной.

Таким образом, одной из форм изменения поведения серой вороны в городах под влиянием фактора урбанизированности территории (критерием которой выступает плотность проживающего населения) является уменьшение дистанции вспугивания в пределах более урбанизированных районов.

Плотность населения в различных районах жилой зоны является показательным количественным критерием изменения дистанции вспугивания серой вороны. Зная значение плотности населения, можно отнести анализируемый участок жилой зоны города к районам с тем или иным уровнем проявления толерантности серой вороны к фактору беспокойства (табл. 8).

Таблица 8

Районирование жилой зоны городов Волгоградской области по величине дистанции вспугивания серой вороны

Город	Значение дистанции вспугивания, м			
	Индивидуальная застройка	Малоэтажная застройка	Среднеэтажная застройка	Многоэтажная застройка
Волжский	>12	8–12	5–8	<5
Камышин	>12	8–12	5–8	<5
Михайловка	>12	8–12	<8	–*
Палласовка	>15	10–15	<10	–

* – прочерк в графе таблицы означает, что в городе данный тип застройки отсутствует.

Заключение

Таким образом, в данной работе проанализирован характер влияния градостроительной структуры на особенности размещения гнездовых поселений и поведения серой вороны в городах Волгоградской области различной величины. В пределах каждого города в зависимости от степени урбанизированности территории селитебной зоны изменяются средняя высота расположения гнезд, плотность гнездования и дистанция вспугивания птиц. Поэтому, если известны количественные параметры градостроительной структуры (средняя высота застройки, плотность населения, удельный вес индивидуальной застройки в площади селитебной зоны), на основании выявленных закономерностей можно сделать вывод об особенностях размещения гнездовых поселений и поведения серой вороны.

В районах селитебной зоны с большей величиной средней высоты застройки увеличивается средняя высота расположения гнезд серой вороны. В районах селитебной зоны с меньшей величиной плотности населения увеличивается дистанция вспугивания птиц. По мере увеличения удельной доли индивидуальной застройки в площади селитебной зоны городов Волгоградской области уменьшается средняя плотность гнездования серой вороны.

Литература

1. Ушаков В.А., Ушаков А.В. Некоторые особенности гнездования сороки в Нижнем Новгороде // Экология врановых птиц в антропогенных ландшафтах: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Саранск, 2002. С. 124–126.
2. Константинов В.М. Врановые птицы как модель синантропизации и урбанизации // Экология врановых птиц в антропогенных ландшафтах: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Саранск, 2002. С. 9–12.
3. Макаров В.З., Новаковский Б.А., Чумаченко А.Н. Эколого-географическое картографирование городов. М., 2002. 163 с.

4. Сухоносенко Д.С. Исследование влияния характера градостроительной структуры на особенности гнездовой экологии и поведения серой вороны (*Corvus cornix*) в пределах селитебной зоны города Волжского // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2014. № 2. С. 67–72.
5. Атлас Волгоградской области / под ред. А. Г. Ляховой. М., 1967. 32 с.
6. Klausnitzer B., Richter K. Veränderungen tropischer Strukturen bei unterschiedlich urban beeinflussten Arthropodengesellschaften // Tag. ber. 2. Leipziger Symp. urb. Ökologie. 1984. P. 19–24.

References

1. Ushakov V.A., Ushakov A.V. [Some features magpies nesting in Nizhny Novgorod]. *Ekologiya vranovykh ptits v antropogennykh landshaftakh* [Ecology corvids in anthropogenic landscapes]. The collection of materials of the International scientific and practical conference. Saransk, 2002, pp. 124–126.
2. Konstantinov V.M. [Corvids as a model and urbanization synanthropization]. *Ekologiya vranovykh ptits v antropogennykh landshaftakh* [Ecology corvids in anthropogenic landscapes]. The collection of materials of the International scientific and practical conference. Saransk, 2002, pp. 9–12.
3. Makarov V.Z., Novakovskii B.A., Chumachenko A.N. *Ekologo-geograficheskoe kartografirovaniye gorodov* [Ecological and geographical mapping of cities]. Moscow, 2002, 163 p.
4. Sukhonosenko D.S. Issledovanie vliyaniya kharaktera gradostroitel'noi struktury na osobennosti gnezdovoi ekologii i povedeniya seroi vorony (*Corvus cornix*) v predelakh selitebnoi zony goroda Volzhskogo [Investigation of the effect on the character of urban structures especially breeding ecology and behavior of hooded crows (*Corvus cornix*) within the residential zone of the Volzhskiy]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*, 2014, no 2, pp. 67–72.
5. *Atlas Volgogradskoi oblasti* [Atlas of the Volgograd region]. Ed. A.G. Lyakhova. Moscow, 1967, 32 p.
6. Klausnitzer B., Richter K. Veränderungen tropischer Strukturen bei unterschiedlich urban beeinflussten Arthropodengesellschaften. *Tag. ber. 2. Leipziger Symp. urb. Ökologie*, 1984, pp. 19–24.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 551.510.42:547.211

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-83-89

ОЦЕНКА ЭМИССИИ МЕТАНА ВОДНЫМИ ОБЪЕКТАМИ
РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ*

© 2015 г. Д.Н. Гарькуша, Ю.А. Фёдоров, Н.С. Тамбиева, М.Л. Крукиер, И.В. Калманович

Гарькуша Дмитрий Николаевич – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, старший преподаватель, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов н/Д, 344090, e-mail: gar-dim1@yandex.ru

Федоров Юрий Александрович – доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов н/Д, 344090, e-mail: fedorov@sfedu.ru

Тамбиева Наталья Сергеевна – старший научный сотрудник, Гидрохимический институт, пр. Стачки, 198, г. Ростов н/Д, 344090, e-mail: ghi4@aanet.ru

Крукиер Михаил Львович – аспирант, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, Ростов н/Д, 344090, e-mail: krukier@aanet.ru

Калманович Ирина Валерьевна – студентка, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов н/Д, 344090, e-mail: ira140594@yandex.ru

Gar'kusha Dmitrii Nikolaevich – Candidate of Geographical Science, Senior Researcher, Senior Lecturer, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: gardim1@yandex.ru

Fedorov Yurii Aleksandrovich – Doctor of Geographical Science, Professor, Chief Researcher, Head of Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: fedorov@sfedu.ru

Tambieva Natal'ya Sergeevna – Senior Researcher, Hydrochemical Institute, Stachki St., 198, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: ghi4@aanet.ru

Krukier Mikhail Lvovich – Post-Graduate Student, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: krukier@aanet.ru

Kalmanovich Irina Valer'evna – Student, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: ira140594@yandex.ru

Для определения эмиссии метана водными экосистемами Ростовской области использована широко известная отечественным и зарубежным ученым, занимающимся данной проблематикой, формула, которая аппроксимирует зависимость между концентрацией метана в поверхностном слое воды и его потоком в атмосферу. Согласно расчетам, суммарная эмиссия метана водными объектами Ростовской области составляет около 137 тыс. м³ в сутки, или 11 % от общей эмиссии природными и антропогенными источниками области. Наибольший вклад в эмиссию метана региона вносят реки (42 %) и Таганрогский залив (33 %), вклад водохранилищ и озер составляет 20 и 5 % соответственно.

Ключевые слова: Ростовская область, водные объекты, метан, содержание, эмиссия.

To determine the methane emissions from aquatic ecosystems of the Rostov Region is used widely well-known domestic and foreign scholars dealing with this issue, the formula, which approximates the dependence between the concentration of methane in the surface water and its flow into the atmosphere. According to calculations, the total methane emission water ecosystems of the Rostov Region is about 137 thousand m³ per day or 11 % of the total emissions of natural and anthropogenic sources in the area. The largest contribution to the emission of methane in the region make the river (42 %) and the Taganrog Bay (33 %), the contribution of reservoirs and lakes is 20 and 5 %, respectively.

Keywords: Rostov Region, water ecosystems, methane, concentration, emission.

На современном этапе развития цивилизации одна из актуальных экологических проблем – глобальное изменение климата. Климатическая система Земли включает атмосферу, гидросферу, биосферу и лито-

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта НШ-5548.2014.5, проектов № 1334, 5.1848.2014/К.

сферу. Параметрами состояния климатической системы являются температура, атмосферные осадки, атмосферная и почвенная влага, снежный покров, протяженность континентального и морского льда, уровень моря, экстремальные метеорологические явления, циркуляция между атмосферой и океаном, характеристики среды обитания растений и животных. Климат Земли был всегда изменчив. Для него характерны как коротко-, так и долговременные перманентные колебания – от десятилетий до тысяч и даже миллионов лет. С начала промышленной революции (примерно с 1850 г.) изменение климата происходит ускоренными темпами, что связывается в основном с деятельностью человека. Все глобальные и региональные экологические проблемы напрямую или косвенно связаны между собой и с изменением климата. Основной причиной наблюдаемых климатических пертурбаций, по мнению большинства ученых, является увеличение содержания в атмосфере Земли парниковых газов (диоксида углерода, метана, закиси азота, галоидуглеродов, в том числе хлорфторуглеродных; некоторые исследователи относят к ним и пары воды), среди которых вторым по значимости является метан. Эти газы (за исключением сугубо техногенных) могут быть как естественного (природного), так и техногенного происхождения. Как известно, природная составляющая этих газов содержится в атмосфере (менее 1 %). Однако этого достаточно, чтобы создать «естественный парниковый эффект», который позволяет сохранять на планете температуру примерно на 30 °C выше той, которая была бы в случае его отсутствия. Это исключительно важно для земной жизни в той форме, в которой она существует [1]. Подчеркнем, что авторы не являются приверженцами какого-либо одностороннего подхода к объяснению причин глобального изменения климата и стоят на позиции, согласно которой этот феномен рассматривается как отклик глобальной экосистемы Земли на аддитивное однонаправленное воздействие на неё природных и антропогенных факторов и процессов [2, 3].

Вклад России в изменение газового баланса атмосферы остается дискуссионным. Основное противоречие заключается в подходах к расчетам эмиссионных и стоковых потоков парниковых газов. Для РФ глобальное потепление климата несет в себе не только отрицательные, но и положительные эффекты. При этом оценки общего сальдо крайне противоречивы. В основном это связано с некорректными прогностическими экологическими и экономическими оценками [4]. Гидросфера является не только поглотителем метана, буфером, но и его источником. Как показано в [5–11 и

др.], основным источником современного биогенного метана в гидросфере служат донные отложения, из которых газ, проходя через водную толщу, выделяется в атмосферу. При благоприятном развитии углеродного рынка в РФ (торговля квотами на выбросы парниковых газов) возникнет необходимость проведения дифференцированной оценки природной и антропогенной эмиссии метана наземными и водными экосистемами на различных уровнях – от регионального до межгосударственного. Таким образом, изучение распределения концентраций и оценка потоков метана в гидросфере Земли на глобальном, региональном и локальном уровнях имеет не только научное, но и прикладное значение.

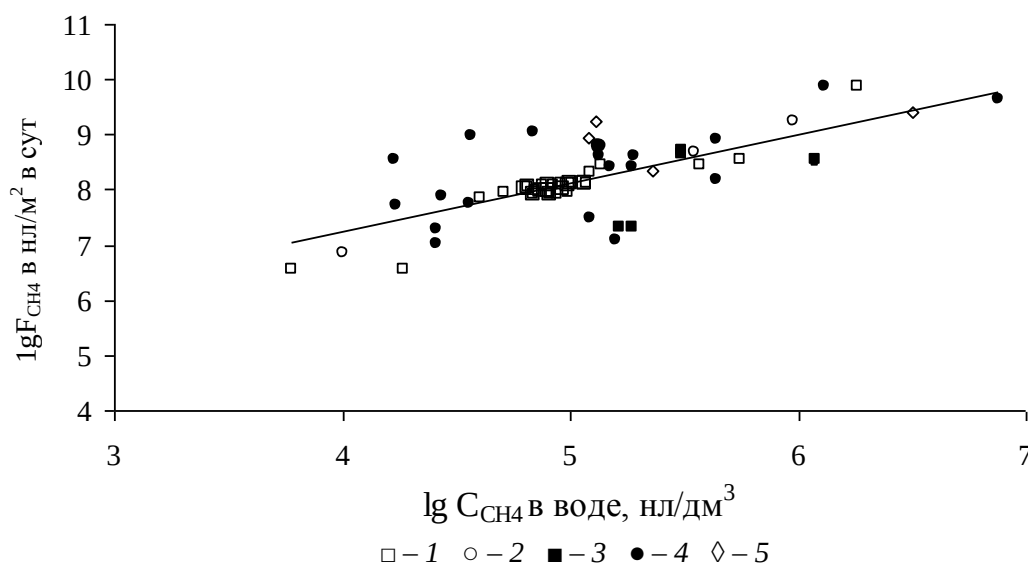
Основной целью настоящего исследования является оценка суммарной эмиссии метана в атмосферу водными объектами Ростовской области.

Материалы и методы исследований

Для достижения цели авторами на основе собственных картографических измерений установлена площадь водоёмов и водотоков, расположенных в пределах области, собраны и обобщены опубликованные [6, 11] и оригинальные данные авторов по концентрациям метана в их водной толще, для каждого водного объекта рассчитаны потоки метана с их поверхности в атмосферу.

Расчет основных морфологических характеристик (длина, ширина, площадь) и потоков метана с поверхности водоёмов и водотоков (Таганрогский залив, Цимлянское водохранилище, реки Дон, Северский Донец и др.), расположенных в пределах нескольких субъектов Российской Федерации и сопредельных государств, производился только для акваторий водных объектов, находящихся в границах Ростовской области.

Для определения эмиссии метана в атмосферу использована широко известная отечественным и зарубежным ученым, занимающимся данной проблематикой, формула, которая получена авторами [6, 11] на основе серии натурных замеров потоков метана камерным методом на различных водных объектах Ростовской области (реки Дон, Темерник, Мертвый Донец и Таганрогский залив). Данная формула аппроксимирует зависимость между концентрацией метана в поверхностном слое воды и его потоком в атмосферу (рисунок). Формула показала свою универсальность и адекватность также на примере водно-болотных ландшафтов Архангельской [12] и Псковской областей [3] и очистных сооружений Ростовской станции аэрации [13].



Зависимость эмиссии метана в атмосферу от его концентрации в поверхностном слое воды: 1 – реки Дон, Мёртвый Донец и Темерник; 2 – очистные сооружения и иловые площадки Ростовской станции аэрации; 3 – Иласский болотный массив; 4 – Полистово-Ловатская болотная система; 5 – Радиловский болотный массив

Уравнение регрессии, аппроксимирующее зависимость между концентрацией метана в поверхностном слое воды и его потоком в атмосферу, имеет вид $\lg F_{\text{CH}_4} = 0,8763 \cdot \lg C_{\text{CH}_4} + 3,7384$ ($r = 0,72$; $n = 65$; $p < 0,01$), где $\lg F_{\text{CH}_4}$ – логарифм потока метана из воды в атмосферу, нл/м² в сут; $\lg C_{\text{CH}_4}$ – логарифм концентрации метана в воде, нл/дм³.

Результаты исследований и их обсуждение

Содержание метана в воде водных объектов Ростовской области изменяется в пределах от 0,48 до 2445,7 мкл/л, в среднем составляя 52,1 мкл/л (таблица). Максимальные содержания метана наблюдаются в воде рек Темерник (в среднем 186,4 мкл/л), Глубокая (157,3 мкл/л), Мертвый Донец (91,2 мкл/л), Морской Чулек (90,4 мкл/л), Кизитеринка (84,6 мкл/л) и протоки Аксай (73,5 мкл/л), что обусловлено главным образом сбросом в эти водотоки промышленно-бытовых и хозяйственных сточных вод, содержащих лабильные органические вещества, которые при последующем разложении до более простых веществ (Н₂, СО₂, ацетат, метанол, формиат, метиламины) могут быть использованы метанообразующими археями для генерации метана [11, 14].

Среди водоёмов максимальными концентрациями метана в воде характеризуются такие озера, как Атаманское (среднее содержание – 89,3 мкл/л) и Пелёнкино (62,2 мкл/л), а также некоторые пруды.

В среднем наиболее высокие концентрации метана характерны для рек (55,7 мкл/л), несколько меньшие – для озёр (42,3 мкл/л) и водохранилищ (39,0 мкл/л). Минимальные концентрации газа установлены в воде Таганрогского залива (в среднем 10,3 мкл/л), что связано главным образом с уменьшением скорости продукции метана в верхних горизонтах донных отложений вследствие перехода от пресноводной структуры зональности микробиологических процессов в донных осадках к морской [5, 6, 8, 11].

Расчеты (по средним концентрациям СН₄) показали, что суммарная эмиссия метана водными объектами Ростовской области составляет 137,3 тыс. м³ в сутки (или 96,1 т/сут). В данную величину наибольший вклад вносят реки – 42 % и Таганрогский залив – 33 %, на водохранилища и озера приходится 20 и 5 % соответственно.

Наибольший вклад в суммарную эмиссию метана реками вносят Дон (9 %), Сал (3 %) и Северский Донец (2 %); озерами – Маныч-Гудило (97,5 %), водохранилищами – Цимлянское и Пролетарское водохранилища (55 и 30 % соответственно).

Согласно опубликованной ранее оценке [15], общая эмиссия метана природными и антропогенными источниками Ростовской области составляет 458 млн м³ в год. Доминирующий вклад, по данным оценкам, вносят свалки ТБО (30,8 %), угольные шахты (25,5 %), очистные сооружения

канализации городов и поселков (13,2 %) и животноводство (13,1 %). На водные экосистемы приходится 75,4 млн м³ в год (16,5 %) или около 207 тыс. м³ в сутки, что в 1,5 раза (или на 70 тыс. м³) больше рассчитанной в данной работе величины.

Концентрация метана в воде и его потоки в атмосферу с поверхности водоёмов и водотоков Ростовской области

Водный объект	Площадь S, км ²	Содержание CH ₄ в воде, мкл/л *	Поток CH ₄	
			мкг/м ² в сут	на всю S, м ³ в сут
Таганрогский залив в пределах области	2480	0,72–113,1 (10,3)	12587,7	44596,4
<i>Реки</i>				
Азовка	0,110	25,7–72,5	47427,9	7,5
Аксай	0,632	21,4–145,8 (73,5)	70436,5	63,6
Аюта	0,408	4,3–11,6 (7,8)	9865,9	5,8
Безымянный	0,007	55,7	55244,8	0,6
Большой Гашун	1,127	12,4–28,5 (18,7)	21228,1	34,2
Большой Егорлык	0,200	33,6–58,1 (42,3)	43406,9	12,4
Большая Крепкая	0,266	11,1–39,6 (24,0)	26416,6	10,1
Большой Несветай	0,568	55,7	55244,8	44,8
Быстрая	6,540	55,7	55244,8	516,2
Глубокая	1,230	99,2–274,4 (157,3)	137212	241,1
Грузская	0,150	8,8–17,5 (11,3)	13652,5	2,9
Грушевка	0,225	9,3–43,5 (24,3)	26705,8	8,6
Дон в пределах области	80	8,3–208,8 (44,9)	45736,3	5227,0
Донской Чулек	0,520	55,7	55244,8	41,1
Западный Маныч	10,95	2,9–41,5 (31,5)	33524,9	524,4
Зимовная	0,272	55,7	55244,8	21,5
Кавалерка	1,0	55,7	55244,8	78,9
Кагальник (в Азовское море)	2,430	2,6–107,2 (58,2)	57411,6	199,3
Кагальник (в Дон)	1,170	55,7	55244,8	92,4
Калитва	4,620	22,6–73,9 (38,9)	40334,0	266,2
Каменка	0,365	42,1–83,4 (65,2)	63420,0	33,1
Кизитеринка	0,012	56,7–120,6 (84,6)	79680,5	1,37
Крынка	0,700	55,7	55244,8	55,3
Куго-Ея	0,918	55,7	55244,8	72,5
Кумшак	4,840	55,7	55244,8	382,0
Кундрючья	3,210	17,1–92,6 (48,0)	48491,9	222,4
Куртлак	0,504	55,7	55244,8	39,8
Левый Тузлов	0,290	55,7	55244,8	22,9
Лихая	1,155	55,7	55244,8	91,2
Малая Куберле	3,80	6,7–21,0 (12,9)	15332,3	83,2
Малый Несветай	0,576	55,7	55244,8	45,5
Мертвый Донец	0,450	8,3–230,0 (91,2)	85102,2	54,7
Митякинка	0,250	55,7	55244,8	19,7
Миус	3,750	40,5–61,1 (50,8)	50962,0	273,0
Мокрая Грязнуха	0,132	55,7	55244,8	10,4
Мокрая Чубурка	1,875	55,7	55244,8	148,0
Мокрый Чалтырь	0,225	49,8–97,3 (77,0)	73372,0	23,6
Морской Чулек	0,260	68,7–117,5 (90,4)	84447,7	31,4
Нижнее Провалье	0,096	55,7	55244,8	7,6
Песковатка	0,420	55,7	55244,8	33,2
Подпольная	0,689	21,5–65,7 (43,6)	44573,8	43,9
Правый Тузлов	0,090	55,7	55244,8	7,1
Росошь	0,047	55,7	55244,8	3,7

Окончание таблицы

Водный объект	Площадь S, км ²	Содержание CH ₄ в воде, мкл/л *	Поток CH ₄	
			мкг/м ² в сут	на всю S, м ³ в сут
Сал	27,93	21,4–75,6 (45,3)	46093,1	1839,1
Салантырь	0,084	55,7	55244,8	6,6
Самбек	0,288	33,8–82,1 (48,5)	48934,3	20,1
Северский Донец в пределах области	21,85	2,5–65,8 (36,7)	38327,9	1196,4
Средний Егорлык	3,225	25,9–116,0 (58,3)	57498,1	264,9
Средний Тузлов	0,070	55,7	55244,8	5,5
Сусат	0,504	17,5–64,3 (47,8)	48314,9	34,8
Сухой Керчик	0,054	55,7	55244,8	4,3
Сухой Несветай	0,651	55,7	55244,8	51,4
Сухой Чалтырь	0,540	55,7	55244,8	42,6
Темерник	0,355	4,7–2445,7 (186,4)	159217	80,8
Тузлов	4,675	19,9–138,0 (60,3)	59222,9	395,5
Цимла	0,180	24,5–56,0 (38,9)	40334,0	10,4
Чертановка	0,165	55,7	55244,8	13,0
Чир	6,545	55,7	55244,8	516,5
Эльбузд	0,310	48,1–225,9 (63,2)	61711,5	27,3
<i>Итого по рекам</i>	204,51	2,5–2445,7 (55,7)	54665,2	58212,8
<i>Озера</i>				
Атаманское	0,360	52,4–360,0 (89,3)	83546,7	43,0
Маныч-Гудило	344,0	5,6–18,8 (10,5)	12801,7	6291,1
Грузское	8,250	3,4–15,8 (7,3)	9309,5	109,7
Пелёнкино	0,020	55,6–67,9 (62,2)	60855,1	1,74
<i>Итого по озерам</i>	352,63	3,4–360,0 (42,3)	41628,3	6445,5
<i>Водохранилища и пруды</i>				
Цимлянское	884	1,7–53,9 (10,1)	12373,3	15625,7
Пролетарское	798,0	1,8–7,9 (5,7)	7495,0	8544,3
Веселовское	238,0	2,5–10,2 (8,8)	10966,0	3728,4
Ростовское море	0,500	5,9–70,8 (25,6)	27953,7	20,0
Артёмовское, г. Шахты	0,500	1,05–10,9 (5,4)	7148,2	5,1
Соколовское на р. Кундрючья	0,300	15,7–33,2 (21,5)	23989,1	10,3
Пруд шахты «Наклонная»	0,005	36,0–52,0 (44,0)	44932,0	0,35
Пруд шахты «Аюта»	0,225	0,48–231,8 (152,6)	133612,0	43,0
Пруд шхт. «Южная»	0,011	0,98	1602,2	0,03
Пруд вблизи Ростовской АЭС	0,350	44,4–185,5 (115,0)	104277,0	52,1
<i>Итого по водохранилищам</i>	1922	0,48–231,8 (39,0)	37433,8	28029,3
<i>Итого по водным объектам в целом</i>	4960	0,48–2445,7 (52,1)	51762,9	137284

* – приведены пределы изменения и средние (в скобках) концентрации метана в воде. Концентрации метана, выделенные курсивом, рассчитаны как среднее арифметическое значение для рек Ростовской области

Более низкие величины суммарной эмиссии метана, полученные в настоящей работе, обусловлены тем, что расчет потоков производился только для акваторий водных объектов, находящихся в пределах Ростовской области, а в ранее опубликованной работе [15] расчет потоков для Таганрогского залива, Цимлянского водохранилища, рек Дон и Северский Донец велся с учетом всей площади их акватории. Помимо этого, в настоящей работе расчет потоков метана проводился индивидуально для каждого водного объекта, в то время как в ранее опубликованной работе выполнен более обобщенный расчет. Поэтому приведенная в данной работе оценка эмиссии метана является более точной.

Заключение

Концентрация метана в воде водных объектов Ростовской области варьирует в пределах от 0,48 до 2445,7 мкл/л, в среднем составляя 52,1 мкл/л. Максимальные измеренные концентрации газа в воде среди рек Ростовской области наблюдаются в реках Темерник, Глубокая и Мертвый Донец, среди озер – Атаманское и Пеленкино. Среднее содержание метана для рек Ростовской области составляет 55,7 мкл/л, для озер – 42,3, для водохранилищ – 39,0. Минимальные концентрации (в среднем 10,3 мкл/л) характерны для вод Таганрогского залива. Появление экстремально высоких

концентраций метана в водных объектах является следствием антропогенного загрязнения. Суммарная эмиссия метана водными объектами Ростовской области составляет около 137 тыс. м³ в сут, или 11 % от общей эмиссии природными и антропогенными источниками области. Наибольший вклад вносят реки (42 %) и Таганрогский залив (33 %), вклад водохранилищ и озер составляет 20 и 5 % соответственно.

Литература

1. Руководство к публикации МГЭИК «Изменение климата 2001: Смягчение последствий»: пер. с англ. М., 2011. 27 с.
2. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Крукиер М.Л. Температура и ее влияние на эмиссию метана из водных объектов (по результатам экспериментального и математического моделирования) // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2012. № 6. С. 99–101.
3. Фёдоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Шипкова Г.В. Эмиссия метана торфяными залежами верховых болот Псковской области // География и природные ресурсы. 2015. № 1. С. 88–97.
4. Федоров Ю.А., Овсепян А.Э., Бэллинджер О.Ю. Экологический аудит и сертификация: учебник. Ростов н/Д., 2014. 181 с.
5. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А. Метан в воде и донных отложениях устьевой области Северной Двины в зимний период // Океанология. 2014. Т. 54, № 2. С. 178–188.
6. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А. Метан в устьевой области реки Дон. Ростов н/Д.; М., 2010. 181 с.
7. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А. Особенности распределения содержания метана в прибрежных участках Петрозаводской губы Онежского озера // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 3. С. 288–297.
8. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Хромов М.И. Метан в воде и донных отложениях устьевой области Северной Двины (Белое море) // Океанология. 2010. Т. 50, № 4. С. 534–547.
9. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н. Влияние природных и антропогенных факторов и процессов на распределение концентрации метана в воде и донных отложениях Ладожского озера // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2006. № 5. С. 412–424.
10. Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н. Метан как показатель экологического состояния пресноводных водоёмов (на примере озёр Валдай и Ужин) // Метеорология и гидрология. 2004. № 6. С. 88–96.
11. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. 2-е изд., перераб. и доп. Ростов н/Д.; М., 2007. С. 179–230.
12. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Хромов М.И. Эмиссия метана с торфяных залежей Иласского болотного массива Архангельской области // Изв. Рус. геогр. общества. 2008. Т. 140, вып. 5. С. 40–48.
13. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Плигин А.С. Эмиссия метана на основных этапах технологического цикла очистки сточных вод канализации Ростовской станции

аэрации (по экспериментальным данным) // Метеорология и гидрология. 2011. № 7. С. 40–48.

14. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Метан как индикатор условий раннего диагенеза и экологического состояния водных экосистем // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2013. № 6. С. 78–82.
15. Фёдоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Трофимов М.Е. Метан городских агломераций и его вклад в общую эмиссию (на примере Ростовской области) // Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон: тр. 3-й Междунар. науч. конф. СПб., 2005. С. 51–52.

References

1. *Rukovodstvo k publikatsii MGEIK «Izmenenie klimata 2011: Snyagchenie posledstviy»* [Guide to the publications of the IPCC «Climate Change 2001: Mitigation»]. Translation from English. M., 2011, 27 p.
2. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Krukiyer M.L. Temperatura i ee vliyanie na emissiyu metana iz vodnykh ob'ektov (po resul'tatam experimental'nogo i matematicheskogo modelirovaniya [Temperature and its influence on the emission of methane from water bodies (according to the results of experimental and mathematical modeling)]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*, 2012, no 6, pp. 99–101.
3. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Shipkova G.V. Emissiya metana torfyanymi zalezhami verkhovykh bolot Pskovskoi oblasti [Methane emission from peat deposits of raised bogs in Pskov oblast]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2015, no 1, pp. 88–97.
4. Fedorov Yu.A., Ovsepyan A.E., Bellindzher O.Yu. *Ekologicheskii audit i sertifikatsiya: uzhebnik* [Environmental audit and certification. Tutorial]. Rostov-on-Don, 2014, 181 p.
5. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A. Metan v vode i donnykh otlozheniyakh ust'evoi oblasti Severnoi Dviny v zimnii period [Methane in Water and Bottom Sediments of the Mouth Area of the Severnaya Dvina River during the Winter Time]. *Okeanologiya*, 2014, vol. 54, no 2, pp. 178–188.
6. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A. *Metan v ust'evoi oblasti reki Don* [Methane in the mouth area of the river Don]. Rostov-on-Don; Moscow, 2010, 181 p.
7. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A. Osobennosti raspredeleniya soderzhaniya metana v pribrezhnykh uchastkakh Petrozavodskoi guby Onezhskogo ozera [Distribution of Methane Concentration in Coastal Areas of the Gulf of Petrozavodsk, Lake Onega]. *Vodnye resursy*, 2015, vol. 42, no 3, pp. 288–297.
8. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Khromov M.I. Metan v vode i donnykh otlozheniyakh ust'evoi oblasti Severnoi Dviny (Beloe more) [Methane in the Water and Bottom Sediments of the Mouth Area of the Severnaya Dvina River (White Sea)]. *Okeanologiya*, 2010, vol. 50, no 4, pp. 534–547.
9. Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Gar'kusha D.N. Vliyanie prirodnkh i antropogennykh faktorov i protsessov na raspredelenie kontsetratsii metana v vode i donnykh otlozheniyakh Ladozhskogo ozera [The influence of natural and anthropogenic factors and processes on the distribution of methane concentration in water and bottom sediments of

- lake Ladoga]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2006, no 5, pp. 412-424.
10. Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Gar'kusha D.N. Metan kak pokazatel' ekologicheskogo sostoyaniya presnovodnykh vodoemov (na primere ozer Valdai i Uzhin) [Methane as an indicator of the ecological state of a freshwater reservoir (with a special reference to lakes Valdai and Uzhin)]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2004, no 6, pp. 88-96.
11. Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Gar'kusha D.N., Khoro-shevskaya V.O. *Metan v vodnykh ekosistemakh* [Methane in aquatic ecosystems]. 2-e izd., pererab. i dopolnennoe. Rostov-on-Don; Moscow, 2007, pp. 179-230.
12. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Khromov M.I. Emissiya metana s torfyanykh zalezhei Ilasskogo bolotnogo massiva Arkhangel'skoi oblasti [Methane emission from peat deposits Ilasskogo marsh Arkhangelsk Region]. *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo obshchestva*, 2008, vol. 140, no 5, pp. 40-48.
13. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Pligin A.S. Emissiya metana na osnovnykh etapakh tekhnologicheskogo tsikla o-chistki stochnykh vod kanalizatsii Rostovskoi stantsii aeratsii [Methane emission at the main stages of technological cycle of sewage waste water purification at Rostov-on-Don aeration station]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2011, no 7, pp. 40-48.
14. Gar'kusha D.N., Fedorov Yu.A., Tambieva N.S. Metan kak indikator uslovii rannego diagenesa i ekologicheskogo sostoyaniya vodnykh ekosystem [Methane as an indicator of the conditions of early diagenesis and the ecological state of aquatic ecosystems]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*, 2013, no 6, pp. 78-82.
15. Fedorov Yu.A., Gar'kusha D.N., Trofimov M.E. Metan gorodskikh aglomeratsii i ego vklad v obshchuyu emissiyu (na primere Rostovskoi oblasti) [Urban agglomerations methane and its contribution to overall emissions (on the example of the Rostov region)]. *Ecologicheskie i gidrometeorologicheskie problemy bol'shikh gorodov i promyshlennykh zon: trudy 3 Mezhdunar. nauch. conf. SaintPetersburg*, 2005, pp. 51-52.

УДК 626.87: 631.445.58

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-90-95

ЭКОМЕЛИОРАТИВНОЕ СОСТОЯНИЕ ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ В ПРИАРАКСИНСКОЙ ЗОНЕ НАХИЧЕВАНСКОЙ АВТОНОМНОЙ РЕСПУБЛИКИ

© 2015 г. М.Я. Искендеров

Искендеров Мамед Якуб-оглы – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория использования нетрадиционных вод, Азербайджанский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации, ул. И. Дадашова, 324, г. Баку, AZ 1130, e-mail: isgenderov 36@mail.ru

Iskenderov Mamed Yakub-ogly – Candidate of Agricultural Science, Leading Researcher, Laboratory of Use of Unconventional Water, Azerbaijan Hidrotechnical and Melloration Scientific Research Institute, I. Dadashov St., 324, Baku, AZ 1130, Azerbaijan, e-mail: isgenderov 36@mail.ru

Исследуется вопрос оценки экомелиоративного состояния земель в Приараксинской зоне Нахичеванской Автономной Республики (НАР). Экомелиоративное состояние земель оценено по степени засоления почвы, по глубине залегания уровня грунтовых вод и по их минерализации, а также по естественной и искусственной дренированности обследованной территории. Путём сравнения результатов ранее проведённых исследований (в 1962–1968 гг.) с результатами исследований, проведённых нами за 1981–2014 гг., установлено, что 16,11 тыс. га, или 31 % орошаемых земель, подвержены вторичному засолению, уровень грунтовых вод поднялся в 5–6 раз, минерализация их увеличилась в 2–10 раз по сравнению с исходными. Если в 1964 г. минерализация грунтовых вод на 62 % общей территории была до 1 г/л, то в 2014 г. на обследованной территории грунтовые воды с минерализацией до 1 г/л не наблюдались. На основании составленного общего водного баланса установлено, что в Приараксинской зоне степень дренированности территории крайне неудовлетворительна и отточность подземных вод нарушена. Поэтому расходная часть водного баланса формируется за счёт физического испарения. Пополнение запасов почвенных и грунтовых вод в годовом балансе составляет около 700 м³/га, что приводит к подъёму уровня грунтовых вод, повышению их минерализации и тем самым к засолению почв. Коротко излагаются причины, способствующие ухудшению экомелиоративного состояния земель.

Ключевые слова: засоление, почва, уровень грунтовых вод, минерализация, дренированность, водный баланс, водохранилище, напор, экомелиоративное состояние земель, оценка.

The article is dedicated to assessment of eco reclamation condition of the lands in Nakhchevan Autonomous Republic near the river Araz. Eco reclamation condition of the lands is assessed due to soil salinization degree, depth of occurrence of ground water, ground water mineralization, as well as degree of natural and artificial drainage of investigated area. In comparison with investigations conducted in 1962–1968 and in 1981–2014, it was found that 16.11 thousand ha or 31 per cent of irrigated lands have been secondly (repeatedly) salinized, level of ground water raised for 5–6 times, mineralization raised for 2–10 times in comparison with initial. If in 1964 at 62 per cent of the total territory mineralization of ground water was till 1 g/l, so, in 2014 year ground water with mineralization degree till 1 g/l hasn't been observed at investigated area. Degree of drainage of the territory near the river Araz is extremely unsatisfactory and leatering of the ground water is violated. For this reason, water balance consumed part is formed due to physical evaporation. Ground water and soil water recharge annually is about 700 m³/ha, that causes to ground water level increase, mineralization rise and soils salinization. The reasons of deterioration of eco reclamation condition of the lands are briefly described.

Keywords: salinization, ground water level, mineralization, drainage, water balance, water reservoir, pressure, eco reclamation condition of the lands, assessment.

Общий земельный фонд Нахичеванской Автономной Республики (НАР) весьма ограничен и составляет 536,3 тыс. га, в том числе пригодных к орошению по условиям рельефа с уклоном – до 0,1–96,8 тыс. га, или 18 % общей валовой площади [1, 2]. Основная часть орошаемых земель находится в Приараксинской зоне. За последние годы фонд орошаемых земель значительно расширился. Если в 1970 г. площадь орошаемых земель составляла 41,1 тыс. га, то в 2012 г. она возросла до 59,2 тыс. га [3]. Для обеспечения орошаемых земель водой построе-

но много водохозяйственных сооружений. Только за последнее десятилетие в НАР введены в эксплуатацию более 10 крупных водохранилищ [4]. В связи со строительством водохозяйственных сооружений и интенсивным развитием орошения изменилась экомелиоративная обстановка земель [2, 5, 6]. Под влиянием различных факторов значительно поднялся уровень грунтовых вод, почвы в той иной степени подвержены засолению [7, 8] а также уменьшилась урожайность сельскохозяйственных культур [3]. В связи с этим возникла необходимость оценки совре-

менного экомелиоративного состояния орошаемых земель в Приараксинской зоне НАР с целью разработки конкретных мероприятий по их улучшению.

Цель исследований – разработка оценки экомелиоративного состояния земель в Приараксинской зоне НАР для рекомендации соответствующих мероприятий по их улучшению.

Объект и методика исследований

Объектом исследований являются орошаемые земли Приараксинской зоны НАР. Экомелиоративное состояние земель оценено по степени засоления, глубине залегания уровня грунтовых вод и их минерализации, а также по дренированности обследованной зоны. Фактические значения этих показателей установлены экспериментальным путём. Допустимые значения степени засоленности почвы приняты по классификациям почв по содержанию токсичных солей, разработанным А.Н. Костяковым [9], А.И. Базилевичем и Е.И. Панковой [10, 11] и В.Р. Волобуевым [12]. По ним допустимое содержание токсичных солей (плотной остаток) при хлоридно-сульфатном типе засоления составляет менее 0,3 %. Допустимое (критическое) значение глубины залегания уровня грунтовых вод принято по предложенным критериям А.Н. Костякова [9] и Д.М. Каца [13]. Критическая глубина грунтовых вод изменяется от 1,0 до 3,5 м в зависимости от их минерализации. С повышением минерализации грунтовых вод увеличивается значение критической глубины. Допустимое значение минерализации грунтовых вод также принято по А.Н. Костякову [9], величина которой составляет 1,5 г/л.

Дренированность обследованной территории установлена методами водного баланса, предложенными различными авторами [9, 14, 15]. Обобщив эти методы для расчета общего водного баланса, составили уравнение

$$\Delta W = B + O_c + \Phi_k - \dot{E} - D, \quad (1)$$

где ΔW – общее изменение запаса воды; B – водоподача на орошение; O_c – осадки; Φ_k – фильтрационные потери из каналов; $\dot{E}$ – суммарное испарение; D – дренажный сток.

Все элементы баланса выражены в м³/га. Учитывая, что поверхностные и подземные притоки и оттоки в естественных условиях равны, их разность принята равной нулю. На территории, для которой составлен баланс, напорность отсутствует.

Водоподача на орошение определена по водосливам, установленными на ирригационных каналах. Фильтрационные потери из каналов определены путём измерения скорости расхода воды по длине потока (в двух створах), а затем по разности расходов установлена величина фильтрационных

потерь. Фильтрационные потери из каналов определены также при помощи коэффициента полезного действия системы (КПД) по общей известной формуле

$$\dot{O}_k = B \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right), \quad (2)$$

где η – КПД каналов (в данной зоне для земляных каналов составляет 0,5–0,8, для облицованных каналов – 0,85–0,96). Величина атмосферных осадков взята из ежемесячника метеослужбы НАР.

Испарение из почвы определено по формуле С.Ф. Аверьянова [14]

$$\dot{E} = \dot{A}_f \left(1 - \frac{h}{h_k} \right)^n, \quad (3)$$

где E_o – испаряемость, м³/га; h – фактическая глубина грунтовых вод, м; h_k – критическая глубина грунтовых вод, м; n – показатель степени, обычно (по С.Ф. Аверьянову) принимается в пределах $1 < n < 2$, принят $n = 1,5$.

Испаряемость определена по общепринятой эмпирической формуле В.К. Давыдова [16]:

$$E_o = 0,55 n D^{0,8} (1 + 0,125 W), \quad (4)$$

где n – количество дней; D – дефицит влажности воздуха, мб; W – скорость ветра, м/с. Значения этих величин взяты из метеорологического ежемесячника данной зоны.

Результаты и обсуждение

Приараксинская зона в НАР включает в себя Кенгерлинское плато, Садаракскую, Шарурскую, Предгорную, Беюкдюзскую и Нахичеванскую равнины. Общая площадь данной зоны составляет 91 тыс. га [17].

В Приараксинской зоне развиты суглинистые, серозёмно-луговые почвы, которые по механическому составу почвы как в плане, так и по профилю неоднородны. Покровный слой мощностью 6–8 м представлен современными суглинистыми и редко песчаными отложениями. В нижней части покровного слоя вскрывается водоносный слой мощностью 13–17 м. Состав его выражен песчаными и редкогравелистыми материалами с прослойками глины.

Анализ результатов ранее проведённых исследований и фондовых материалов показывает, что до 1964 г. в Приараксинской зоне засоление земель не наблюдалось. В 1968 г., по данным проектного института «Азгипроводхоз», земли, примыкающие к р. Аракс, были незасолёнными [17]. Степень засоления почвы изменилась от 0,25 до 0,5 % по плотному остатку (табл. 1). Так, из 51,8 тыс. га обследованных земель 4,766 тыс. га были засолены, а 92 % общей площади – незасолёнными. Локальное

засоление почвы отмечено в некоторых местах Приараксинской зоны и было связано с наличием токсичных солей в составе коренных пород.

Однако, по данным солевых съёмок, проведённых в 1981–2014 гг., из 51,8 тыс. га обследованных

земель 19,16 тыс. га были подвержены вторичному засолению (табл. 1). На площади 4,87 тыс. га отмечено сильное, на 7,01 тыс. га – среднее, на 7,04 тыс. га – слабое засоление почвы, а на площади 730 га образовались солончаки.

Таблица 1

Степень засоления почвы по сумме токсичных солей и площади её распространения в пределах Приараксинской зоны

Степень засоления почвы	Содержание токсичных солей, %	1968		2014	
		Распределение площадей			
		га	%	га	%
Незасолённые	< 0,3	47660	92,0	31550	60,9
Слабозасолённые	< 0,5	2925	5,6	7040	13,6
Среднезасолённые	0,5 – 1,0	772	1,5	7610	14,7
Сильнозасолённые	1,0 – 2,0	443	0,9	4870	9,4
Очень сильнозасолённые (солончаки)	> 2	–	0	730	1,4
Итого		51800	100	51800	100

В 1962–1964 гг. в Приараксинской зоне грунтовые воды залежали на глубине 5–30 и более метров от поверхности земли [18]. Лишь на небольшой территории уровень грунтовых вод залежал на глубине 1–2 м (табл. 2). Однако в 1981–2014 гг. проведёнными наблюдениями за режимом уровня грунтовых вод на региональной наблюдательной сети, заложенной на территории НАР, и по наблюдательным скважинам, расположенным на опытных участках, организованных нами, уста-

новлено, что уровень грунтовых вод поднялся по всей Приараксинской зоне (табл. 2). На площади 69,2 тыс. га, т.е. на 76 % общей территории, уровень грунтовых вод залегает на глубине 1–2 м от дневной поверхности. Лишь на небольшой территории с площадью 4,9 тыс. га глубина залегания уровня грунтовых вод составила 3–5 м, а на обследованной территории грунтовые воды с глубиной залегания более 5 м уже не наблюдались (табл. 2).

Таблица 2

Распределение площадей по глубине залегание уровня грунтовых вод в Приараксинской зоне

Дата обследования	Обследованная площадь, тыс. га	Интервалы глубин залегания уровня грунтовых вод, м						
		< 1	1 – 2	2 – 3	3 – 5	5 – 10	10 – 20	20 – 30 и более
1962–1964 гг.	91,0	<u>8,1</u> 9	<u>9,9</u> 11	<u>5,6</u> 6	<u>6,0</u> 7	<u>22,9</u> 25	<u>25,9</u> 28	<u>12,6</u> 14
1981–2014 гг.	91,0	<u>9,4</u> 10	<u>59,8</u> 66	<u>16,9</u> 19	<u>4,9</u> 5	–	–	–

В связи с подъёмом уровня грунтовых вод коренным образом изменились степень их минерализации и качество. По данным Азербайджанского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации (АзНИИГиМ) [18], в 1962–1964 гг. на площади 56,5 тыс. га (62 % общей обследованной территории) Приараксинской зоны минерализация

грунтовых вод составила до 1 г/л, на площади 19,9 тыс. га (22 % общей территории) – от 1 до 2 г/л, на площади 7,6 тыс. га (8 %) – от 2 до 5 г/л, на площади 2,5 тыс. га (3 %) – 5–10 г/л, а на площади 4,8 тыс. га (5 %) – более 10 г/л. Грунтовые воды были пригодными для орошения сельскохозяйственных культур и водоснабжения населённых пунктов (табл. 3).

Таблица 3

Распределение площадей по минерализации грунтовых вод в Приараксинской зоне

Дата обследования	Обследовано территорий, тыс. га	Интервалы глубин залегания уровня грунтовых вод, м				
		< 1	1–2	2–5	5–10	> 10
1962–1964 гг.	91,0	$\frac{56,5}{62}$	$\frac{19,9}{22}$	$\frac{7,6}{8}$	$\frac{2,5}{3}$	$\frac{4,8}{5}$
1981–2014 гг.	91,0	–	$\frac{10,0}{11}$	$\frac{17,3}{19}$	$\frac{44,6}{49}$	$\frac{19,1}{21}$

В результате химического анализа проб воды, взятых из наблюдательных скважин, установлено, что в Приараксинской зоне минерализация грунтовых вод повышалась в 2–10 раз по сравнению с исходной (табл. 3). Если на большей части обследованной территории (56,5 тыс. га) минерализация грунтовых вод в 1964 г. составила менее 1 г/л, то в 80-х гг. на этой же территории грунтовые воды с минерализацией до 1 г/л не наблюдались. На площади 63,7 тыс. га в Приараксинской зоне минерализация грунтовых вод составляет 5–10 и более г/л, лишь на площади 27,3 тыс. га (30 % общей обследованной территории) грунтовые воды имеют минерализацию от 1 до 5 г/л (табл. 3).

Степень дренированности исследуемой зоны изучена методом водного баланса. С этой целью на территории Нахичеванской равнины был выбран опытный участок площадью 200 га, находя-

щийся в зоне влияния водохранилища Араксинского гидроузла и магистрального канала Карачуг. Такое расположение опытного участка позволило изучить влияние водохранилища на естественную дренированность приараксинской полосы, установить фильтрационные потери из каналов, определить фактическую водоподачу на орошение и дальность распространения подпора, препятствующего отточности подземных вод и т.д. Опытный участок оборудован наблюдательными скважинами и водомерными постами для измерения глубин залегания уровня грунтовых вод, вододачи на орошение, стока коллекторно-дренажной сети и фильтрационных потерь из ирригационных каналов.

Таким образом, определив по данным фактических измерений балансовые элементы, составили общий водный баланс для опытного участка (табл. 4).

Таблица 4

Общий водный баланс опытного участка, расположенного в зоне влияния водохранилища Араксинского гидроузла

Балансовые элементы	Величина элементов, м ³ /га	%
Приходная часть		
Водоподача на орошение B	6040	56
Атмосферные осадки O_c	2886	26
Фильтрационные потери из каналов Φ_k	1934	18
Итого	10850	100
Расходная часть		
Дренажный сток D	1037	10
Суммарное испарение I	9114	90
Итого	10151	100
Общее изменение запаса воды ΔW	+669	–

На основе составленного общего водного баланса установлено, что, несмотря на наличие коллекторно-дренажной сети, степень дренированности Приараксинской зоны крайне низкая, т.е. естественная отточность грунтовых вод весьма слабая. Так как расходная часть водного баланса формируется за счёт суммарного испарения, величина которого составляет около 90 % от общей приходной части баланса, т.е. приход фактически компенсируется испарением. В результате происходит интен-

сивное пополнение запаса грунтовых вод, что приводит к повышению их уровня. В то же время за счёт испарения влаги из почвы и подъёма уровня грунтовых вод земли подвергаются вторичному засолению, а также повышается минерализация грунтовых вод.

Анализ фактических и фондовых материалов показывает, что основными причинами ухудшения экомелиоративной обстановки орошаемых земель в Приараксинской зоне являются нарушение естест-

венной дренированности приараксинской полосы за счёт подпора, созданного со стороны водохранилища Араксинского гидроузла; фильтрационные потери из ирригационных каналов; несоблюдение режима орошения и техники полива; отсутствие современной водосберегающей техники полива, неудовлетворительная работа существующих коллекторно-дренажных сетей; нарушение травопольного севооборота; расширение масштаба строительства русловых и внеусловых водохранилищ, из оснований, бортов и земляных плотин с которых происходит фильтрация. Следует отметить, что до 1963 г. в НАР эксплуатировалось 6 внеусловых водохранилищ с общим объёмом воды 15 млн м³. В настоящее время в НАР существует 20 водохранилищ с общим объёмом воды 1817,5 млн м³; 4 из них – русловые, остальные – внеусловые [4].

Длина водохранилища Араксинского гидроузла составляет 52 км, подпор, созданный им, распространяется по левому берегу на расстоянии более 3 км [19]. Уровень воды в р. Аракс после строительства водохранилища поднялся в среднем на 13 м.

Заключение

В результате проведённых исследований установлено, что экомелиоративная обстановка земель в Приараксинской зоне НАР крайне неблагоприятная. Более 30 % орошаемых земель подвержены засолению, уровень грунтовых вод поднялся до поверхности земли, а минерализация увеличилась в 2–10 раз, грунтовые воды с глубиной залегания 5–30 м и более, а также с минерализацией до 1 г/л не наблюдались. Территория Приараксинской зоны имеет крайне слабую дренированность, т.е. нарушена естественная отточность вод в связи со строительством водохранилища Араксинского гидроузла. Подпор, созданный водохранилищем, распространяется по всей его длине и по левому берегу до расстояния более 3 км.

В результате подъёма уровня грунтовых вод и нарушения естественной дренированности территории происходит интенсивное испарение из почвы и грунтовых вод, что приводит к вторичному засолению почв и повышению минерализации грунтовых вод. Всё это вызывает ухудшение экомелиоративной обстановки земель. Для улучшения экомелиоративного состояния земель требуется разработать конкретные мероприятия, такие как строительство коллекторно-дренажной сети, реконструкция и переустройство ирригационных систем, применение современной водосберегающей техники и технологии полива, снижение подпора береговым дренажом, перехват фильтрационных потерь

из внеусловых водохранилищ с помощью перехватывающего дренажа и т. п.

Литература

1. Алиев Г.А., Гасанов Ш.Г., Алиева Р.А. Земельные ресурсы Азербайджана, их рациональное использование и охрана. Баку, 1981. 220 с.
2. Гасанов С.Т., Магеррамов Г.М., Искендеров М.Я. Влияние ирригационно-мелиоративного строительства на почвенно-мелиоративную обстановку земель Нахичеванской АССР. Баку, 1982–1984.
3. Сельское хозяйство Азербайджана: стат. сб. Баку, 2012. 618 с.
4. Ахмедзаде А.Д., Гашимов А.Д. Кадастр мелиоративных и водохозяйственных систем. Баку, 2006. 272 с.
5. Искендеров М.Я. [и др.] Влияние ирригационно-мелиоративного строительства на почвенно-мелиоративную обстановку земель Ильичёвского района Нахичеванской АССР. Баку, 1982–1988.
6. Халилов Т.А., Искендеров М.Я. Оценка экомелиоративного состояния земель Шарурского и Садаракского районов Нахичеванской АР // Науч. тр. АЗНИИГиМ. Баку, 2008. Т. XXVIII. С. 175–180.
7. Бехбудов А.К., Гасанов С.Т., Искендеров М.Я. [и др.] Засоление земель Приараксинской зоны Нахичеванской АССР и мероприятия по его устранению // Научное обоснование проектирования и строительства совершенных оросительных и коллекторных дренажных систем в Азербайджанской ССР. М., 1985. С. 37–46.
8. Гасанов С.Т., Магеррамов Г.М., Искендеров М.Я. Некоторые причины засоления земель в Нахичеванской АССР // Материалы НТК молодых ученых и специалистов. Баку, 1985. С. 46.
9. Костяков А.Н. Основы мелиорации. М., 1960. 622 с.
10. Базилович Н.И., Панкова Е.И. Опыт классификации почв по содержанию токсичных солей и ионов // Бюллетень почвенного института им. В.В. Докучаева. М., 1972. Вып. 5. С. 36–41.
11. Практикум по почвоведению / под ред. И.С. Кауричева: 3-е изд. М., 1980. 272 с.
12. Волобуев В.Р. Расчёт промывки засоленных почв. М., 1975. 72 с.
13. Кац Д.М. Режим грунтовых вод в орошаемых районах и его регулирование. М., 1963. 242 с.
14. Аверьянов С.Ф. Борьба с засолением орошаемых земель. М., 1978. 288 с.
15. Лебедев А.В. Методы изучения баланса грунтовых вод. М., 1963. 192 с.
16. Атлас Азербайджанской ССР. Баку; М., 1963. С. 41.
17. Реконструкция орошаемых земель приараксинской полосы Нахичеванской АССР: рабочий проект. Кн. I. Баку, 1968.
18. Бехбудов А.К., Бабаев А.Х. Оценка мелиоративно-геологических условий Нахичеванской впадины в связи с развитием орошения // Тр. АЗНИИГиМ. Баку, 1971. Вып. IX. С. 97–113.
19. Искендеров М.Я., Гасанов С.Т. Влияние Араксинского водохранилища на мелиоративное состояние прилегающих земель // Мелиорация и водное хозяйство. 2013. № 5. С. 22–23.

References

1. Aliev G.A., Gasanov Sh.G., Alieva R.A. *Zemel'nye resursy Azerbaidzhana, ikh ratsional'noe ispol'zovanie i okhrana* [Land resources of Azerbaijan, their rational use and protection]. Baku, 1981, 220 p.
2. Gasanov S.T., Magerramov G.M., Iskenderov M.Ya. *Vliyanie irrigatsionno-meliorativnogo stroitel'stva na pochvenno-meliorativnyuyu obstanovku zemel' Nakhichevskoi ASSR* [Effect of irrigation and drainage construction on soil and land reclamation situation of the Nakhichevan Autonomous Republic]. Baku, 1982-1984.
3. *Sel'skoe khozyaistvo Azerbaidzhana* [Agriculture of Azerbaijan]: statisticheskii sbornik. Baku, 2012, 618 p.
4. Akhmedzade A. D., Gashimov A. D. *Kadastr meliorativnykh i vodokhozyaistvennykh sistem* [Inventory of land reclamation and water resources systems]. Baku, 2006, 272 p.
5. Iskenderov M.Ya. i dr. *Vliyanie irrigatsionno-meliorativnogo stroitel'stva na pochvenno-meliorativnyuyu obstanovku zemel' Il'ichevskogo raiona Nakhichevskoi ASSR* [Effect of irrigation and reclamation of construction on soil and land reclamation situation Illichivsk district of the Nakhichevan Autonomous Republic]. Baku, 1982-1988.
6. Khalilov T.A., Iskenderov M.Ya. *Otsenka ekomeliorativnogo sostoyaniya zemel' Sharurskogo i Sadarakskogo raionov Nakhichevskoi AR* [Evaluation of eco land reclamation Sharur and Sadarak districts of Nakhchivan AR]. *Nauchnye trudy AzNIIGiM*, Baku, 2008, vol. 28, pp. 175-180.
7. Bekhbudov A.K., Gasanov S.T., Iskenderov M.Ya. i dr. *Zasolenie zemel' Priaraksinskoi zony Nakhichevskoi ASSR i meropriyatiya po ego ustraneniyu* [Soil salinization Priaraksinskoy area Nakhichevan Autonomous Republic and corrective actions]. *Nauchnoe obosnovanie proektirovaniya i stroitel'stva sovershennykh orositel'nykh i kollektornykh drenazhnykh setei v Azerbaidzhanskoi SSR*. Moscow, 1985, pp. 37-46.
8. Gasanov S.T., Magerramov G.M., Iskenderov M.Ya. [Some causes of salinization in the Nakhichevan Autonomous Republic]. *Materialy NTK molodykh uchenykh i spetsialistov* [Materials of NTK young scientists and specialists]. Baku, 1985, p. 46.
9. Kostyakov A. N. *Osnovy melioratsii* [Fundamentals of land reclamation]. Moscow, 1960, 622 p.
10. Bazilevich N.I., Pankova E.I. *Opyt klassifikatsii pochv po sodержaniyu toksichnykh soley i ionov* [Experience soil classification of the content of toxic salts and ions]. *Byulleten' pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, Moscow, 1972, vol. 5, pp. 36-41.
11. *Praktikum po pochvovedeniyu* [Workshop on soil]. Ed. I.S. Kaurichev. 3rd ed. Moscow, 1980, 272 p.
12. Volobuev V.R. *Raschet promytki zasolennykh pochv* [Calculation of washing of saline soils]. Moscow, 1975, 72 p.
13. Kats D.M. *Rezhim gruntovykh vod v oroshaemykh raionakh i ego regulirovanie* [Mode of groundwater in irrigated areas and its regulation]. Moscow, 1963, 242 p.
14. Aver'yanov S.F. *Bor'ba s zasoleniem oroshaemykh zemel'* [The fight against salinization of irrigated land]. Moscow, 1978, 288 p.
15. Lebedev A.V. *Metody izucheniya balansa gruntovykh vod* [Methods of studying the balance of groundwater]. Moscow, 1963, 192 p.
16. *Atlas Azerbaidzhanskoi SSR* [Atlas of Azerbaijan SSR]. Baku; Moscow, 1963, p. 41.
17. *Rekonstruktsiya oroshaemykh zemel' priaraksinskoi polosy Nakhichevskoi ASSR* [Reconstruction of the irrigated land in the Arax band Nakhichevan ASSR]: a working draft. Vol. 1. Baku, 1968.
18. Bekhbudov A.K., Babaev A.Kh. *Otsenka meliorativno-gidrogeologicheskikh uslovii Nakhichevskoi vpadiny v svyazi s razvitiem orosheniya* [Evaluation of reclamation and hydrogeological conditions of the Nakhichevan depression with the development of irrigation]. *Trudy AzNIIGiM*, Baku, 1971, vol. 9, pp. 97-113.
19. Iskenderov M.Ya., Gasanov S.T. *Vliyanie Araksinskogo vodokhranilishcha na meliorativnoe sostoyanie prilagayushchikh zemel'* [Influence Araz reservoir on surrounding land reclamation state]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo*, 2013, no 5, pp. 22-23.

УДК 551.465

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-96-102

О СВЯЗИ СОДЕРЖАНИЯ РТУТИ И ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПО ПРОФИЛЮ РЕКА ДОН – АЗОВСКОЕ МОРЕ*

© 2015 г. И.В. Доценко, Ю.А. Федоров, А.В. Михайленко, Л.Ю. Дмитрик

Доценко Ирина Владимировна – кандидат географических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов н/Д, 344090, e-mail: irinageo@mail.ru

Федоров Юрий Александрович – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов н/Д, 344090, e-mail: fedorov@sfedu.ru

Михайленко Анна Владимировна – преподаватель, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов н/Д, 344090, e-mail: mikhailenkoanna@gmail.com

Дмитрик Леонид Юрьевич – аспирант, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов н/Д, 344090, e-mail: dimikarmy13@inbox.ru

Dotsenko Irina Vladimirovna – Candidate of Geographical Science, Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: irinageo@mail.ru

Fedorov Yuri Aleksandrovich – Doctor of Geographical Science, Professor, Head of Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: fedorov@sfedu.ru

Mikhailenko Anna Vladimirovna – Lecturer, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: mikhailenkoanna@gmail.com

Dmitrik Leonid Yuryevich – Post-Graduate Student, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: dimikarmy13@inbox.ru

Выполнены исследования по изучению тесноты связи содержания валовой ртути и C_{org} в донных отложениях по профилю река Дон – Азовское море. Пробы донных отложений отбирались с помощью грунтовой трубки с борта судна в летний и осенний сезоны, характеризующиеся различной гидрометеорологической обстановкой. Во время летнего рейса в поверхностном слое донных отложений среднее содержание ртути в Азовском было меньше, чем в осенний сезон. Эти результаты согласуются с содержанием органического вещества и ртути в донных осадках в целом моря и подтверждают ранее полученными коэффициентами корреляции между данными ингредиентами. Они относительно высоки, составляя в среднем 0,65 для всего моря и 0,93 для Таганрогского залива, что подтверждает значительную роль органического вещества как фактора аккумуляции ртути в донных отложениях. Установлено, что концентрации ртути, как правило, возрастают в донных отложениях с ростом концентрации глинистой фракции и органического вещества различного генезиса. Между содержанием валовой ртути и C_{org} наблюдается тесная корреляция, которая может нарушаться под влиянием гидродинамического фактора.

Ключевые слова: Таганрогский залив, Азовское море, донные отложения, органическое вещество, ртуть.

The studies of the correlation strength of the content of total mercury and the C_{org} in the bottom sediments of the profile of the Don River and Azov Sea were performed. Sediment samples were collected using a soil tube from the vessel in the summer and autumn seasons, characterized by different hydro-meteorological conditions. During the summer flight in the surface layer of bottom sediments, the average content of mercury in Azov was less than in the fall season. These results are consistent with the content of organic matter and mercury in the bottom sediments in general, the sea and confirmed the previously obtained correlation coefficients between these ingredients. They are relatively high, averaging of 0,65 for all sea and 0,93 for the Taganrog Bay, which confirms the significant role of organic matter as a factor of accumulation of mercury in sediments. Found that mercury concentrations generally increased in the sediments with increasing concentration of clay fraction and organic matter of different origin. Between total mercury content and the C_{org} is a close correlation, which can be broken under the influence of hydrodynamic factors.

Keywords: Taganrog Bay, Azov Sea, bottom sediments, organic matter, mercury.

Введение

Биологическая продуктивность Азовского моря определяется уникальным сочетанием физико-

географических, гидрологических и экологических условий. На протяжении десятков лет этот водоем занимает одно из первых мест по величине продукции органического вещества (ОВ). Оно играет ве-

*Работа выполнена при финансовой поддержке проектов № 1334, 5.1848.2014/К.

душую роль в круговороте химических элементов, в том числе такого токсичного тяжелого металла, как ртуть. Высвобождаясь в результате жизнедеятельности и при отмирании гидробионтов разных трофических уровней, ОВ оказывает существенное влияние на водную среду и донные отложения, предопределяя характер и направленность многих гидрохимических процессов. Органическое вещество является активным участником седиментационного и раннедиагенетического циклов тяжелых металлов и биогенных компонентов, а также контролирует состав газов и их режим на границе раздела «вода – донные отложения» [1]. Ртуть легко вступает с ним во взаимосвязь как посредством сорбции на поверхности частиц, так и путем формирования органоминеральных комплексов. В связи с этим процессы осаждения и накопления в донных отложениях органического вещества и ртути в Азовском море происходят в значительной степени сопряженно, а распределение их концентраций имеет сходный характер [2].

Целью настоящей работы является изучение тесноты связи содержания органического вещества и ртути в донных отложениях в акватории моря и сопряженного в координатах пространство – время поведения этих компонентов в различных гидрометеорологических обстановках. Такая возможность представилась во время проведения экспедиции 2006 г., когда отбор проб производился в летний сезон – во время затяжного шторма и в осенний – при относительном затишье.

Материалы и методы

Для отбора проб донных осадков в летний и осенний сезоны 2006 г. в Азовском море были проведены комплексные экспедиционные исследования [3]. На 20 станциях мониторинга с борта судна БГК-244 в соответствии с методикой [4] при помощи грунтовой трубки конструкции ГОИН длиной 1 м были отобраны образцы донных отложений (рис. 1). В случае с песчаными и ракушечными отложениями отбор производился дночерпателем «Океан-0.025». Содержание растворенной и взвешенной форм органического вещества в водной толще определялось с помощью высокотемпературного анализатора органического углерода ТОС-5000А [5]. Органическое вещество донных отложений определялось методом Тюрина в модификации ЦИНАО и пересчитывалось на органический углерод ($C_{орг}$) [6, 7]. Определение валового содержания ртути было проведено атомно-абсорбционной спектроскопией методом холодного пара аналитиком А.М. Аникановым по методике, описанной в работе [8].

Результаты и их обсуждение

В настоящей работе обсуждаются только результаты определения содержания органического углерода и ртути в поверхностном слое донных осадков мощностью 0–5 см. Это обусловлено тем, что, во-первых, этот слой является переходным между придонным горизонтом воды и более глубоко залегающими донными осадками; во-вторых, он в наибольшей степени отражает современное экологическое состояние донных отложений; в этой связи, в-третьих, он (или слой мощностью 0–2 см) является основным объектом мониторинга научных и производственных организаций. Однако именно данный редокс-слой подвергается взмучиванию во время штормов, и следовательно, важно знать, в какой степени полученную информацию можно считать достоверной. Ведь оголяющийся во время сгонно-нагонных явлений нижний подповерхностный слой (5–10 см) содержит ингредиенты, захороненные в осадке в другое время. Сведения по содержанию органического углерода в донных отложениях взяты из работы Ю.А. Федорова и др. [1]. Для получения усредненных характеристик распределения содержания $C_{орг}$ и ртути по оси Таганрогского залива и открытой акватории российского сектора Азовского моря были проложены два профиля через станции 42, 0, 32, 1, 3, 6, 9, 27, 15, 17, 18 в летний период и 0, 32, 3, 6, 9, 26, 22, 17, 18 – в осенний (рис. 1).

Анализ данных показал, что интервал колебаний концентраций взвешенного $C_{орг}$ составлял в июле 0,32–1,70 мг/л, а в сентябре – 1,13–2,58. Согласно [1, 9], содержание взвешенного органического углерода в воде существенно изменяется в зависимости от района Азовского моря и гидрометеорологической обстановки, наблюдаемой в периоды отбора проб. В донных отложениях в июле содержание $C_{орг}$ колебалось от 0,29 до 2,64 % сухой массы (с.м.), составляя в среднем 1,1 % с.м. В сентябре концентрации изменялись от 0,34 до 3,19 % с.м., что в среднем составило 1,46 % с.м. [1]. Увеличение содержания органического углерода в поверхностном горизонте донных отложений при одновременных колебаниях его концентраций во взвеси вызвано течением двух разнонаправленных процессов. С одной стороны, это возрастание количества, поступающего $C_{орг}$ в составе осаждающейся взвеси в сентябре, с другой – его снижение вследствие перехода органического вещества в водную толщу во время продолжительного шторма в июле. Это подтверждается своеобразием распределения органического углерода по профилю донных отложений. В июле отмечен крайне сложный характер распределения концентраций в поверхностном горизонте на глубине 0,0–5,0 см, в то

время как в сентябре явно заметны максимум содержания на поверхности и убывание величин с глубиной, что объяснимо сезонным поступлением органического углерода из водной толщи осадков, а также затуханием активной гидродинамики. Состав органического вещества, поступающего в этот пери-

од на морское дно, своеобразен. Это вещество, синтезированное планктонными организмами, а также в разной степени преобразованное в донных отложениях, в том числе вследствие протекания процессов деструкции, в придонном слое водной толщи при взмучивании [10].

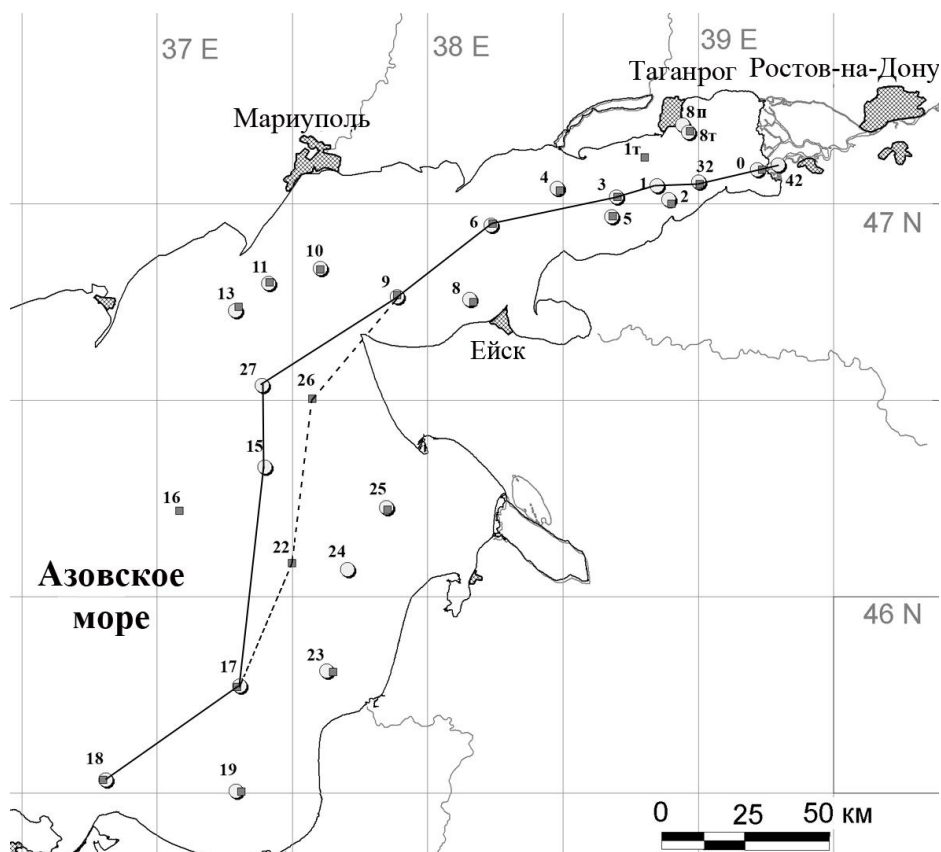


Рис. 1. Карта-схема расположения станций отбора проб в летний (—) и осенний (---) периоды проведения экспедиции

Как правило, максимальные значения содержания органического углерода в донных отложениях были приурочены к глинистым илам, а минимальные – к пескам и крупным алевритам [9]. Кроме того, относительно высокие концентрации $C_{орг}$ отмечены на ракушнях, что можно объяснить накоплением обогащенных органическим веществом продуктов жизнедеятельности моллюсков. Так, наибольшие концентрации $C_{орг}$ наблюдаются в юго-восточной части бассейна, а также в районе, пограничном между Таганрогским заливом и собственно Азовским морем. Также прослеживается закономерность убывания содержания $C_{орг}$ по мере удаления станции отбора проб от берега. Это связано с сокращением биомассы фитопланктона, так как наиболее бурное его развитие наблюдается в

самой мелководной, прибрежной части Азовского моря. Как видно из рис. 2, распределение $C_{орг}$ отличается неравномерностью, в летний период во время шторма его содержание увеличивается от устья р. Дон к Таганрогскому заливу от 0,32 до 1,31 % с.м., т.е. в 4 раза. В самом же заливе значения варьируют от 0,86 до 1,71 % с.м., а в его гирле происходит снижение до 0,65 %. В Азовском море отмечается увеличение содержания к Керченскому проливу в среднем в 2 раза, от 0,97 до 2,24 % с.м.

Так же как и летом, в осенний период отмечается понижение содержания к гирлу Таганрогского залива от 1,53 до 0,34 % с.м., т.е. в 4,5 раза. Собственно в море картина распределения другая по сравнению с летним сезоном, несмотря на увеличение количества $C_{орг}$ от 0,97 до 3,19 % с.м., отмеча-

ется снижение концентрации к Керченскому предпроливью до 2,03 % с.м. на станции № 18 (рис. 1, 2). В целом особенностью распределения содержания органического вещества по разрезу река Дон – Азовское море является его плавное возрастание как в летний, так и осенний сезоны в направлении река Дон – Таганрогский залив – Азовское море [1, 2]. Данный вывод хорошо согласуется с результатами, полученными ранее в работе [11], которые в свою очередь подтвердили сведения Т.И. Горшковой [12] о том, что общее количество углерода тесно связано с содержанием пелитовой фракции. При штормовых ветрах происходит диспергирование верхнего слоя донных осадков в Таганрогском заливе и мелководных участках собственно Азовского моря. При северо-восточных ветрах наблюдается вынос органоминерального взвешенного вещества из Таганрогского залива в открытое море, где и происходит его накопление. Юго-западные штормовые ветры в меньшей степени способствуют переносу взвешенного материала, но уже наоборот – в Таганрогский залив. В безветренную погоду идет седиментация взвеси во всех частях Азовского моря, которая контролируется системой течений. Это указывает на важную роль динамики водных масс, которая осуществляет массоперенос органического и минерального вещества из одной части моря в другую. Фактически во время шторма, когда резко

возрастает концентрация взвеси [13], вся водная масса залива представляет собой «огромное мутявое облако». Во время затяжной штормовой погоды происходит сепарация взвешенного вещества водной толщи, в результате чего более крупный материал вновь осаждается, а водная взвесь обогащается пелитовым материалом и органическим веществом. В экспедиции на одной из станций мы наблюдали, как сразу же после окончания шторма сформировался верхний слой донных осадков, представленный сверху вниз преимущественно легким бурым органическим веществом, тонким пелитовым материалом и алевроитом. А.А. Клёнкин и др. [14], анализируя распределение донных осадков Азовского моря (в слое 0,0–2,0 см), пришли к выводу об изменении их литологического состава от сезона к сезону кардинальным образом. По мнению этих авторов, во время ветреной погоды происходит взмучивание верхнего слоя донных осадков мощностью не менее 1 мм. Таким образом, том (в шторм) в Таганрогском заливе и собственно Азовском море мы изучали сильно взмученный поверхностный слой. Во время осенней экспедиции, которая проводилась в штилевую погоду, во всех частях моря был исследован верхний слой донных отложений, представленный осадками, отлагавшимися во время относительного безветрия.

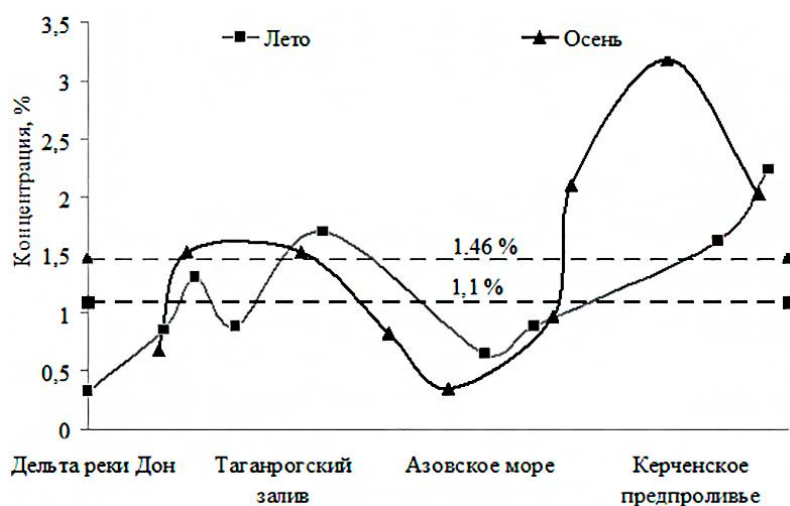


Рис. 2. Распределение содержания $C_{орг}$ в донных отложениях по разрезу р. Дон – Азовское море (горизонт 0–5 см) (пунктиром показаны средние концентрации), %

Подчеркнем, что основными факторами, влияющими на пространственное распределение органического углерода в донных отложениях, являются биомасса фитопланктона, литологический состав и динамика водных масс.

Во время летнего рейса в поверхностном слое донных отложений среднее содержание ртути в Азовском море составило 0,083 мкг/г с.м. и было меньше, чем в осенний сезон – 0,208 мкг/г с.м. (рис. 3). Эти результаты согласуются с содержанием ор-

ганического вещества и ртути в донных осадках в целом моря, подтверждаются ранее полученными коэффициентами корреляции между данными ингредиентами [15]. Они относительно высоки, составляя в среднем 0,65 для всего моря и 0,93 для Таганрогского залива, что подтверждает значительную роль органического вещества как фактора аккумуляции ртути в донных отложениях.

В шторм в Таганрогском заливе валовое содержание ртути сначала возрастает от устья реки Дон вплоть до центрального района, после чего падает на выходе из залива и остается примерно на одном уровне собственно в море и Керченском предпроливье Азовского моря (0,042 мкг/г с.м. на ст. 17). В Таганрогском заливе содержание Hg колебалось от 0,16 (ст. 4) до 0,084 мкг/г с.м. (ст. 1). Обнаруженный горб содержания ртути в центральной части залива синхронизирует с таковым содержания органического углерода и пространственно приуро-

чен к расположению на дне залива илов с высоким содержанием глинистой фракции [16]. Некоторое наблюдаемое несоответствие в поведении органического вещества и валовой ртути по разрезу в открытом море (рис. 2, 3) может быть объяснено седиментацией привнесенного из других районов моря, подвергшегося деградации взвешенного органического вещества, ртуть из которого во время продолжительного шторма частично перешла в воду.

Осенью (в штиль) средняя концентрация ртути по профилю превышала среднее летнее значение в 2,5 раза и изменялась в широком интервале значений – от 0,059 мкг/г с.м. (ст. 32) в районе дельты реки Дон до 0,576 (ст. 3) в Таганрогском заливе. Однако следует отметить, что высокая концентрация в заливе зафиксирована только на одной станции с последующим резким понижением содержания ртути в 8 раз в его гирле.

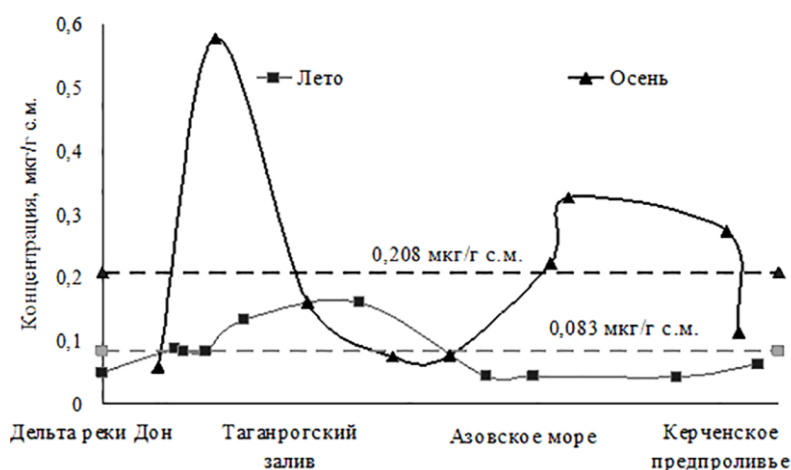


Рис. 3. Распределение содержания Hg в донных отложениях по разрезу р. Дон – Азовское море (горизонт 0–5 см) (пунктиром показаны средние концентрации), мкг/г с.м.

В открытой части моря отмечается повышение концентрации элемента до 0,33 мкг/г с.м., а в Керченском предпроливье Азовского моря – снижение в 3 раза до 0,11 мкг/г с.м. Картина распределения металла в открытом море и Керченском предпроливье хорошо согласуется с таковым для органического вещества (рис. 2, 3). В открытой части моря в штилевую погоду происходит активное соосаждение органического вещества, пелитового материала и ртути. Вариации содержания валовой ртути по всей акватории в летний и осенний сезоны 2006 г. составили 0,042 – 0,576 мкг/г с.м. при среднем значении 0,105 мкг/г с.м., без учета экстремальной концентрации. Отметим, что эти результаты оказались ниже тех значений, что были определены для интервала глубин 0–5 см и 5–10 см в период с 1995

по 2000 г. [16], но несколько выше результатов, полученных для лета и осени 2006 г. [14]. Отмеченные флюктуации, возможно, являются как следствием снижения содержания ртути в донных отложениях во времени, так и погрешностью применяемых методик подготовки проб и методов анализа. Как очевидно из вышеизложенного, содержания пелитовой фракции и органического вещества в пробах могут также повлиять на определение содержания ртути.

Ранее было показано [16], что прослеживается четкая зависимость наибольшего содержания ртути от локализации техногенного источника поступления. Так, максимальные концентрации элемента характерны для акватории, прилегающей к Таганрогу и Ейску, где для органического вещества были

зафиксированы небольшие величины содержания. В сентябре пространственное распределение ртути было в отличие от лета более мозаичным, а её концентрации имели больший разброс значений. Феномен относительной гомогенизации содержания природных и антропогенных веществ, а также изотопного состава сульфатной серы в воде во время шторма и сразу же после него, отмечалось в работе [13].

В заключение отметим, что содержание органического вещества и ртути в донных отложениях по профилю р. Дон – Таганрогский залив – открытая часть Азовского моря – Керченское предпроливье характеризуется тесной связью, которая может нарушаться динамикой водных масс и антропогенным воздействием. Органическое вещество наряду с литологическим составом выступает в качестве важного фактора, контролирующего аккумуляцию ртути в донных отложениях Азовского моря.

Литература

1. Федоров Ю.А., Доценко И.В., Кузнецов А.Н., Белов А.А., Логинов Е.А. Закономерности распределения C_{org} в донных отложениях российской части Азовского моря // *Океанология*. 2009. Т. 49, № 2. С. 229–236.
2. Fedorov Yu.A., Dotsenko I.V., Mikhailenko A.V. Mercury and organic matter in bottom sediments in the profile don river–Sea of Azov // 14th GeoConference on Ecology, Economics, Education and Legislation Conference Proceedings. Vol. I. Ecology and Environmental Protection. Albena, Bulgaria, 2015. P. 81–87.
3. Федоров Ю.А., Сапожников В.В., Агатов А.И., Аржанова Н.В., Белов А.А., Кузнецов А.Н., Лапина Н.М., Логинов Е.Б., Предеина Л.М., Семочкина Т.Б., Торгунова Н.И. Комплексные экосистемные исследования в российской части Азовского моря (18–25 июля 2006 г.) // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 2. С. 316–319.
4. ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность (с изменением № 1). М., 1980. 10 с.
5. Руководство по современным биохимическим методам исследования водных экосистем, перспективных для промысла и марикультуры / под ред. А.И. Агатовой. М., 2004. 123 с.
6. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. М., 1991. 8 с.
7. Тюрин И.В. К методике анализа для сравнительного изучения состава почвенного перегноя или гумуса // *Тр. почвенного ин-та им. В.В. Докучаева АН СССР*. М., 1951. Т. 38. С. 5–21.
8. Федоров Ю.А., Хансигарова Н.М., Березан О.А. Об особенностях распределения и поведения ртути в донных отложениях нижнего течения р. Дон и Таганрогского залива // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки*, 2001. № 3. С. 76–81.
9. Доценко И.В., Федоров Ю.А. Распределение C_{org} в донных отложениях Азовского моря и его роль в накоплении ТМ и других элементов (по данным корреляцион-

ного анализа) // *Проблемы гидрометеорологии и геоэкологии: сб. тр.* Ростов н/Д., 2007. С. 48–52.

10. Доценко И.В., Федоров Ю.А. Динамика распределения содержания ртути в донных отложениях Азовского моря в условиях перманентно изменяющейся гидрометеорологической обстановки // *Геология морей и океанов: материалы XVIII Междунар. конф. (школы) по морской геологии*. М., 2009. Т. IV. С. 234–239.
11. Шниюков Е.Ф., Орловский Г.Н., Усенко В.П. [и др.]. *Геология Азовского моря*. Киев, 1974. С. 247.
12. Горшкова Т.И. Условия накопления органического вещества в современных осадках морей СССР // *Природа органического вещества современных и ископаемых осадков*. М., 1973. С. 60–67.
13. Федоров Ю.А. Стабильные изотопы и эволюция гидросферы. М., 1999. 370 с.
14. Клёнкин А.А., Корпакова И.Г., Павленко И.Ф., Темердашев З.А. Экосистема Азовского моря: антропогенное загрязнение. Краснодар, 2007. 324 с.
15. Доценко И.В. Органическое вещество и его роль в аккумуляции ртути в экосистеме Азовского моря // *Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: материалы Междунар. симп. (Москва, 7–9 сентября 2010 г.)*. М., 2010. С. 218–222.
16. Федоров Ю.А., Хансигарова Н.М., Предеина Л.М. Особенности распределения ртути и свинца в донных отложениях Таганрогского залива и юго-восточной части Азовского моря // *Водное хозяйство России*. 2003. Т. 5, № 6. С. 528–540.

References

1. Fedorov Yu.A., Dotsenko I.V., Kuznetsov A.N., Belov A.A., Loginov E.A. Zakonomernosti raspredeleniya C_{org} v donnykh otlozheniyakh rossiiskoi chasti Azovskogo morya [Regularities in the distribution Corg in sediments of the Russian part of the Azov Sea]. *Okeanologiya*, 2009, vol. 49, no 2, pp. 229-236.
2. Fedorov Yu.A., Dotsenko I.V., Mikhailenko A.V. Mercury and organic matter in bottom sediments in the profile don river – Sea of Azov. 14th GeoConference on Ecology, Economics, Education and Legislation Conference Proceedings. Vol. I. Ecology and Environmental Protection. Albena, Bulgaria, 2015, pp. 81-87.
3. Fedorov Yu.A., Sapozhnikov V.V., Agatova A.I., Arzhanova N.V., Belov A.A., Kuznetsov A.N., Lapina N.M., Loginov E.B., Predeina L.M., Semochkina T.B., Torgunova N.I. Kompleksnye ekosistemnye issledovaniya v rossiiskoi chasti Azovskogo morya (18-25 iyulya 2006 g.) [Comprehensive ecosystem studies in the Russian part of the Azov sea (18-25 July, 2006.)] // *Okeanologiya*, 2007, vol. 47, no. 2, pp. 316-319.
4. GOST 17.1.5.01-80. Okhrana prirody. Gidrosfera. Obshchie trebovaniya k otboru prob donnykh otlozhenii vodnykh ob'ektov dlya analiza na zagryaznennost' (s izmeneniyem № 1) [GOST 17.1.5.01-80. Environmental Protection. Hydrosphere. General requirements for the sampling of bottom sediments of water bodies for the analysis of pollution (with variation № 1)]. Moscow, 1980, 10 p.
5. Rukovodstvo po sovremennym biokhimicheskim metodam issledovaniya vodnykh ekosistem, perspektivnykh dlya promysla i marikul'tury [Guide to modern biochemical methods of investigation of aquatic ecosystems perspec-

- tive for fisheries and mariculture]. Red. A.I. Agatova. Moscow, 2004, 123 p.
6. GOST 26213-91. *Pochvy. Metody opredeleniya organicheskogo veshchestva* [GOST 26213-91. Soils. The methods for determination of organic matter]. Moscow, 1991, 8 p.
 7. Tyurin I.V. K metodike analiza dlya sravnitel'nogo izucheniya sostava pochvennogo peregnoya ili gumusa [The method of analysis for a comparative study of soil humus or humus]. *Trudy pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva AN SSSR*. Moscow, 1951, vol. 38, pp. 5-21.
 8. Fedorov Yu.A., Khansivarova N.M., Berezan O.A. Ob osobennostyakh raspredeleniya i povedeniya rtuti v donnykh otlozheniyakh nizhnego techeniya r.Don i Taganrogskogo zaliva [About the peculiarities of the distribution and behavior of mercury in the sediments of the Lower River Don and Taganrog Bay]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*, 2001, no 3, pp. 76-81.
 9. Dotcenko I.V., Fedorov Yu.A. Raspredelenie C_{org} v donnykh otlozheniyakh Azovskogo morya i ego rol' v nakoplenii TM i drugikh elementov (po dannym korrelyatsionnogo analiza) [Distribution C_{org} in the bottom sediments of the sea of Azov and its role in the accumulation of heavy metals and other items (according to the data of the correlation analysis)]. *Problemy gidrometeorologii i geoekologii*: sb. trudov. Rostov-on-Don, 2007, pp. 48-52.
 10. Dotsenko I.V., Fedorov Yu.A. Dinamika raspredeleniya sodержaniya rtuti v donnykh otlozheniyakh Azovskogo morya v usloviyakh permanentno izmenyayushcheyasya gidrometeorologicheskoi obstanovki [The dynamics of the distribution of mercury in bottom sediments of the Azov sea in the conditions of permanently changing hydrometeorological conditions]. *Geologiya morei i okeanov: materialy XVIII Mezhdunar. konf. (Shkoly) po morskoi geologii*. vol. IV. M., 2009, pp. 234-239.
 11. Shnyukov E.F., Orlovskii G.N., Usenko V.P. [i dr.] *Geologiya Azovskogo morya* [The Geology of the Sea of Azov]. Kiev, 1974, p. 247.
 12. Gorshkova T.I. Usloviya nakopleniya organicheskogo veshchestva v sovremennykh osadkakh morei SSSR [Conditions of accumulation of organic matter in the modern sediments seas of the USSR]. *Priroda organicheskogo veshchestva sovremennykh i iskopaemykh osadkov*. Moscow, 1973, pp. 60-67.
 13. Fedorov Yu.A. *Stabil'nye izotopy i evolyutsiya gidrosfery* [Stable isotopes and the evolution of the hydrosphere]. Moscow, 1999, 370 p.
 14. Klenkin A.A., Korpakova I.G., Pavlenko I.F., Temerdashev Z.A. *Ekosistema Azovskogo morya: antropogennoe zagryaznenie* [The ecosystem of the Sea of Azov: anthropogenic pollution]. Krasnodar, 2007, 324 p.
 15. Dotsenko I.V. Organicheskoe veshchestvo i ego rol' v akumulatsii rtuti v ekosisteme Azovskogo morya [Organic matter and its role in the accumulation of mercury in the ecosystem of the Sea of Azov]. *Rtut' v biosfere: ekologo-geokhimicheskie aspekty: materialy Mezhdunar. simpoziuma* (Moskva, 7-9 sentyabrya 2010 g). Moscow, pp. 218-222.
 16. Fedorov Yu.A., Khansivarova N.M., Predeina L.M. Osobennosti raspredeleniya rtuti y svintsya v donnykh otlozheniyakh Taganrogskogo zaliva i yugo-vostochnoi chasti Azovskogo morya [Features of the distribution of mercury and lead in the bottom sediments of the Taganrog Gulf and South-Eastern part of Sea of Azov]. *Vodnoe hozyaistvo Rossii*. 2003, vol. 5, no 6, pp. 528-540.

УДК 556(470.64)

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-103-107

К ОЦЕНКЕ СОВРЕМЕННОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕКИ ТЕРЕК В ПРЕДЕЛАХ КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

© 2015 г. М.А. Сарахова, А.В. Якимов

Сарахова Мадина Анатольевна – аспирант, Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова, пр. Ленина, 1в, г. Нальчик, 360030, e-mail: madina-anatolievna@mail.ru

Якимов Андрей Владимирович – кандидат биологических наук, начальник, Кабардино-Балкарский республиканский отдел ФГБУ «Запкасрыбвод», ул. Мечникова, 130, г. Нальчик, 360024, e-mail: yakimov_andrei@mail.ru

Sarakhova Madina Anatol'evna – Post-Graduate Student, V.M. Kokov Kabardino-Balkarian State Agricultural University, Lenin Ave, 1v, Nalchik, 360030, Russia, e-mail: madina-anatolievna@mail.ru

Yakimov Andrei Vladimirovich – Candidate of Biological Science, Head, Kabardino-Balkarian Republican Department «Zapcasribvod», Mechnikov St., 139, Nalchik, 360024, Russia, e-mail: yakimov_andrei@mail.ru

Оценивается экологическое состояние реки Терек в пределах Кабардино-Балкарской Республики. Экосистема Терека подвергается негативному антропогенному воздействию. В последнее десятилетие заметное место в негативном воздействии на экосистему Терека играют спиртопроизводящие и другие предприятия и объекты инфраструктуры, размещенные на территории Республики Северная Осетия – Алания. В Кабардино-Балкарской Республике свой вклад в загрязнение реки вносит ООО «Кабардинский крахмал». Неоднозначна роль оросительной системы (Акбашский канал, Мало-Кабардинская оросительно-обводнительная система и др.). Особое негативное влияние на биологические ресурсы Терека оказывает браконьерство.

Ключевые слова: экологическое состояние реки, антропогенное воздействие, водный дефицит.

The article evaluates ecological status of the river Terek flowing within the Kabardino-Balkarian Republic. The Terek ecosystem is adversely affected by man's impact. In the last decade the Terek ecosystem has been suffering greatly from alcohol producing plants and other enterprises and facilities located on the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. The manufacturing company «Kabardian Starch Ltd» contributes to the pollution of the river. The irrigation system is playing its ambiguous role (the Akbash channel, Malo-Kabardian irrigation system). Poaching has yet another special negative impact on the biological resources of the river Terek.

Keywords: ecological status of the river, anthropogenic influence, water scarcity.

Река Терек занимает важное место как источник водопользования на Центральном и Восточном Предкавказье. Экосистема Терека подвергается негативному антропогенному воздействию. В перспективе ожидается увеличение прессинга в свете развития рекреационной индустрии. Общеизвестно, что ограниченный объем водных ресурсов может вызывать торможение экономического и регионального развития, а также привести к потере многообразия видов растений и животных, сопровождающегося деградацией пресноводных экосистем. Именно водные ресурсы являются важным критерием выявления уязвимости региона в отношении водного дефицита [1, 2] и экологического благополучия.

В последнее десятилетие заметное место в негативном воздействии на экосистему Терека играют спиртопроизводящие и другие предприятия и объекты инфраструктуры, размещенные на территории Республики Северная Осетия – Алания, ситуация обострилась настолько, что требует привлечения административно-правового ресурса [3]. В Кабар-

дино-Балкарской Республике свой вклад в загрязнение реки вносит ООО «Кабардинский крахмал». Неоднозначна роль оросительной системы (Акбашский канал, Мало-Кабардинская оросительно-обводнительная система и др.). Особое негативное влияние на биологические ресурсы Терека оказывает браконьерство, ущерб от которого составляет десятки миллионов рублей в год.

Характеристика места исследования

Терек – одна из крупнейших рек Кавказа. Несет свои воды в Астраханский залив Каспийского моря, образуя дельту площадью около 4000 км². Протяженность реки – 623 км, площадь бассейна – 43200 км². Для Кабардино-Балкарской Республики – транзитная река, 82-километровый ее участок (12,8 % от всей длины) заходит в пределы равнинной части республики. Берет свое начало в Грузии, на северном склоне Водораздельного хребта, в ледниках горы Зильга-Хох (3857 м над у.м.). Бассейн Терека

в пределах Кабардино-Балкарии расположен с левой стороны. Основными левыми притоками являются реки Малка, Аргудан, Лескен, Урух. Терек вступает в пределы Кабардинской равнины в двух километрах к юго-западу от села Плановского, огибая с запада Кабардинский хребет и сохраняя общее направление на север. Затем с севера огибает Арикский хребет, направляясь на восток, в районе села Хамидие пересекает границу Кабардино-Балкарии с Северной Осетией. После Кабардино-Сунженского хребта несет свои воды в северном направлении. Здесь в него впадают Урух, Змейка, Аргудан, Малка.

На территории республики Терек сохраняет черты горной реки – по главному руслу водосток бурный. Расход воды значительный, у станицы Котляревской он равен $134 \text{ м}^3/\text{с}$. Объем потока – $3,81 \text{ км}^3$ у села Хамидие, протекает река по широкой долине в песчано-глинистом русле с многочисленными косами, отмелями. Большая скорость течения реки способствует эрозионной деятельности: легко размываются рыхлые осадочные отложения третичного времени, в которых проложена долина. В большей степени подвержено боковой эрозии правобережье у сел Плановское и Урожайное, городов Терек и Майский, станицы Котляревской. Поэтому для уменьшения угрозы наводнений на этом участке реки берега укреплены различными железобетонными конструкциями: плитами, блоками, сваями и т.д.

Питание Терека – смешанное, с преобладанием ледникового. Около 70 стока приходится на теплое время года – весенне-летний период. Наибольшая водность в июле-августе, наименьшая – в феврале. Вода в реке темно-серого цвета. Мутность – $400\text{--}500 \text{ г/м}^3$. В воде содержится большое количество взвешенного материала: частичек горных пород, песка, ила и т.д. В отдельных частях русла, где

течение замедляется (в протоках и рукавах), образуются наносы [1–5].

Материал и методы исследования

В работе были использованы экологические (биоиндикация и биомониторинг), общегеографические, ихтиологические и гидробиологические методы исследования. Материалом для данной работы послужили полевые наблюдения и гидробиологические сборы из реки Терек, проведенные в период с января по декабрь 2014 г. Сбор водных животных проводился с использованием общепринятых гидробиологических методик [6–9]. Водные беспозвоночные собирались с камней, коряг и других затопленных предметов вручную, а также с использованием гидробиологического сачка. Для количественного учета гидробионтов использован бентометр Садовского (1948).

Качество воды в водоеме определялось биоиндикационным методом Пантле и Бука в модификации Сладечека [6, 7, 10]. Расчет сапробности (степени органического загрязнения) водоемов проведен по формуле

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i \times h_i)}{\sum_{i=1}^N h_i},$$

где S_o – общая сапробность водоема; S_i – индивидуальный индекс определенного вида; h_i – частота встречаемости, изменяющаяся от 1 до 9 (1 – в пробе единично; 3 – мало; 5 – средне; 7 – много; 9 – очень много).

Индивидуальные индексы сапробности (S_i) взяты из [6], а также других справочных пособий [11, 12]. Шкала зон сапробности приведена в табл. 1.

Таблица 1

**Шкала зон сапробности в реках по гидробиологическим показателям
(по [6], с некоторыми дополнениями)**

Качество вод	Класс вод	Индекс сапробности	Относительная численность олигохет от общего числа организмов в пробе, %
Очень чистые, ксеносапробные (х)	I	менее 0,5	1–20
Чистые, олигосапробные (о)	II	0,5–1,5	21–35
Умеренно загрязненные, β-мезосапробные (β)	III	1,51–2,50	36–50
Загрязненные, α-мезосапробные (α)	IV	2,51–3,5	51–65
Грязные, полисапробные (р)	V	3,51–4,50	66–85
Очень грязные, гиперполисапробные (hp)	VI	4,5 и более	86–100 или макрозообентос отсутствует

Определение амфибионтных беспозвоночных проводилось по личиночным и кукольным стадиям развития, а также личиночным и кукольным экзuviaм с использованием соответствующих определительных пособий [11, 13].

Для анализа гидрологической ситуации на месте исследования использована соответствующая справочная литература [4, 5, 12], а также собственные наблюдения, проведенные согласно общепринятым топографическим, гидрологическим и гидробиологическим методикам [6, 7].

Основные результаты исследования

В ходе исследования реки Терек изучались основные гидробиологические показатели: видовой состав, численность гидробионтов, рассчитан индекс сапробности (рис. 1) и олигохетный индекс.

Местоположение основных пунктов отбора проб (населенный пункт, км от устья) (рис. 2):

1а – 1-й створ – с.п. Плановское, 462, сш 43°24' вд 44°10';

1б – 2-й створ – ст. Александровская, 451, сш 43°28' вд 44°04';

1в – 3-й створ – с.п. Хамидие, 398, сш 43°24' вд 44°42'.

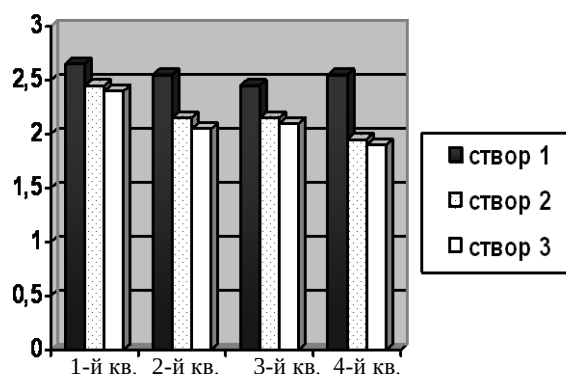


Рис. 1. Сапробность воды реки Терек за 2014 г.

Сапробность р. Терек на входе на территорию КБР (с.п. Плановское) составила 2,45–2,65 – от умеренно загрязненной до загрязненной (β - и α -мезосапробные). Олигохетный индекс – 11,3÷18,7 % (табл. 2).

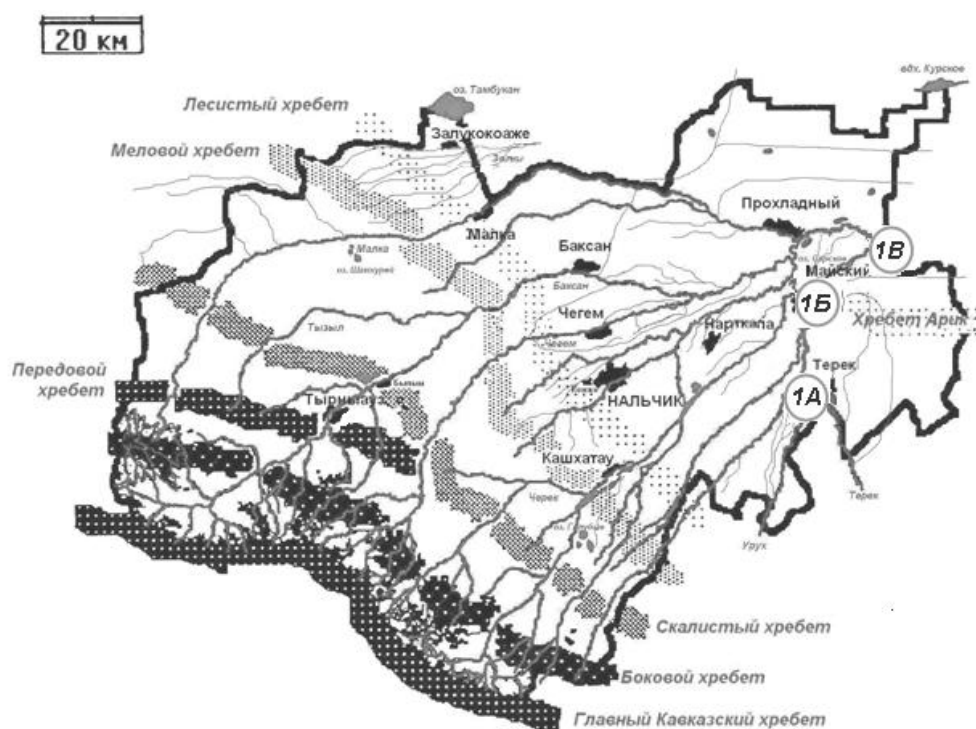


Рис. 2. Основные точки отбора проб (картографическая основа по А.В. Купцовой)

Таблица 2

Гидробиологические показатели реки Терек, 1-й створ с.п. Плановское

Гидробиологические показатели	1-й кв.	2-й кв.	3-й кв.	4-й кв.
Видовой состав	<i>Nematoda</i> , <i>Nais</i> sp., <i>Gammarus</i> sp., <i>Baetis</i> sp., <i>Heptageniidae</i> , <i>Hydropsyche</i> sp., <i>Chironomidae</i> (личинки и куколки), <i>Tipula</i> sp., <i>Simuliidae</i> , прочие <i>Diptera</i>			
Численность, шт.	1680	340	215	295
Индекс сапробности	2,65	2,55	2,45	2,55
Олигохетный индекс, %	15,2	18,7	16,7	11,3
Глубина/удаление от береговой линии, м	0,2–0,3/0,5			
Характер грунта	Галечник, валуны, каменисто-песчаный			
Температура воды, °C	+ 4	+ 16	+ 14	+ 11,5

В процессе протекания Терека по территории КБР у ст. Александровской сапробность составила 1,95–2,45 – β-мезосапробные, умеренно загрязненные воды. Олигохетный индекс – 10,5–18,3 % (табл. 3).

Таблица 3

Гидробиологические показатели реки Терек, 2-й створ ст. Александровская

Гидробиологические показатели	1-й кв.	2-й кв.	3-й кв.	4-й кв.
Видовой состав	<i>Nais</i> sp., <i>Gammarus</i> sp., <i>Baetis</i> sp., <i>Heptageniidae</i> , <i>Hydropsyche</i> sp., <i>Chironomidae</i> (личинки и куколки), <i>Tipula</i> sp., <i>Simuliidae</i> , прочие <i>Diptera</i>			
Численность, шт.	1985	1055	655	355
Индекс сапробности	2,45	2,15	2,15	1,95
Олигохетный индекс, %	18,3	10,5	14,2	17,1
Глубина/удаление от береговой линии, м	0,2–0,3/0,5			
Характер грунта	Галечник, валуны, каменисто-песчаный			
Температура воды, °C	+ 4	+ 17	+ 14	+ 11

После впадения в Терек р. Малка (с.п. Хамидие) наблюдается некоторое улучшение экологической обстановки: сапробность была в пределах 1,9–2,4, умеренно загрязненные воды (β-мезосапробные). Олигохетный индекс (4,5÷12,5 %) также указывает на снижение загрязнения Терека (табл. 4).

Как видно из табл. 2–4, на всех трех створах р. Терек видовой состав обитателей дна практически одинаков. Это свидетельствует о сходной экологической

обстановке на всем протяжении р. Терек в пределах Кабардино-Балкарии. Однако в период деятельности ООО «Кабардинский крахмал» происходит снижение качества воды в р. Терек, что обусловлено сбросами мелассы, барды и фугата с данного предприятия непосредственно в Терек и его притоки. В это время воды характеризуются как загрязненные (IV класс качества).

Таблица 4

Гидробиологические показатели реки Терек, 3-й створ с.п. Хамидие

Гидробиологические показатели	1-й кв.	2-й кв.	3-й кв.	4-й кв.
Видовой состав	<i>Nais</i> sp., <i>Gammarus</i> sp., <i>Baetis</i> sp., <i>Heptageniidae</i> , <i>Hydropsyche</i> sp., <i>Chironomidae</i> (личинки и куколки), прочие <i>Diptera</i>		<i>Nematoda</i> , <i>Nais</i> sp., <i>Gammarus</i> sp., <i>Baetis</i> sp., <i>Heptageniidae</i> , <i>Hydropsyche</i> sp., <i>Chironomidae</i> (личинки и куколки), прочие <i>Diptera</i>	
Численность, шт.	890	1015	435	105
Индекс сапробности	2,4	2,05	2,1	1,9
Олигохетный индекс, %	12,5	7,9	8,9	4,5
Глубина/удаление от береговой линии, м	0,2–0,3/0,5			
Характер грунта	Галечник, валуны, каменисто-песчаный			
Температура воды, °C	+ 4	+ 18	+ 14	+ 12

Литература

1. *Важнов А.Н.* Анализ и прогнозы стока рек Кавказа. М., 1966. 273 с.
2. Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды в КБР в 2002 г. Нальчик, 2003.
3. URL: <http://www.regnum.ru/news/ecology/1574014.html> (дата обращения: 11.12.2014).
4. *Казанчев С.Ч.* Характеристика зональных особенностей эколого-гидрологического режима водоемов КБР. Нальчик, 2003. 150 с.
5. *Лурье П.М.* Водные ресурсы и водный баланс Кавказа. СПб., 2002. 506 с.
6. *Горидченко Т.П.* Временные методические указания по гидробиологическому анализу качества вод малых рек. М., 1994. 312 с.
7. *Абакумов В.А.* Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. Л., 1983. 240 с.
8. *Липин А.Н.* Пресные воды и их жизнь. М., 1950. 350 с.
9. *Мордухай-Болтовский Ф.Д.* Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М., 1975. 240 с.
10. *Sladeczek V.* Water quality system // *Verh. Intern. Ver. Theor. Angew. Limnol.* 1966. Vol. 16. P. 809–816.
11. *Кутикова Л.А., Старобогатов Я.И.* Определитель пресноводных беспозвоночных европейской части СССР. Л., 1977. 512 с.
12. *Хатухов А.М., Якимов А.В.* Экология пресноводных животных: метод. указания. Нальчик, 1999. 44 с.
13. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий / под общ. ред. С.Я. Цалолихина. Т. 1–5. СПб., 1994–2001.

References

1. *Vazhnov A.N.* *Analiz i prognozy stoka rek Kavkaza* [Analysis and forecasts of river flows Caucasus]. Moscow, 1966, 273 p.

2. *Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii okruzhayushchei prirodnoi sredy v KBR v 2002 godu* [State report on the state of the environment in the KBR in 2002]. Nalchik, 2003.
3. Available at: www.regnum.ru/news/ecology/1574014.html (accessed 11.12.2014).
4. *Kazanchev S.Ch.* *Kharakteristika zonal'nykh osobennostei ekologo-gidrokhimicheskogo rezhima vodoemov KBR* [Characteristic features of the zonal ecological and hydrochemical regime of reservoirs KBR]. Nalchik, 2003, 150 p.
5. *Lur'e P.M.* *Vodnye resursy i vodnyi balans Kavkaza* [Water resources and water balance in the Caucasus]. SaintPetersburg, 2002, 506 p.
6. *Goridchenko T.P.* *Vremennye metodicheskie ukazaniya po gidrobiologicheskomu analizu kachestva vod malykh rek* [Interim guidelines for the hydro-biological analysis of water quality in small rivers]. Moscow, 1994, 312 p.
7. *Abakumov V.A.* *Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverkhnostnykh vod i donnykh otlozhenii* [Manual methods of hydrobiological analysis of surface water and sediments]. Leningrad, 1983, 240 p.
8. *Lipin A. N.* *Presnye vody i ikh zhizn'* [Fresh water and their lives]. Moscow, 1950, 350 p.
9. *Mordukhai-Boltovskii F.D.* *Metodika izucheniya biogeotse-nozov vnutrennikh vodoemov* [Method of study biogeocenosis inland waters]. Moscow, 1975, 240 p.
10. *Sladeczek V.* Water quality system. *Verh. Intern. Ver. Theor. Angew. Limnol.*, 1966, vol. 16, pp. 809-816.
11. *Kutikova L.A., Starobogatov Ya.I.* *Opredelitel' presnovodnykh bespozvonochnykh evropeiskoi chasti SSSR* [Key to freshwater invertebrates of the European part of the USSR]. Leningrad, 1977, 512 p.
12. *Khatukhov A.M., Yakimov A.V.* *Ekologiya presnovodnykh zhivotnykh* [Ecology of freshwater animals]. Methodical instructions. Nalchik, 1999, 44 p.
13. *Opredelitel' presnovodnykh bespozvonochnykh Rossii i sopredel'nykh territorii* [Key to freshwater invertebrates of Russia and adjacent territories]. Ed. S.Ya. Tsalolikhin. Vol. 1-5. SaintPetersburg, 1994-2001.

УДК 551.464

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-108-112

ПОВЕДЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ АЗОВСКОГО МОРЯ ВО ВРЕМЯ ВЕТРОВОЙ АКТИВНОСТИ*

© 2015 г. Ю.А. Федоров, И.В. Доценко, А.В. Михайленко

Федоров Юрий Александрович – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов н/Д, 344090, e-mail: fedorov@sfedu.ru

Доценко Ирина Владимировна – кандидат географических наук, доцент, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов н/Д, 344090, e-mail: irina-geo@mail.ru

Михайленко Анна Владимировна – преподаватель, кафедра физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов н/Д, 344090, e-mail: mikhailenkoanna@gmail.com

Fedorov Yuri Aleksandrovich – Doctor of Geographical Science, Professor, Head of Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: fedorov@sfedu.ru

Dotsenko Irina Vladimirovna – Candidate of Geographical Science, Associate Professor, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: irinageo@mail.ru

Mikhailenko Anna Vladimirovna – Lecturer, Department of Physical Geography, Ecology and Environment Protection, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: mikhailenkoanna@gmail.com

В основу настоящего исследования положены результаты комплексной экспедиции, проводившейся в Азовском море с 18 по 22 июля 2006 г. Уникальность исследований состояла не только в определении тяжелых металлов (ТМ) в двух формах миграции, но и в той гидрометеорологической обстановке отбора проб, которая характеризовалась как штормовая. Пробы воды отбирались в придонном и поверхностном горизонтах водной толщи. Определялось содержание свинца, меди, кадмия и цинка в растворенной и взвешенной формах миграции. Изучение соотношения растворенной и взвешенной форм свидетельствует о том, что в зависимости от района наблюдения преобладающей может быть как растворенная, так и взвешенная форма миграции ТМ. Содержание всех ТМ в растворенной форме миграции в пробах воды, отобранных в штормовой обстановке, оказалось более высоким в сравнении с их средним содержанием в целом за период с 1986 по 2006 г., которое приведено без учета состояния погоды. По-видимому, при сгонно-нагонных явлениях происходит активизация процессов деструкции органического и минерального вещества, содержание которого возрастает вследствие взмучивания донных отложений, что способствует переходу тяжелых металлов в водную толщу. Важным фактором может являться также поступление ТМ непосредственно из донных осадков в связи с изменением физико-химической обстановки на границе раздела сред и структуры их верхнего слоя. В этой связи рекомендуем учитывать этот гидрометеорологический феномен при осуществлении мониторинга за качеством воды Азовского моря.

Ключевые слова: Таганрогский залив, Азовское море, тяжелые металлы, свинец, медь, кадмий, цинк.

The present study is based on results of the complex expedition conducted in the Azov Sea from 18 to 22 July, 2006. The uniqueness of the research consisted in the determination of heavy metals in two forms of migration, but in the hydrometeorological conditions of sampling, which was characterized as a storm. Water samples were collected at near-bottom and surface horizons of the water column. The content was determined of lead, copper, cadmium and zinc in dissolved and suspended form of migration. To study the relationship between dissolved and suspended forms suggests that depending on the region of observation of the prevailing can be both dissolved and suspended form of migration of heavy metals. The content of all heavy metals in the dissolved form of migration in water samples collected in the storm environment was higher in comparison with their mean concentrations for the whole period from 1986 to 2006 given without taking into account the weather condition. Apparently, when wind-tide phenomena causes the activation of processes of destruction of organic and mineral substances, the content of which increases due to the rising up of sediment that contribute to the transition of heavy metals in the water column. An important factor may be the receipt heavy metals directly from the sediments due to changes in the physico-chemical environment at the interface and structure of the upper layer. In this regard, please consider this meteorological phenomenon in monitoring the quality of water of the Azov Sea.

Keywords: Taganrog Bay, Azov Sea, heavy metals, lead, copper, cadmium, zinc.

*Работа выполнена при финансовой поддержке проектов № 1334, 5.1848.2014/К.

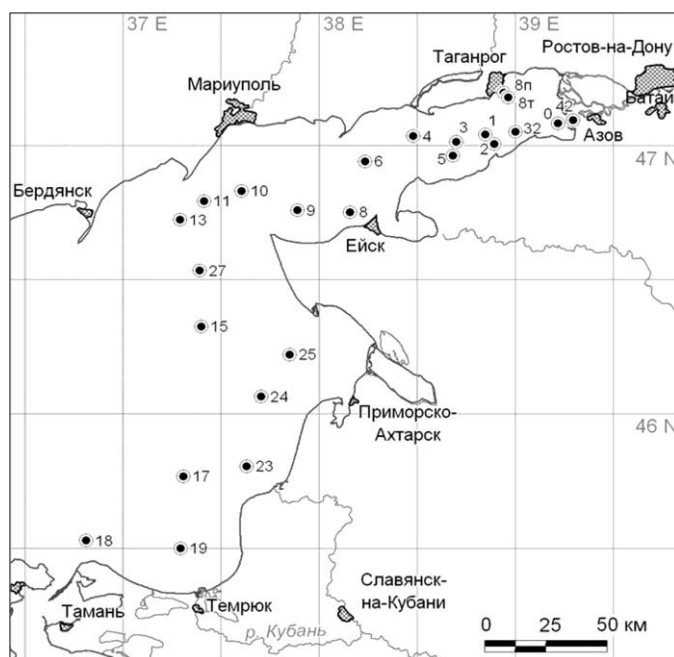
Тяжелые металлы (ТМ), содержание которых в природных водах находится в сравнении с главными ионами в существенно меньших количествах, часто называют следовыми, или микроэлементами. В своей основной массе они имеют как природное, так и техногенное происхождение. В содержании, не превышающем ПДК (предельно допустимые концентрации в растворенной форме), они не представляют угрозы для существования гидробионтов. В случае превышения этого порогового значения находящиеся в воде ТМ могут оказать токсическое воздействие на водные организмы. Мониторинг содержания ТМ в воде Азовского моря осуществляют многие исследователи. Наиболее представительные результаты можно найти в [1–5]. В работах [6–8] отмечалось, что наряду с физико-химическими и биохимическими факторами и процессами на распределение концентраций и поведение ТМ, особенно ртути, определенное влияние может оказывать гидрометеорологическая обстановка. Для экосистемы Азовского моря это особенно важно ввиду его мелководности и склонности к ресуспензированию верхнего слоя донных отложений. Неменьший интерес представляет собой изучение содержания ТМ в различных формах миграции – растворенной и взвешенной. Отметим, что подобных исследований ранее не проводилось, в то время как учет особенностей распределения и поведения ТМ во время сгонно-нагонных явлений может внести коррективы в существующую методику мониторинга Азовского моря.

Основная цель данной статьи – обсуждение результатов определения ТМ во взвеси и воде, ото-

бранных при гидрометеорологической обстановке, которая характеризовалась как штормовая.

Материалы и методы

В основу настоящего исследования положены результаты комплексной экспедиции, проводившейся в Азовском море с 18 по 22 июля под руководством проф. Ю.А. Федорова на станциях мониторинга (рисунк), осуществляемого кафедрой физической географии, экологии и охраны природы ЮФУ. В кодовых районах Таганрогского залива маршруты проводились на фелюге «Гроза», в то время как в более глубоководных – на судне ММД БГК-244. Пробы воды отбирались в придонном и ном горизонтах в соответствии с требованием водства с помощью десятилитрового батометра Нискина. Определение металлов в нефiltroванных (валовая форма) и фильtroванных (растворенная форма) пробах выполнялось атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией проб по методике [9] в соответствии с договором между ГХИ и кафедрой физической географии, экологии и охраны природы ЮФУ под общим руководством и при непосредственном участии к.х.н. Л.В. Боевой и к.г.н. Д.Н. Гарькуши, которым за полезную сию авторы выражают благодарность. Измерения выполнялись на АА-спектрометре «КВАНТ-З.ЭТА». Содержание ТМ во взвеси определялось расчетным путем по разности между валовой и творенной формами.



Карта-схема отбора проб воды в Азовском море (июль 2006 г.)

Результаты и их обсуждение

Описание распределения содержания свинца, меди, кадмия и цинка производилось для акватории Таганрогского залива, собственно Азовского моря (открытая часть) и водоема в целом (табл. 1, 2). Это обусловлено тем, что подобный подход был реализован А.А. Кленкиным и др. в работе [4], где представлен большой массив данных с 1986 по 2006 г. Эти сведения ранжированы по периодам: 1986–1990, 1991–1999, 2000–2006 гг. и по сезонам (весна,

лето, осень). Ими были отмечены тенденция снижения концентрации свинца, меди, кадмия и цинка в воде водоема с 1986 по 2006 г. и её слаборегистрируемый рост от весны к осени. Результаты приведены без учета состояния погоды во время отбора проб. Поскольку наш рейс проводился летом 2006 г., но во время шторма, мы посчитали возможным сравнить содержания ТМ со средними значениями содержания следовых элементов, полученных нашими коллегами также в летний период без учета погодных условий.

Таблица 1

Средние концентрации тяжелых металлов в воде Азовского моря в целом, мкг/л

Период времени	Pb	Cu	Cd	Zn	Источник
1986–1990	<u>1,5–3,5</u> 2,4	<u>6,0–31,0</u> 16,6	<u>0,1–0,32</u> 0,17	–	[4]
1991–1999	<u><0,4–2,1</u> 0,78	<u><1,0–8,4</u> 3,27	<u><0,1–0,29</u> 0,24	<u>1,7–37</u> 11,27	Там же
2000–2006	<u>0,4–0,8</u> 0,66	<u>1,5–7,9</u> 3,9	<u><0,1–0,46</u> 0,17	<u>2,7–10,0</u> 7,2	Там же
2006, шторм	<u><2–9,5</u> 3,2	<u>2,0–20,5</u> 10,2	<u>0,22–0,60</u> 0,35	<u>6,9–78,8</u> 38,9	Данные авторов

Содержания растворенной формы миграции свинца, меди, кадмия и цинка в воде акватории Азовского моря, включая Таганрогский залив, в период исследований, соответственно, варьировали в пределах 2,0–9,5 (в среднем 3,2), 2,0–20,5 (в среднем 10,2), 0,22–0,60 (в среднем 0,35), 6,9–78,8 (в среднем 38,9) мкг/л; в Таганрогском заливе – 2,0–8,4 (в среднем 3,18), 2,0–12,7 (в среднем 7,1), 0,18–0,6 (в среднем 0,29), 8,8–44,2 (в среднем 17,9); собственно в море – 2,0–9,5 (3,2), 10,0–20,5 (в среднем 14,0), 6,9–78,8 (в среднем 27,9) мкг/л. Эти результаты в целом хорошо согласуются с полученными ранее нами, А.А. Кленкиным и др. [4] за длительный период наблюдений (табл. 1, 2). Сравнение всего массива данных показало, что на распределение растворенных форм ТМ в воде Азовского моря влияет не только сезон отбора проб, но и состояние погоды. Так, в летний период 2006 г. во время продолжительного шторма содержание растворенной формы всех вышеуказанных ТМ и во всех частях акватории моря оказалось в среднем несколько выше, чем в пробах, отобранных здесь в течение лета того же года [4].

По-видимому, при сгонно-нагонных явлениях происходит активизация процессов деструкции органического и минерального вещества, содержание которого возрастает вследствие взмучивания

донных отложений и перехода в водную толщу [2]. Важным фактором может являться также поступление ТМ непосредственно из донных осадков в связи с изменением физико-химической обстановки на границе раздела сред и структуры их верхнего слоя [6–8].

Содержания взвешенной формы миграции свинца, меди, кадмия и цинка в воде акватории Азовского моря, включая Таганрогский залив, в период исследований, соответственно, варьировали в пределах 2,0–29,4 (в среднем 10,3), 0,1–0,9 (в среднем 0,16), 1,6–6,3 (в среднем 4,0), 3,6–83,4 (в среднем 31,7); в Таганрогском заливе – 7,2–15,8 (в среднем 13,2), 0,3–31,1,5 (в среднем 11,7), 0,01–0,14 (в среднем 0,05), 6,1–83,4 (в среднем 33,5) мкг/л; собственно в море – 3,1–29,4 (в среднем 11,1), 0,4–19,0 (в среднем 8,7), 0,1–0,6 (в среднем 0,32), 3,6–50,7 (в среднем 29,6) мкг/л.

Изучение соотношения растворенной и взвешенной форм свидетельствует о том, что в зависимости от района наблюдения преобладающей может быть как растворенная, так и взвешенная форма миграции меди, кадмия и цинка. Для всех металлов характерно преобладание растворенной формы над взвешенной в приустьевом участке восточного района Таганрогского залива (ст. 0).

Таблица 2

Средние концентрации тяжелых металлов в воде Таганрогского залива и собственно моря, мкг/л

Период времени	Таганрогский залив				Собственно море				Источник
	Pb	Cu	Cd	Zn	Pb	Cu	Cd	Zn	
Среднегодовые концентрации, в целом за год									
1986–1990	<u><0,4–5,9</u> 2,52	<u>1,0–88,0</u> 19,4	<u>0,1–0,3</u> 0,13	–	<u><0,4–6,1</u> 1,9	<u><1,0–38,0</u> 13,6	<u><0,1–0,5</u> 0,23	–	[4]
1991–1999	<u>0,4–5,0</u> 0,95	<u><1,0–8,6</u> 4,03	<u><0,1–0,44</u> 0,16	<u>1,3–37,0</u> 11,2	<u><0,4–4,8</u> 0,85	<u><1,0–8,5</u> 3,5	<u><0,1–0,49</u> 0,2	<u>1,6–28,0</u> 9,6	Там же
2000–2006	<u>0,4–2,4</u> 0,74	<u>1,3–12,0</u> 3,98	<u>0,1–0,59</u> 0,17	<u>2,7–15,0</u> 6,5	<u>0,4–1,1</u> 0,7	<u>1,2–8,4</u> 4,3	<u><0,1–0,39</u> 0,19	<u>1,2–23,0</u> 11,27	Там же
Среднегодовые концентрации, лето									
1986–1990	<u><0,4–4,3</u> 1,5	<u>6,1–34,0</u> 14,8	<u><0,1–0,2</u> 0,12	–	<u><0,4–5,3</u> 1,84	<u>4,9–24,0</u> 18,1	<u><0,1–0,40</u> 0,26	–	Там же
1991–1999	<u>0,4–2,2</u> 1,0	<u><1,0–7,2</u> 3,7	<u><0,1–0,56</u> 0,20	<u>1,3–25,0</u> 11,0	<u><0,4–1,6</u> 0,65	<u><1,0–6,8</u> 2,6	<u><0,1–0,31</u> 0,25	<u>1,8–25,0</u> 7,42	Там же
2000–2006	<u>0,51–0,97</u> 0,68	<u>7,13–8,8</u> 2,57	<u><0,1–0,13</u> 0,09	<u>1,3–8,8</u> 4,2	<u>0,58–1,1</u> 0,85	<u>1,2–7,0</u> 3,44	<u>0,13–0,34</u> 0,21	<u>1,2–8,5</u> 6,7	Там же
2006	0,51	4,1	0,12	3,5	0,89	3,3	0,13	4,6	Там же
2006, шторм	<u><2–8,4</u> 3,18	<u>2,0–12,7</u> 7,1	<u>0,18–0,6</u> 0,29	<u>8,8–44,2</u> 17,9	<u>2,0–9,5</u> 3,2	<u>10,0–20,5</u> 14,0	<u>0,10–0,60</u> 0,32	<u>6,9–78,8</u> 27,9	Данные авторов

Для кадмия такая картина наблюдается по всему Таганрогскому заливу вплоть до зоны смешения вод залива с водами открытой акватории моря (ст. 11, 13). Для меди в западном районе залива (ст. 6–11) и отдельных участках открытой акватории (ст. 15, 18) моря фиксируется преобладание взвешенной формы миграции над растворённой. Для цинка на большинстве станций опробования содержание взвешенной формы преобладает, при этом по направлению от вершины залива к его устью процент в целом увеличивается, резко падая в открытой акватории моря. Преобладание растворённой формы цинка над его взвешенной формой отмечается только в воде дельты Дона и приустьевом участка реки (ст. 42 и 0), а также в открытой акватории моря (ст. 25, 18, 15). Ранее [6–8] в обстановке относительного безветрия были зарегистрированы более высокие концентрации ТМ, например, ртути, во взвешенном веществе по отношению к их содержанию в растворе. Это является косвенным доказательством более интенсивного перехода ТМ из взвеси в воду в условиях ветреной погоды по отношению к штилевой.

Пространственное распределение свинца, меди, кадмия и цинка характеризовалось в целом некоторым повышением их валового содержания, а также растворённых форм в направлении восточный район залива → западный район → открытая акватория Азовского моря. Для взвешенных форм этих элементов характерно увеличение от вершины залива к зоне смешения вод залива с водами открытой акватории моря, после чего для меди и цинка наблюдается некоторое падение содержания взве-

шенной формы, в то время как содержание кадмия во взвеси открытой акватории, напротив, увеличивается. Вообще следует отметить заметное сходство в распределении валового содержания, взвешенной и растворённой форм меди и цинка по акватории Азовского моря, в поведении же кадмия проявляются некоторые отличия. Так, если в целом наиболее низкие концентрации изученных форм миграции меди и цинка отмечены в приустьевом участке восточного района залива (ст. 0), то для кадмия здесь выявлен максимум содержания его растворённой формы. Повышенные концентрации растворённой и взвешенной форм свинца, меди и цинка обнаружены в районе городов Таганрог и Ейск, причём в последнем районе выявлены максимальные значения. Для кадмия какого-либо заметного скачка содержания его растворённой или взвешенной формы на этих участках не зафиксировано. В то же время на выходе из залива (ст. 11 и 13) содержание растворённой формы и меди, и кадмия резко увеличивается. Как правило, распределение содержания этих элементов в поверхностном слое воды коррелирует с их распределением в придонном горизонте.

В заключение отметим, что сравнение данных, полученных А.А. Кленкиным и др. [4], с нашими (табл. 1 и 2) показало существенные различия. Во время ветровой активности перераспределение и поведение ТМ в экосистеме Азовского моря приводят к росту их содержания в воде по отношению к средним межгодовым и внутригодовым сезонным концентрациям. В этой связи рекомендуем учитывать этот гидрометеорологический феномен при

осуществлении мониторинга за качеством воды Азовского моря.

Литература

1. Орадовский С.Г., Зубакина А.Н., Кузнецова И.М. Изучение форм существования загрязняющих веществ в морской среде (на примере Таганрогского залива Азовского моря) // *Метеорология и гидрология*. 1994. № 1. С. 69–78.
2. Федоров Ю.А. Стабильные изотопы и эволюция гидросферы. М., 1999. 370 с.
3. Федоров Ю.А., Березан О.А., Величко М.Л. Распределение и уровни концентрации ртути в атмосфере и водоемах Азовского моря // *Экосистемные исследования Азовского моря и побережья*. Апатиты, 2002. С. 150–166.
4. Кленкин А.А., Корпакова И.Г., Павленко И.Ф., Темердашев З.А. Экосистема Азовского моря: антропогенное загрязнение. Краснодар, 2007. 324 с.
5. Федоров Ю.А., Предеина Л.М., Предеин М.Н., Андреев Ю.А. О соотношении растворенной и взвешенной форм ртути на примере р. Дон // *Тез. докл. XV междунар. школы морской геологии*. М., 2003. Т. I. С. 344–346.
6. Федоров Ю.А., Доценко И.В., Михайленко А.В. Особенности распределения и мониторинга ртути в экосистеме Азовского моря при различной гидрометеорологической обстановке // *Проблемы безопасности в водохозяйственном комплексе России: сб. тр. Всерос. науч. конф.* Краснодар, 2010. С. 438–446.
7. Федоров Ю.А., Доценко И.В., Михайленко А.В. Поведение зон гипоксии, концентраций ртути и восстановленных газов в условиях перманентно изменяющейся гидрологической обстановки в Азовском море // *Устойчивость водных объектов и прибрежных территорий; риски их использования: сб. науч. тр. Всерос. науч. конф.* Калининград, 25–30 июля 2011 г. Калининград, 2011. С. 413–420.
8. Fedorov Yu.A., Dotsenko I.V., Mikhailenko A.V. The role of the hydrological factors in the formation of field concentrations and fluxes of reduced gases and mercury in the Sea of Azov // *Conference Proceedings of 11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*. Albena, Bulgaria, 20–25 June, 2011. Vol. III. P. 717–723.
9. Д 52.24.377-95. Массовая концентрация металлов (Al, Ag, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, V, Zn) в водах. Методика выполнения измерений методом атомной абсорбции с прямой электротермической атомизацией проб.
10. go moriya) [The study forms the existence of pollutants in the marine environment (for example, the Taganrog Bay of the Azov Sea)]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 1994, no 1, pp. 69–78.
11. Fedorov Yu.A. *Stabil'nye izotopy i evolyutsiya gidrosfery* [Stable isotopes and the evolution of the hydrosphere]. Moscow, 1999, 370 p.
12. Fedorov Yu. A., Berezan O. A., Velichko M. L. *Raspredelenie i urovni kontsentratsii rtuti v atmosfere i vodoemakh Azovskogo basseina* [Distribution and levels of mercury concentrations in the atmosphere and waters of the Azov basin]. *Ekologicheskie issledovaniya Azovskogo morya i poberezh'ya*. Apatity, 2002, pp. 150–166.
13. Klenkin A.A., Korpakova I.G., Pavlenko L.F., Temerdashev Z.A. *Ekosistema Azovskogo morya: antropogennoe zagryaznenie* [The ecosystem of the Azov Sea: anthropogenic pollution]. Krasnodar, 2007, 324 p.
14. Fedorov Yu.A., Predeina L.M., Predein M.N., Andreev Yu.A. [On the relation between dissolved and suspended forms of mercury in the example of the river Don]. *Tezisy dokladov 15 mezhdunarodnoi shkoly morskoi geologii* [Abstracts of the 15th International School of Marine Geology]. Moscow, 2003, vol. 1, pp. 344–346.
15. Fedorov Yu.A., Dotsenko I.V., Mikhailenko A.V. [Features of allocation and monitoring of mercury in the ecosystem of the Sea of Azov at various hydrometeorological conditions]. *Problemy bezopasnosti v vodokhozyaistvennom komplekse* [Security issues in the water sector]: Proceedings of the Scientific Conference. Krasnodar, 2010, pp. 438–446.
16. Fedorov Yu.A., Dotsenko I.V., Mikhailenko A.V. [The behavior of zones of hypoxia, mercury concentrations and reduced gases in the conditions of permanently changing hydrological conditions in the Sea of Azov]. *Ustoichivost' vodnykh ob'ektov i pribrezhnykh territorii; riski ikh ispol'zovaniya* [Stability of water bodies and coastal areas; the risks of their use]. Collection of scientific papers of the Scientific Conference. Kaliningrad, 2011, pp. 413–420.
17. Fedorov Yu.A., Dotsenko I.V., Mikhailenko A.V. The role of the hydrological factors in the formation of field concentrations and fluxes of reduced gases, and mercury in the Sea of Azov. *Conference Proceedings of 11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*. Albena, Bulgaria, June 20–25, 2011, vol. 3, pp. 717–723.
18. D 52.24.377-95. *Massovaya kontsentratsiya metallov (Al, Ag, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, V, Zn) v vodakh. Metodika vypolneniya izmerenii metodom atomnoi absorbtzii s pryamoi elektrotermicheskoi atomizatsiei prob* [D 52.24.377-95. Weight concentration of metals (Al, Ag, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, V, Zn) in water. Methods of measurement by atomic absorption with a direct electrothermal atomization of samples].

References

1. Oradovskii S.G., Zubakina A.N., Kuznetsova I.M. Izuchenie form sushchestvovaniya zagryaznyayushchikh veshchestv v morskoi srede (na primere Taganrogsogo zaliva Azovsko-

УДК 551.468(262.54)

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-113-118

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВАНАДИЯ, НИКЕЛЯ И МОЛИБДЕНА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ТАГАНРОГСКОГО ЗАЛИВА

© 2015 г. В.О. Хорошевская

Хорошевская Виктория Олеговна – кандидат географических наук, научный сотрудник, Гидрохимический институт Росгидромета, пр. Стачки, 189, г. Ростов-на-Дону, 344090; научный сотрудник, Центр судебной экспертологии им. Буринского Южного федерального университета, ул. Большая Садовая, 105/42, г. Ростов-на-Дону, 344029, e-mail: vv.z2@yandex.ru

Khoroshevskaya Victoriya Olegovna – Candidate of Geographical Science, Researcher, Hydrochemical Institute of Rosgidromet, Stachki Ave., 198, Rostov-on-Don, 344090, Russia; Researcher, Burinsky Forensic Expertology Center of the Southern Federal University, Bolshaya Sadovaya St., 105/42, Rostov-on-Don, 344029, Russia, e-mail: vv.z2@yandex.ru

Используются материалы исследований, проведенных в Таганрогском заливе в октябре 2012 г. и в апреле 2014 г. Изучалось содержание ванадия, никеля и молибдена в донных отложениях Таганрогского залива, исследован гранулометрический состав донных отложений. Показана связь повышенных содержаний металлов между собой и с различными фракциями донных отложений. Приводятся зоны повышенных (относительно кларков в осадочных породах, глины и сланцы) содержаний молибдена.

Ключевые слова: ванадий, никель, молибден, Таганрогский залив, донные отложения.

The article is written based on research conducted in Taganrog Bay in October 2012 and April 2014. We studied the content of vanadium, nickel and molybdenum in the sediments of the Taganrog Bay. Was also investigated particle size distribution of bottom sediments. The article shows the relationship of elevated metal contents among themselves, and with the various factions of sediments. The article leads zone increased (relative to clarke in sedimentary rocks, clays and shales) molybdenum content.

Keywords: vanadium, nickel, molybdenum, Taganrog Bay, bottom sediment.

Органоминеральные многовековые илистые отложения слабосоленых и пресноводных континентальных водоёмов содержат свыше 15 % органических веществ. К типоморфным элементам илов-сапропелей относятся ванадий (V), молибден (Mo), никель (Ni) [1]. С другой стороны, эти металлы с позиций бионеорганической химии относятся к классу биометаллов. В живых организмах некоторые молекулы или ионы являются биолигандами и взаимодействуют с биометаллами. Одним из примеров биолигандов являются белки, и их свойства как биолигандов определяются содержанием в полипептидных цепях донорных атомов азота и кислорода, которые могут участвовать в образовании хелатных циклов и макроциклических комплексов с металлами [2]. Кроме того, к их полипептидным цепям могут быть привязаны порфириновые кольца. Порфирин представляет собой пример макроциклического лиганда с четырьмя донорными атомами азота, которые координируются ионами металла. Порфириновые металлоциклы содержатся в хлорофилле растений и гемоглобине крови. Имеющиеся сведения о функциях ванадия в организмах говорят о том, что он наряду с железом участвует в процессах фотосинтеза и входит в порфириновые

комплексы сине-зелёных водорослей (цианобактерий) [3].

Никель известен как один из биометаллов, входящих в состав металлпорфиринового комплекса – гемоглобина. Также никель вместе с кофактором F-430 «способствует» бактериям-метаногенам восстанавливать группы CH_3CO до CH_4 [2].

Молибден как биометалл участвует в углеводном обмене, а также в синтезе хлорофилла. Связь между повышенным содержанием молибдена и ростом первичной продукции сине-зелёных водорослей – цианобактерий и азотобактерий, фиксирующих азот, установил в 30-е гг. А.П. Виноградов [2].

Таким образом, ванадий и молибден не просто мигрируют и накапливаются в органическом веществе фитопланктона донных отложений, но и активно стимулируют рост последнего [2]. Важная особенность ванадия – он склонен к изменению валентности в ходе обмена веществ, например, от V^{+2} – «ювенильного» восстановителя до V^{+5} (формы нахождения в нефти и угле) – сильнейшего окислителя [2, 3].

Изучение в 80-е гг. XX в. процессов потребления водорослями никеля и ванадия в Таганрогском заливе показало, что они сравнимы с поступлением металлов в растворённом состоянии с водным сто-

ком р. Дон (табл. 1) [4]. Целью настоящего исследования являлось изучение пространственного распределения никеля, ванадия и молибдена в донных

отложениях Таганрогского залива и связи содержания металлов с гранулометрическим составом и органическим веществом.

Таблица 1

Ежегодное потребление химических элементов фитопланктона Таганрогского залива

Химический элемент	Вынос р. Дон в растворенной форме, т/г (по [4]) ¹	Среднее содержание в тотальном фитопланктоне, % на сухое вещество (по [5])	Потребление фитопланктоном, т/год (по [5]) ²
V	140,0	0,0055	137,5
Ni	100,0	0,0029	71,5
Mo	100,0	Не определяли	Не определяли

Примечание. ¹ – среднееголетний годовой сток р. Дон составлял в 80-е гг. XX в. 25,3 км³ [4]; ² – продуктивность фитопланктона, по данным [5], составляет 2,5 млн т сухого вещества.

Материалы и методы

Основой настоящего исследования стали результаты экспедиций, проведенных в Таганрогском заливе в октябре 2012 г. и в апреле 2014 г. Съёмки проводились с маломерного речного судна, оборудованного навигатором, по выборочным 12 станциям стандартной сетки наблюдений Росгидромета в Таганрогском заливе (рис. 1). Пробы отбирались с помощью дночерпателя «Океан-0,025» погружением на 15 см от поверхности дна. В соответствии с об-

щими требованиями для анализа на загрязненность [6] пробы донных отложений отбирались в полиэтиленовые пакеты. С момента отбора до пробоподготовки и анализа в лабораторных условиях пробы хранили охлажденными при температуре 4 °С. Количественный анализ никеля, ванадия и молибдена в донных отложениях проводили методом атомной абсорбции с электротермической атомизацией на атомно-абсорбционном спектрометре «Квант-З.ЭТА» производства ООО «Кортэк». Анализ осуществляли в соответствии с [7].

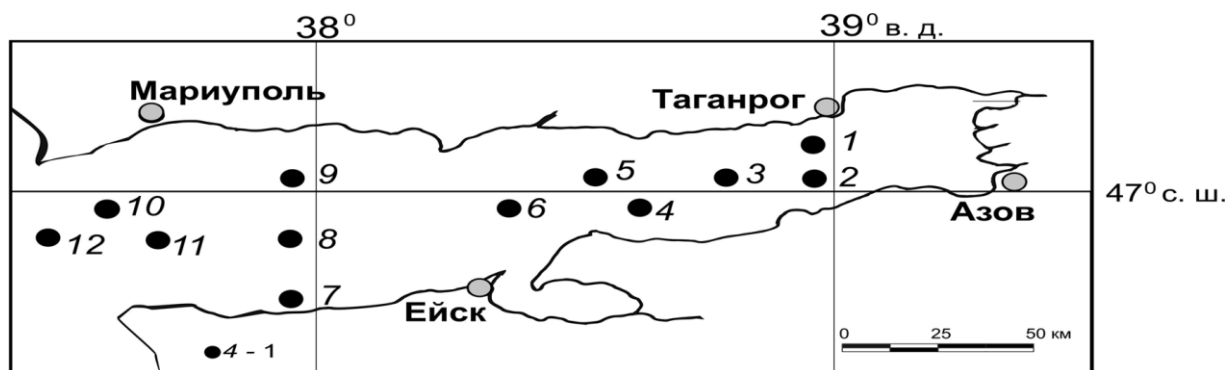


Рис. 1. Карта расположения станций отбора проб в Таганрогском заливе: 1 – станция отбора проб

Донные отложения высушивали на чашках Петри до воздушно-сухого состояния в сушильном шкафу при температуре 105 °С и перетирали в яшмовой ступке. Навеску пробы (около 1,5 г), взвешенную на аналитических весах с точностью 0,1 мг, помещали в термостойкую коническую колбу, добавляли 10 мл 50%-й азотной кислоты и кипятили в течение 2 ч на водяной бане. Полученный экстракт количественно переносили через фильтр «синяя лента» в мерные колбы объемом 50 мл и доводили до метки деионизированной водой. Вся используемая в ходе пробоподготовки и анализа химпосуда была очищена от

следов тяжелых металлов замачиванием в растворе азотной кислоты и промыва водопроводной и деионизированной водой. Полученный экстракт анализировали методом калибровочного графика в двух повторностях. Результат считали приемлемым, если СКО между двумя параллельными определениями были меньше 10 %. Контроль правильности определения металлов осуществляли добавками металлов во время анализа. Воспроизводимость добавок была не хуже 90 %.

Гранулометрический состав донных отложений определялся по ГОСТу [8].

Анализ результатов

В результате экспериментальных исследований получены данные по гранулометрическому составу донных отложений в Таганрогском заливе и содержанию в них ванадия, никеля и молибдена по площади по двум сезонным съёмкам. Анализ полученных результатов показывает, что содержание глинистой фракции в осенний период превышает в среднем в 1,3 раза содержание этой фракции весной по всей акватории Таганрогского залива (рис. 2).

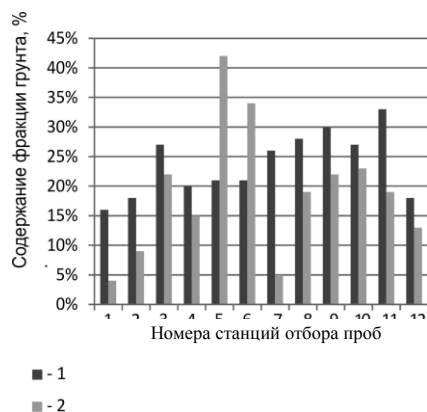


Рис. 2. Гистограммы распределения фракции глинистого грунта (<0,01 мм) в донных отложениях Таганрогского залива: 1 – октябрь 2012 г.; 2 – апрель 2014 г.

Для других фракций донных отложений больших различий в распределениях по сезонам не выявлено.

Средние значения содержания биометаллов в донных отложениях в осенний сезон превышают содержания по сравнению с весенним периодом для ванадия в 1,5 раза, никеля – в 1,7 раза по всей акватории Таганрогского залива (рис. 3, 4). Средние значения содержания молибдена стабильны для двух сезонов (рис. 5).

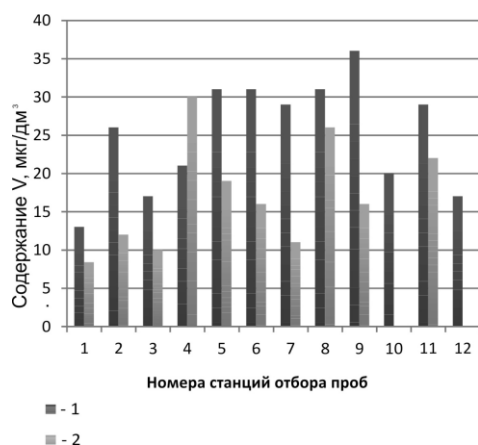


Рис. 3. Гистограммы распределения ванадия в донных отложениях Таганрогского залива: 1 – октябрь 2012 г.; 2 – апрель 2014 г.

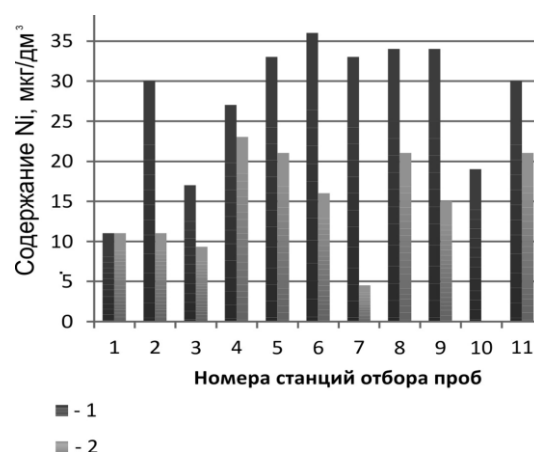


Рис. 4. Гистограммы распределения никеля в донных отложениях Таганрогского залива: 1 – октябрь 2012 г.; 2 – апрель 2014 г.

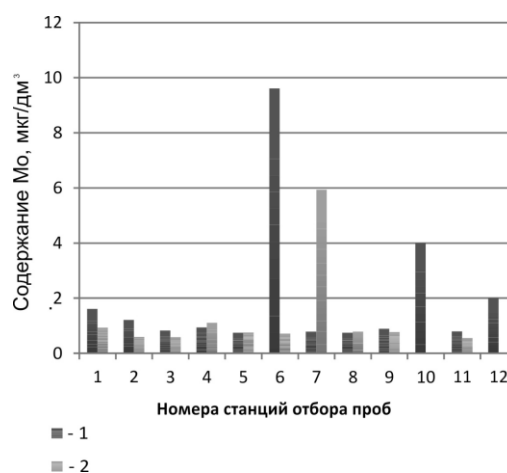


Рис. 5. Гистограммы распределения молибдена в донных отложениях Таганрогского залива: 1 – октябрь 2012 г.; 2 – апрель 2014 г.

Сравнение средних содержаний никеля, ванадия и молибдена в донных отложениях в осенний сезон (с максимальными из полученных значениями) со значениями кларков для осадочных пород (глина и сланцы) (табл. 2) показывает, что для никеля и ванадия в донных отложениях Таганрогского залива они намного ниже значений кларков для осадочных пород, а содержание молибдена в среднем равно значению кларка для осадочных пород [9]. Максимальные значения содержания никеля и ванадия ни разу не превышали кларковые значения, а молибдена – превышали на некоторых точках отбора в несколько раз. Районы с повышенным содержанием молибдена приурочены к портам. Эти значения не превышают данные, приведенные для молибдена в голландских таблицах, которые используются как критерий загрязнения донных отложений для морских экосистем [5].

Таблица 2

**Средние значения содержания никеля, ванадия и молибдена
в донных отложениях Таганрогского залива и в осадочных породах континентов, мкг/г**

Элементы	Донные отложения Таганрогского залива			Осадочные породы* (глины+сланцы) по [9]
	Минимальная	Максимальная	Средняя	
Ni	11,0	36,0	26,4	95,0
V	13,0	36,0	25,1	130,0
Mo	0,74	9,6	2,0	2,0

* – приведены средние концентрации для осадочных пород континентов по [9].

В октябре 2012 г. на точке отбора № 10 в районе г. Мариуполя (рис. 1) содержание молибдена равнялось 4,0 мкг/г, в апреле 2014 г. на точке отбора № 7 район г. Ейска (рис. 1) – 5,93 мкг/г. По данным [10], в районе порта г. Таганрога среднее содержание молибдена за десять лет (2001–2011 гг.) в донных отложениях равнялось 3,1 мкг/г в районе порта, в районе яхт-клуба – 4,2 мкг/л. Интересен тот факт, что в донных отложениях в зоне влияния шлакоотвала металлургического завода ОАО «Тагмет» и в зоне нахождения шламонакопителя металлургического завода г. Таганрога, дренажные воды которого поступают в Таганрогский залив, содержание молибдена в донных отложениях составляет всего лишь 1,3 и 2,2 мкг/г соответственно. Очевидно, молибден мигрирует по побережью с высокощелочными дренажными водами. Известна тесная связь молибдена с активным органическим веществом, содержащим аминный азот [11], что также способствует распространению молибдена посредством фитопланктона по донным отложениям дальше по площади Таганрогского залива.

Изучение связи между содержанием биометаллов в донных отложениях и гранулометрическим составом установило связи между содержанием ванадия, никеля и глинистой фракцией (< 0,01 мм) [12]. Для никеля коэффициент корреляции в среднем равняется $r = 0,53$. Для ванадия – $r = 0,60$ в октябре 2012 г. и $r = 0,28$ в апреле 2014 г., т.е. весной связь между глинистой фракцией и ванадием является слабой. Скорее всего, это – следствие снижения количества детрита фитопланктона в глинистой фракции весной. Ранее было установлено, что по мере увеличения фракции 0,01 мм в донных отложениях растёт количество органического углерода, поскольку глинистые частицы <0,01 мм больше других адсорбируют органическое вещество, растворенное в воде, и захватывают детрит, оседающий на дно водоёма [13]. Очевидно, что весной в глинистой фракции снижается содержание органического вещества фитопланктона и, как следствие, снижается содержание ванадия – металла, аккумуля-

лируемого сине-зелёными водорослями (цианобактериями) [12]. Установлена очень сильная корреляционная связь между содержанием ванадия и никеля в донных отложениях ($r = 0,92$). Выявленная закономерность позволяет говорить о наличии ванадиево-никелевого комплекса органического вещества. Связь между содержанием в донных отложениях ванадия и молибдена (никеля и молибдена) не фиксируется.

Специфика накопления органического вещества во внутриконтинентальных морях аридной зоны состоит в несовпадении на некоторых участках концентраций взвешенного органического вещества в поверхностном и даже придонном слоях воды и абсолютных масс органического углерода в донных отложениях. Известно, что наиболее продуктивными районами являются в Азовском море прибрежные воды (Таганрогский залив), а с удалением от берега продуктивность фитопланктона убывает [4, 13]. Соответственно, распределяется и взвешенное вещество в водной толще. Выявлена тесная связь между продукцией фитопланктона и концентрацией взвешенного органического вещества в толще воды. Максимальное количество органического материала на поверхности Азовского моря фиксируется летом благодаря цветению теплолюбивого планктона. Коэффициент корреляции между биомассой фитопланктона и количеством взвешенного органического вещества для поверхностного горизонта водной толщи в летний период равняется $r = 0,85$, а для придонного – $r = 0,6$ [4]. Повышение содержания органического углерода в донных отложениях Азовского моря отмечается в направлении западной глубоководной зоны [14]. Эта особенность накопления органического вещества была обнаружена ещё в 50-е гг. XX в. Инверсия в пространственном размещении зон образования и накопления органического вещества обусловлена действием гидродинамического режима, под влиянием которого продуцируемое в прибрежных участках органическое вещество частично транспортируется в глубоководные впадины, обогащая там донные отложения [4].

Установлено, что содержание ванадия и никеля в донных отложениях напрямую связано с органическим веществом фитопланктона, перешедшим в донные отложения в виде детрита. Это – одна из причин небольших средних значений содержаний (меньше значений кларков для осадочных пород) ванадия и никеля в донных отложениях.

Сравнительные характеристики средних значений содержания ванадия и никеля в донных отло-

жениях прибрежных зон малосолёных эпиконтинентальных Азовского и Каспийского морей представлены в табл. 3.

Наибольшие средние значения зафиксированы для Бакинской бухты с большим содержанием органического вещества в донных отложениях. Меньше – в Таганрогском заливе, наименьшие средние содержания из представленных зон – в Северном Каспии.

Таблица 3

Средние значения ванадия и никеля в донных отложениях прибрежных зон Каспийского и Азовского морей

Морской регион	Значения от – до (средние), мкг/г	
	V	Ni
Каспийское море (Бакинская бухта)	14,0–59,3 (35,5)	5,0–43,1 (20,0)
Каспийское море (северная часть)	5,0–32,0 (13,0)	4,0–27,0 (10,0)
Азовское море (Таганрогский залив) (октябрь 2012 г.)	13,0–36,0 (25,08)	11,0–36,0 (26,42)

Очевидно, это связано с большой примесью терригенного материала в донных отложениях этого района и снижением содержания глинистой фракции (и связанного с ней органического вещества) [12].

Выводы

1. Среднее содержание молибдена в донных отложениях по площади Таганрогского залива равно кларковому значению для осадочных пород.

2. В районах береговых портовых зон в Таганрогском заливе содержания молибдена в донных отложениях превышают в два и более раз кларковые значения, что может говорить о загрязнении этих районов.

3. Установлена высокая корреляция между содержаниями ванадия и никеля и органическим веществом в донных отложениях эпиконтинентальных водоемов аридных зон, что позволяет говорить о существовании устойчивых ванадий-никелевых комплексов органического вещества. С молибденом такой связи не выявлено.

4. Среднее содержание никеля и ванадия в Таганрогском заливе намного ниже кларковых значений для осадочных пород. Это связано с небольшим по сравнению с глубоководными районами моря содержанием органического вещества.

Литература

1. Кизильштейн Л.Я. Экогеохимия элементов-примесей в углях. Ростов н/Д., 2002. 295 с.

2. Хорошевская В.О. Участие биометаллов в жизненном цикле фитопланктона и его деструкции (ванадий, никель и молибден). Германия, 2013. 84 с.

3. Хорошевская В.О. Геохимическая роль сине-зелёных водорослей (цианобактерий) в формировании ванадиево-никелевого комплекса органического вещества эпиконтинентальных водоёмов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2012. № 1. С. 98–101.

4. Хрусталёв Ю.П. Закономерности осадконакопления во внутриконтинентальных морях аридной зоны. Л., 1989. 267 с.

5. Warmer H., van Dokkum R. Water pollution control in the Netherlands. Policy and practice. 2001, RIZA report 2002.009. Lelystad, 77 p.

6. ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность (с изменением № 1). М., 1980. 10 с.

7. Методические указания по выполнению измерений алюминия, бария, бериллия, ванадия, висмута, железа, кадмия, кобальта, кремния, лития, марганца, меди, молибдена, мышьяка, никеля, олова, свинца, селена, серебра, стронция, сурьмы, таллия, теллура, титана, хрома, цинка в питьевых, природных и сточных водах на атомно-абсорбционном спектрометре «Квант-Z.ЭТА» с электротермической атомизацией. М., 2002. 7 с.

8. ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М., 1979. 16 с.

9. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.

10. Вишневецкий В.Ю., Ледяева В.С. Экспериментальные исследования загрязнений тяжелыми металлами в донных отложениях в Таганрогском заливе // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4 (часть 1). URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1141> (дата обращения: 10.03.2013).

11. Бабинцев А.Е., Жоров В.А., Безбородов А.Ю., Митропольский Л.В., Соловьева, Совга Е.Е. Молибден в Черном море // Геол. журн. 1977. Т. 37, вып. 3. С. 70–79.
12. Хорошевская В.О. Накопление металлов (ванадия, никеля и молибдена) в илах Таганрогского залива // Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз: материалы Всерос. науч. конф. г. Краснодар, 7–13 октября 2013 г. Новочеркасск, 2013. С. 405–410.
13. Горишкова Т.И. Органическое вещество осадков Азовского моря и Таганрогского залива // Тр. ВНИРО. 1955. Т. XXXI. С. 95–121.
14. Федоров Ю.А., Доценко И.В., Кузнецов А.Н., Белов А.А., Логинов Е.А. Закономерности распределения S_{org} в донных отложениях российской части Азовского моря // Океанология. 2009. Т. 49, № 2. С. 229–236.
15. miya, kobal'ta, kremniya, litiya, margantsa, medi, molibdena, mysh'yaka, nikelya, olova, svintsa, selen, serebra, strontsiya, sur'my, talliya, tellura, titana, khroma, tsinka v pit'evykh, prirodnnykh i stochnnykh vodakh na atomno-absorbtsionnom spektrometre «Kvant-Z.ETA» s elektrotermicheskoi atomizatsiei [Guidelines on implementation measurements aluminum, barium, beryllium, vanadium, bismuth, iron, cadmium, cobalt, silicon, lithium, manganese, copper, molybdenum, arsenic, nickel, tin, lead, selenium, silver, strontium, antimony, thallium, tellurium, titanium, chromium, zinc in drinking, natural and sewage on the atomic absorption spectrometer "QUANTUM-Z.ETA" with electrothermal atomization]. Moscow, 2002, 7 p.
8. GOST 12536-79. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava [GOST 12536-79. Soils. Laboratory methods for determining the particle size distribution (grain) and microaggregate composition]. Moscow, 1979, 16 p.
9. Vinogradov A.P. Srednee sodержanie khimicheskikh elementov v glavnykh tipakh izverzhennykh gornnykh porod zemnoi kory [The average content of chemical elements in the principal types of igneous rocks of the crust]. *Geokhimiya*, 1962, no 7, pp. 555–571.
10. Vishnevskii V.Yu., Ledyeva V.S. Eksperimental'nye issledovaniya zagryaznenii tyazhelymi metallami v donnykh otlozheniyakh v Taganrogskom zalive [Experimental investigation of pollution of heavy metals in sediments in the Taganrog Bay]. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 2012, no 4. Available at: www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1141 (accessed 10.03.2013).
11. Babinets A.E., Zhorov V.A., Bezborodov A.A., Mitropol'skii A.Yu., Solov'eva L.V., Sovga E.E. Molibden v Chernom more [Molybdenum in the Black Sea]. *Geologicheskii zhurnal*, 1977, vol. 37, no 3, pp. 70–78.
12. Khoroshevskaya V.O. [The accumulation of metals (vanadium, nickel, molybdenum) in the silt of the Taganrog Bay]. *Vodnaya stikhiya: opasnosti, vozmozhnosti prognozirovaniya, upravleniya i predotvrashcheniya ugroz* [Water element: risk forecasting capabilities, management and prevention of threats]. Proceedings of the scientific conference. Novocherkassk, 2013, pp. 405–410.
13. Gorshkova T.I. Organicheskoe veshchestvo osadkov Azovskogo morya i Taganrogskogo zaliva [Organic matter of sediments of the Azov Sea and the Taganrog Bay]. *Trudy VNIRO*, 1955, vol. 31, pp. 95–121.
14. Fedorov Yu.A., Dotsenko I.V., Kuznetsov A.N., Belov A.A., Loginov E.A. Zakonomernosti raspredeleniya S_{org} v donnykh otlozheniyakh rossiiskoi chasti Azovskogo moray [Laws of distribution of organic carbon in the sediments of the Russian part of the Sea of Azov]. *Okeanologiya*, 2009, vol. 49, no 2, pp. 229–236.

References

1. Kizil'shtein L.Ya. *Ekogeokhimiya elementov-primesei v uglyakh* [Ecogeochemistry trace elements in coals]. Rostov-on-Don, 2002, 295 p.
2. Khoroshevskaya V.O. *Uchastie biometallov v zhiznennom tsikle fitoplanktona i ego destruktii (vanadii, nikel' i molibden)* [Biomaterials participation in the life cycle of phytoplankton and its destruction (vanadium, nickel and molybdenum)]. Germany, 2013, 84 p.
3. Khoroshevskaya V.O. Geokhimiicheskaya rol' sine-zelenykh vodoroslei (tsianobakterii) v formirovaniy vanadievonikelevogo kompleksa organicheskogo veshchestva epikontinental'nykh vodoemov [Geochemical role of blue-green algae (cyanobacteria) in the formation of vanadium-nickel complex organic matter epicontinental bodies of water]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*, 2012, no 1, pp. 98–101.
4. Khrustalev Yu.P. *Zakonomernosti osadkonakopleniya vo vnutrikontinental'nykh moryakh aridnoi zony* [Patterns of sedimentation in the inland seas of the arid zone]. Leningrad, 1989, 267 p.
5. Warner H., van Dokkum R. *Water Pollution Control in the Netherlands, Policy and Practice 2001*. RIZA report 2002.09. Lelystad, 2002, 77 p.
6. GOST 17.1.5.01-80. *Okhrana prirody. Gidrosfera. Obshchie trebovaniya k otboru prob donnykh otlozhenii vodnykh ob'ektov dlya analiza na zagryaznenost'* [GOST 17.1.5.01-80. Protection of Nature. Hydrosphere. General requirements for sampling sediments of water bodies for analysis of pollution]. Moscow, 1980, 10 p.
7. *Metodicheskie ukazaniya po vypolneniyu izmerenii alyuminiya, bariya, berilliya, vanadiya, vismuta, zheleza, kad-*

МЕДИЦИНА

УДК 616.61-006.6-0.89.87-072.1

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-119-123

НЕФРОПРОТЕКТИВНОЕ ДЕЙСТВИЕ ПАРАНЕФРАЛЬНОЙ НОВОКАИНОВОЙ БЛОКАДЫ ПРИ РЕЗЕКЦИИ ПОЧКИ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОВОЙ ИШЕМИИ

© 2015 г. О.И. Кит, С.Н. Димитриади, Е.М. Франциянц, Н.Д. Ушакова

Кит Олег Иванович – доктор медицинских наук, профессор, заслуженный врач РФ, директор, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я Линия, 63, г. Ростов н/Д, 344037, e-mail: onko-sekretar@mail.ru

Димитриади Сергей Николаевич – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, отделение онкоурологии, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я Линия, 63, г. Ростов н/Д, 344037, e-mail: dimitriadi@yandex.ru

Франциянц Елена Михайловна – доктор биологических наук, профессор, руководитель лаборатории изучения патогенеза злокачественных опухолей, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я Линия, 63, г. Ростов н/Д, 344037, e-mail: super.gormon@yandex.ru

Ушакова Наталья Дмитриевна – доктор медицинских наук, профессор, руководитель группы эфферентных методов лечения, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я Линия, 63, г. Ростов н/Д, 344037, e-mail: rnioi@list.ru

Kit Oleg Ivanovich – Doctor of Medical Science, Professor, Honored Physician of Russian Federation, Director, Rostov Research Oncological Institute, 14 Liniya, 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: onko-sekretar@mail.ru

Dimitriadi Sergei Nikolaevich – Candidate of Medical Science, Senior Researcher, Oncourology Department, Rostov Research Oncological Institute, 14 Liniya, 63, Rostov-on-Don, 344037, e-mail: dimitriadi@yandex.ru

Frantsiyants Elena Mikhailovna – Doctor of Biological Science, Professor, Head of Laboratory of Tumor Pathogenesis, Rostov Research Oncological Institute, 14 Liniya, 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: super.gormon@yandex.ru

Ushakova Natalia Dmitrievna – Doctor of Medical Science, Professor, Head of Efferent Methods Group, Rostov Research Oncological Institute, 14 Liniya, 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: rnioi@list.ru

При проведении резекции почки в условиях тепловой ишемии почки (ТИП) продолжительностью 15–25 мин у 38 больных с клинико-рентгенологической картиной локализованного рака почки, характеризовавшегося оценкой по шкале R.E.N.A.L. в диапазоне 6–10 баллов, изучено влияние паранефральной новокаиновой блокады на развитие острого повреждения почек в раннем послеоперационном периоде. Полученные результаты позволяют предположить наличие нефропротективного эффекта двусторонней паранефральной новокаиновой блокады при проведении резекции почки в условиях ТИП продолжительностью 15–25 мин у больных с локальным раком почки.

Ключевые слова: рак почки, лапароскопическая резекция почки, тепловая ишемия почки, нефропротективный эффект, новокаиновая паранефральная блокада.

38 partial nephrectomies have been performed for clinically localized renal cancer with R.E.N.A.L. 6–10 scores. Warm ischemia with duration of 15–25 minutes was used in all cases. A potential nephroprotective impact of paranephral novocaine blockade was estimated by symptoms of acute renal injury. The results of the examination allow suggesting a real nephroprotective impact of paranephral novocaine blockade on patients with clinically localized renal cancer underwent partial nephrectomies with warm ischemia time of 15–25 minutes.

Keywords: renal cancer, laparoscopic partial nephrectomy, warm ischemia renal, nephroprotective impact, novocaine paranephral blockade.

Основное отличие резекции почки (как и других используемых в органосохраняющей хирургии подходов) от радикальной нефрэктомии заключается в максимально возможном сохранении паренхимы оперируемой почки, что должно позволить снизить вероятность развития почечной недостаточности в послеоперационном периоде.

Из литературных источников известно, что после радикальной нефрэктомии и резекции почки у больных наблюдается снижение общей почечной функции [1, 2]. При этом даже небольшая утрата почечной функции может повышать риск развития сердечно-сосудистых заболеваний и уменьшать продолжительность жизни пациентов [3].

При резекции небольших опухолей без остановки кровотока в почечных сосудах есть возможность проведения полноценного хирургического вмешательства, при этом уменьшается вероятность развития послеоперационных осложнений и снижения почечной функции [4]. Однако при сложной локализации опухоли достаточно часто возникает потребность в применении ишемии пораженной опухолью почки, так как это объективизирует визуализацию распространения опухоли и облегчает доступ к полостной системе за счёт уменьшения риска интраоперационного кровотечения. Все перечисленное обеспечивает корректное определение оптимального хирургического слоя на этапе резекции опухоли [5]. Использование методики тепловой ишемии почки (ТИП) облегчает ушивание паренхимы почки (за счёт снижения тургора почки), при этом последующее восстановление кровотока в почке и ее тургора повышает надежность ранее наложенных гемостатических швов [6].

Верхним пределом продолжительности безопасной ТИП при резекции почки принято считать 20 мин [7]; при превышении указанной выше длительности ТИП высока вероятность развития острого повреждения почек (ОПП) и хронической почечной недостаточности (ХПН) в послеоперационном периоде. Уменьшение продолжительности ТИП снижает риск развития почечной недостаточности.

В то же время вопрос о более точном определении допустимого времени выключения почки из кровообращения во время проведения операции на этом органе остается открытым. В этой связи весьма актуальной представляется проблема интраоперационной защиты почек от ишемического повреждения. Неясность данного вопроса ограничивает также развивающуюся в настоящее время тенденцию расширения показаний к проведению резекции почки, в том числе с использованием лапароскопического подхода. Актуальность предотвращения ОПП также связана с сокращением продолжительности стационарного лечения.

Современные методы диагностики часто не позволяют провести раннюю диагностику ОПП, хотя это крайне важно для назначения адекватного лечения и предотвращения прогрессирования заболевания [8]. Согласно шкале RIFLE, диагноз ОПП устанавливается при повышении уровня сывороточного креатинина как минимум на 50 % от фонового значения показателя, или же при уменьшении выделения мочи до уровня меньшего, чем 0,5 мл/(кг·ч) в течение промежутка времени, превышающего 6 ч.

Изучению нефропротективной эффективности различных медикаментозных методов посвящено

существенное количество исследований, при этом наибольший интерес специалистов привлекает использование диуретиков – маннитола и фуросемида [9]. Необходимо отметить, что у современных исследователей нет единого мнения о наличии реальной нефропротективной эффективности у этих препаратов [10]. Важным аспектом органосохраняющих подходов при проведении резекции почки по элективным показаниям является сохранение максимального объема функционирующей паренхимы пораженной опухолью почки, а также функции всей почечной паренхимы, включая контралатеральную почку.

Различные виды новокаиновых блокад (паранефральная, вагосимпатическая по А.В. Вишневному (1952), забрюшинная по Л.И. Роману (1968), паранепанкреатическая [11]) оказывают нефропротективное действие при ряде патологических состояний, в частности при обширных ожогах и сочетанных травмах с краш-синдромом. Однако при органосохраняющем хирургическом лечении больных локальным раком почки в условиях ТИП эти блокады до настоящего времени не применялись. В то же время, как мы полагаем, использование паранефральной блокады резецируемой почки может минимизировать повреждающее воздействие односторонней ишемии как на резецируемую, так и на контралатеральную почку.

Целью настоящего исследования является оценка нефропротективной эффективности паранефральной новокаиновой блокады в плане сохранения почечной функции при ТИП продолжительностью 15–25 мин.

Материалы и методы

В исследование было включено 38 подвергнутых резекции почки больных (22 мужчины и 16 женщин) с клинико-рентгенологической картиной локализованного рака почки, характеризовавшегося оценкой по шкале R.E.N.A.L. в диапазоне 6–10 баллов. Больные были разделены на две группы: в первую группу вошли 12 больных (8 больных была осуществлена лапароскопическая резекция почки, 4 – открытая резекция почки), которым до резекции почки была выполнена двусторонняя паранефральная новокаиновая блокада под УЗ-контролем. Во вторую группу вошли 26 больных (19 больным осуществлена лапароскопическая резекция, 7 – открытая резекция почки), которым выполнялась резекция почки без использования паранефральной блокады. Перед операцией на основании данных КТ или МРТ оценивались размер опухоли и сложность предполагаемой резекции почки по шкале R.E.N.A.L. Всем больным до операции и

в раннем послеоперационном периоде проводилось стандартное клиничко-лабораторное и инструментальное обследование, в том числе с определением уровня креатинина сыворотки крови и расчетом скорости клубочковой фильтрации (СКФ) по краткой формуле MDRD [12]. В обеих группах перед операцией грубых нарушений функции обеих почек выявлено не было, что подтверждено данными экскреторной урографии и динамической нефро-сцинтиграфии.

Операцию (в первой группе больных) выполняли следующим образом: в положении больного на животе производили двустороннюю паранефральную блокаду под УЗ-контролем. Вводили 0,25%-й раствор новокаина в точку пересечения длинной мышцы спины и 12-го ребра тонкой иглой диаметром 18–20 G под УЗ-контролем. Иглу постепенно продвигали в сторону паранефрального пространства, по ходу продвижения иглы предварительно вводили новокаин.

Направление движения и глубину введения иглы определяли при помощи УЗ-контроля с учетом анатомического расположения почки. Только после эхоскопически визуализированного прохождения концом иглы фасции Герота и появления картины распространения инъецируемого раствора в паранефральной клетчатке последовательно вводили в паранефральную клетчатку верхнего, среднего и

нижнего сегментов почки по 50 мл 0,25%-го раствора новокаина, инфильтрируя паранефральную клетчатку с обеих сторон.

Следующим этапом больного укладывали на бок для выполнения резекции почки. Резекцию почки в обеих группах больных осуществляли открытым [13] либо лапароскопическим доступом в условиях ТИП [14] продолжительностью 15–25 мин.

Через 16 ч после операции и далее в течение трех суток ежедневно оценивали суммарный диурез.

В первые трое суток после операции ежедневно и на 8-е сут послеоперационного периода определяли уровень креатинина крови и рассчитывали СКФ по краткой формуле MDRD. Согласно шкале RIFLE, развитие ОПП диагностировали при повышении уровня сывороточного креатинина на не менее 50 % от исходных показателей креатинина. Статистическая обработка данных выполнена с применением пакета программ SPSS 11,5 для Windows, использовали непараметрический критерий Манна – Уитни.

Результаты

Основные результаты, характеризующие клиничко-лабораторные показатели больных, перенесших резекцию почки в условиях ТИП, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты резекции почки в условиях ТИП

Показатель	38 больных				p
	1-я группа (n=12)		2-я группа (n=26)		
Возраст	58,07±4,99 (49–66)		58,75±5,86 (50–65)		
Доступ	Открытый (n=8)	Лапароскопический (n=4)	Открытый (n=7)	Лапароскопический (n=19)	
Средний балл R.E.N.A.L.	7,23±1,12 (6–10)		7,16±0,99 (6–10)		>0,05
Средняя продолжительность ТИП	20,0±2,99 мин (15–25)		18,42±2,93 мин (15–25)		>0,05
ОПП 1–3-и сут после операции (кол-во больных)	0/12		9/26 (34,6 %)		<0,05
Средний уровень креатинина крови до операции	84,75±12,4		89,20±18,6		>0,05
СКФ до операции	71,73±7,21		69,24±9,4		>0,05
СКФ на 8-е сут после операции	68,31±7,11		61,31±4,1		>0,05

Группы больных были сравнимы по возрасту, уровню сложности предполагаемой резекции по показателю R.E.N.A.L.; средняя продолжительность ТИП в обеих группах также достоверно не отличалась. По данным гистологического исследования, во всех случаях был зарегистрирован почечно-клеточный рак, хирургические края резекции отрицательные. У 33 больных был диагностирован локальный рак почки, у 5 больных выявлено распростране-

ние опухоли на паранефральную клетчатку (стадия Т3а). Ни у одного из прооперированных больных первой группы не возникло явлений ОПП, а также значимых хирургических осложнений. У 9 (34,6 %) больных второй группы зарегистрировано развитие ОПП (повышение уровня креатинина крови в 1,5 раза от дооперационного уровня), что потребовало проведения дополнительной консервативной нефропротективной терапии, и к 8-м сут послеоперационного пе-

риода уровень СКФ достоверно не отличался в обеих группах (табл. 1). Показатели, характеризующие уро-

вень креатинина и СКФ у 9 больных с развитием ОПП, представлены в табл. 2.

Таблица 2

СКФ и уровень креатинина больных второй группы с развитием ОПП в 1–3-и сут послеоперационного периода

Показатель	До операции	1–3-и сут п/о
СКФ	70,64±8,8	33,75±8,5*
Креатинин сыворотки крови	90,20±16,6	187,5±59,43**

* – усреднённый минимальный уровень в 1–3-и сут послеоперационного периода; ** – усреднённый максимальный уровень в 1–3-и сут послеоперационного периода.

В то же время снижение СКФ во второй группе больных, прооперированных без использования новокаиновой блокады, носило в существенной степени более выраженный характер при сравнимом объеме резекции почки и продолжительности ТИП. Эти данные указывают на развитие нефропротективного эффекта в условиях применения паранефральной новокаиновой блокады, препятствующего снижению СКФ и развитию ОПП.

Заключение

Таким образом, полученные результаты позволяют предположить наличие нефропротективного эффекта двусторонней паранефральной новокаиновой блокады при проведении резекции почки в условиях ТИП продолжительностью 15–25 мин у больных с локальным раком почки. Для решения вопроса об обоснованности данного предположения целесообразно проведение дальнейших исследований, включающих, в частности, оценку нефропротективной эффективности новокаиновой блокады при продолжительности ТИП свыше 25 мин.

Литература

1. Гусев А.А., Евсеев С.В., Коган М.И. Оценка почечных функций и оперативное лечение почечно-клеточного рака // Онкоурология. 2013. № 1. С. 17–23.
2. Thompson R.H., Boorjian S.A., Lohse C.M. Radical nephrectomy for pT1a renal masses may be associated with decreased overall survival compared with partial nephrectomy // J. Urol. 2008. Vol. 79. P. 468–473.
3. Go A.S., Chertow G.M., Fan D. Chronic kidney disease and the risks of death, cardiovascular events, and hospitalization // N. Engl. J. Med. 2004. Vol. 351. P. 1296–1305.
4. Алексеев Б.Я., Калпинский А.С., Поляков В.А., Андрианов А.Н. Лапароскопическая резекция почки с применением радиочастотной термоабляции // Онкоурология. 2012. № 2. С. 21–27.
5. Матвеев В.Б. Лапароскопическая резекция почки // Клиническая онкоурология. М., 2011. С. 113–123.
6. Димитриади С.Н. Новые возможности проведения лапароскопической резекции почки по поводу почечно-

клеточного рака с вовлечением чашечно-лоханочной системы // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2014. № 4. С. 82–86.

7. Thompson R. H., Frank I., Lohse C.M. The Impact of Ischemia Time During Open Nephron Sparing Surgery on Solitary Kidneys: A Multi-Institutional Study // J. Urol. 2007. Vol. 177. P. 471–476.
8. Soni S.S., Pophale R., Ronco C. New biomarkers for acute renal injury // Clin. Chem. Lab. Med. 2011. Vol. 49(8). P. 1257–1263.
9. Cosentino M., Breda A., Sanguedolce F. The use of mannitol in partial and live donor nephrectomy: an international survey // World J Urol. 2013. № 31. P. 977–982.
10. Power N.E., Maschino A.C., Savage C., Silberstein J.L., Thorner D., Tarin T., Wong A., Touijer K.A., Russo P., Coleman J.A. Intraoperative mannitol use does not improve long-term renal function outcomes after minimally invasive partial nephrectomy // Urology. 2012. Vol. 79. P. 822–826.
11. Казаков В.Ф., Кабанов Н.Я. Анатомо-топографическое обоснование способа подведения лекарственных растворов к поджелудочной железе в лечении острого панкреатита // Раневой процесс в хирургии и военно-полевой хирургии. 1996. С. 231–233.
12. Levey A.S., Bosch J.P., Lewis J.B., Greene T., Rogers N., Roth D. Modification of Diet in Renal Disease Study Group. A more accurate method to estimate glomerular filtration rate from serum creatinine: a new prediction equation // Ann. Intern. Med. 1999. Vol. 130. P. 461–470.
13. Матвеев В.Б. Резекция почки // Клиническая онкоурология. М., 2011. С. 56–80.
14. Кит О.И., Димитриади С.Н., Медведев В.Л. Способ ушивания раны почки при лапароскопическом органосохраняющем лечении рака почки в условиях тепловой ишемии: патент РФ № 2532897. Оpubл. 10.11.2014. Бюл. № 31.

References

1. Gusev A.A., Evseev S.V., Kogan M.I. Otsenka pochechnykh funktsii i operativnoe lechenie pochechno-kletchnogo raka [Assessment of renal function and surgical treatment of renal cell carcinoma]. *Onkourologiya*, 2013, no 1, pp. 17–23.
2. Thompson R.H., Boorjian S.A., Lohse C.M. Radical nephrectomy for pT1a renal masses may be associated with decreased overall survival compared with partial nephrectomy. *J. Urol.*, 2008, vol. 79, pp. 468–473.

3. Go A.S., Chertow G.M., Fan D. Chronic kidney disease and the risks of death, cardiovascular events, and hospitalization. *N. Engl. J. Med.*, 2004, vol. 351, pp. 1296-1305.
4. Alekseev B.Ya., Kalpinskiy A.S., Polyakov V.A., Andrianov A.N. Laparoskopicheskaya rezektsiya pochki s primeneni-
em radiochastotnoi termoablyatsii [LPN using radio
thermoablation]. *Onkourologiya*, 2012, no 2, pp. 21-27.
5. Matveev V.B. [LPN]. *Klinicheskaya onkourologiya* [Clini-
cal oncurology]. Moscow, 2011, pp. 113-123.
6. Dimitriadi S.N. Novye vozmozhnosti provedeniya lapa-
roskopicheskoi rezektsii pochki po povodu pochechno-
kletchnogo raka s вовлечением chashechno-
lokhanochnoi sistemy [New features of LPN for renal cell
carcinoma involving pyelocaliceal system]. *Izvestiya vuzov.
Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*, 2014, no 4,
pp. 82-86.
7. Thompson R.H., Frank I., Lohse C.M. The impact of ische-
mia time during open nephron sparing surgery on solitary
kidneys: a multi-institutional study. *J. Urol.*, 2007, vol.
177, pp. 471-476.
8. Soni S.S., Pophale R., Ronco C. New biomarkers for acute
renal injury. *Clin. Chem. Lab. Med.*, 2011, vol. 49(8), pp.
1257-1263.
9. Cosentino M., Breda A., Sanguedolce F. The use of manni-
tol in partial and live donor nephrectomy: an international
survey. *World J. Urol.*, 2013, no 31, pp. 977-982.
10. Power N.E., Maschino A.C., Savage C., Silberstein J.L.,
Thorner D., Tarin T., Wong A., Touijer K.A., Russo P.,
Coleman J.A. Intraoperative mannitol use does not improve
long-term renal function outcomes after minimally invasive
partial nephrectomy. *Urology*, 2012, vol. 79, pp. 822-826.
11. Kazakov V.F., Kabanov N.Ya. Anatomic-topograficheskoe
obosnovanie sposoba podvedeniya lekarstvennykh rastvo-
rov k podzheludochnoi zheleze v lechenii ostrogo pankrea-
tita [Anatomic-topographic substantiation method of sum-
ming up of pharmaceutical solutions to the pancreas in
treatment of acute pancreatitis]. *Ranevoi protsess v khirur-
gii i voenno-polevoi khirurgii*, 1996, pp. 231-233.
12. Levey A.S., Bosch J.P., Lewis J.B., Greene T., Rogers N.,
Roth D. Modification of Diet in Renal Disease Study
Group. A more accurate method to estimate glomerular fil-
tration rate from serum creatinine: a new prediction equa-
tion. *Ann. Intern. Med.*, 1999, vol. 130, pp. 461-470.
13. Matveev V.B. [Partial nephrectomy]. *Klinicheskaya onkou-
rologiya* [Clinical oncurology]. Moscow, 2011, pp. 56-80.
14. Kit O.I., Dimitriadi S.N., Medvedev V.L. *Sposob ushivaniya
rany pochki pri laparoskopicheskom organosokhra-
nyayushchem lechenii raka pochki v usloviyakh teplovoi
ishemii* [The method of suturing a wound in the laparoscop-
ic kidney-sparing treatment of renal cancer in a warm
ischemia]. Certificate RF, no 2532897, 10.11.2014.

УДК 616.24-006.6-08.163 : 615.277.3/37 : 616-036.8

DOI 10.18522/0321-3005-2015-3-124-130

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ НЕОАДЬЮВАНТНОЙ ХИМИОИММУНОТЕРАПИИ НЕМЕЛКОКЛЕТОЧНОГО РАКА ЛЕГКОГО

© 2015 г. Ю.Н. Лазутин, А.П. Харитонов, Г.З. Сергостьянц, С.А. Зинькович, С.П. Пыльцин

Лазутин Юрий Николаевич – кандидат медицинских наук, доцент, ведущий научный сотрудник, отделение торакальной хирургии, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я Линия, 63, г. Ростов н/Д, 344037.

Харитонов Анна Павловна – аспирант, отделение торакальной хирургии, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я Линия, 63, г. Ростов н/Д, 344037.

Сергостьянц Геннадий Завенович – доктор медицинских наук, профессор, заведующий отделением торакальной хирургии, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я Линия, 63, г. Ростов н/Д, 344037.

Зинькович Сергей Анатольевич – доктор медицинских наук, профессор, руководитель клиники, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я Линия, 63, г. Ростов н/Д, 344037.

Пыльцин Сергей Петрович – научный сотрудник, отделение торакальной хирургии, Ростовский научно-исследовательский онкологический институт, ул. 14-я Линия, 63, г. Ростов н/Д, 344037, e-mail: pylserg@yandex.ru

Lazutin Yuriy Nikolaevich – Candidate of Medical Science, Associate Professor, Leading Researcher, Thoracic Department, Rostov Research Oncological Institute, 14-Line, 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia.

Kharitonova Anna Pavlovna – Post-Graduate Student, Thoracic Department, Rostov Research Oncological Institute, 14-Line, 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia.

Sergost'yants Gennadii Zavenovich – Doctor of Medical Science, Professor, Head of Thoracic Department, Rostov Research Oncological Institute, 14-Line, 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia.

Zinkovich Sergei Anatol'evich – Doctor of Medical Science, Professor, Head of Clinics, Rostov Research Oncological Institute, 14-Line, 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia.

Pyltsin Sergei Petrovich – Researcher, Thoracic Department, Rostov Research Oncological Institute, 14-Line, 63, Rostov-on-Don, 344037, Russia, e-mail: pylserg@yandex.ru

В клиническое исследование включены 65 больных 2В–3В ст. немелкоклеточным раком легких (НМРЛ) и рандомизированы в основную (n=25) и контрольную группы (n=22). Контрольной группе планировалось проведение 2 циклов НХТ, в основной группе дополнительно вводился в/в капельно ФНО-Т. Общий ответ составил 22 (73,3 %) и 13 (46,4 %) (p=0,06). НХИТ улучшает 2-летнюю бессобытийную выживаемость (26 %) пациентов в сравнении с НХТ. Проведение одной фазы клинических испытаний НХИТ с применением иммунного препарата ФНО-Т показало тенденцию к улучшению общего ответа на лечение, увеличение количества CR, удовлетворительную переносимость и выполнимость.

Ключевые слова: неоадьювантная химиотерапия, неоадьювантная химиоиммунотерапия, рак легкого, ФНО-Т.

The clinical trial includes 65 pts. 2B–3B st. NSCLC randomized to primary (n=33) and control groups (n=32). Pts. in the control group had planned a two-cycle neoadjuvant chemotherapy, pts. of the primary group was additionally introduced i.v. infusion of the TNF-T. A common response was 22 (73,3 %), and 13 (46,4 %) (p=0,06). Neoadjuvant chemoimmunotherapy improves the 2-year disease free survival (26 %) patients compared with neoadjuvant chemotherapy. The first phase of clinical trials NCIT showed a tendency to improve the overall response to treatment, increase in CR with satisfactory tolerability and feasibility.

Keywords: neoadjuvant chemotherapy, neoadjuvant chemoimmunotherapy, lung cancer, TNF-T.

Несмотря на определенные достижения в лечении рака легких (РЛ), именно он остается основной причиной смертей от рака в большинстве стран мира, принося больше смертельных исходов, чем рак молочной железы, простаты и толстой кишки вместе взятых [1]. Радикальное хирургическое вмешательство остается основой лечения резектабельного немелкоклеточного рака легких (НМРЛ). Однако данная тактика по существу эффективна только у пациентов с локализованным заболеванием без вовлечения в процесс внутригрудных, особенно медиастинальных, лимфатических узлов. Пятилетняя выжи-

ваемость колеблется между 50 и 70 % для больных с I стадией заболевания и между 10–20 % у пациентов при IIIA стадии НМРЛ.

Использование системной химиотерапии (ХТ) у радикально оперированных пациентов с ранними стадиями НМРЛ является рациональной тактикой, так как предшествующие наблюдения показали преобладание отдаленных метастазов над локальными рецидивами, представив доказательства микроскопической диссеминации РЛ у многих больных на момент операции [2]. Несколько крупных исследований подтвердили клинически скромное,

но статистически значимое улучшение показателей выживаемости, связанных с адъювантной ХТ, ставшей по современным представлениям стандартом лечения НМРЛ [3, 4].

Индукционная ХТ имеет потенциальные преимущества по сравнению с адъювантной ХТ – прежде всего высоким терапевтическим комплаенсом, возможностью раннего контроля микрометастатической болезни и влияния на первичную опухоль. Индукционная ХТ на основе химиотерапевтических комбинаций с платиной демонстрирует высокие уровни ответа на лечение, и следовательно, может привести к уменьшению распространенности опухоли в легком, тем самым обеспечивая более высокий процент радикальных, в том числе органосохраняющих, операций. Недостатки индукционной ХТ заключаются в задержке хирургического вмешательства и потенциальном увеличении послеоперационных осложнений [5, 6].

Исследование II фазы EORTC 08955 (European Organisation for Research and Treatment of Cancer) по применению комбинации гемцитабина и цисплатина в качестве индукционной ХТ достигло 70 % общего ответа с медианой выживаемости 18,9 мес. [7]. В дальнейшем для изучения потенциальной пользы индукционной ХТ цисплатином и гемцитабином на основании анализа 3-летней выживаемости без прогрессирования начато многоцентровое, рандомизированное исследование Chemotherapy for Early Stages Trial (CHEST), включившее больных, подходивших для радикальной операции с клиническими стадиями IB, II и IIIA НМРЛ [8].

Цель исследования – изучить результаты и дать сравнительную оценку эффективности индукционной ХИТ, основанную на использовании цисплатина с гемцитабином с применением рекомбинантного гибридного белка α -фактор некроза опухолей-тимозин- α -1.

Материалы и методы

В исследование включены нелеченные больные с установленными в результате комплексного обследования с применением спиральной компьютерной томографии клиническими IB, IIIA (N2) и IIIB (T4 ipsi.nod.), гистологически или цитологически подтвержденными стадиями НМРЛ. Возраст старше 18 лет, с исходным статусом ECOG-0-1 балла и адекватной функцией внешнего дыхания. В исследование не включались пациенты с T4 inv., опухолью Панкоста и плевральным выпотом, кроме того, престарелые пациенты и больные с серьезной сопутствующей инфекционной патологией, тяжелой сердечной и легочной недостаточностью, некон-

тролируемым сахарным диабетом и непосредственно угрожающими жизни осложнениями РЛ.

В период с сентября 2012 по декабрь 2014 г. в исследование включены 65 пациентов с НМРЛ, которые были рандомизированы для получения либо двух курсов индукционной химиоиммунотерапии (ХИТ) с последующей операцией – основная группа, либо для получения двух курсов индукционной ХТ с последующей операцией – контрольная группа. Исходные характеристики больных сравниваемых групп приведены в табл. 1, доказывающей сопоставимость исследуемых групп. Больным контрольной группы индукционная ХТ проводилась в режиме – цисплатин 75 мг/м² в 1-й день и гемцитабин 1000 мг/м² в 1-й и 8-й дни. Пациентам основной группы в день до начала введения цитостатиков вводилось 50000 ЕД рекомбинантного гибридного белка α -фактор некроза опухолей-тимозин- α -1 (ФНО-Т) подкожно, затем по 100000 ЕД иммунного препарата в/в капельно в 3-й и 6-й дни между введением химиопрепаратов. Циклы лечения повторяли каждые 21 день [9]. Токсичность лечения оценивалась по критериям NCI-CTC (National Cancer Institute Common Toxicity Criteria) Version 2. Непосредственные результаты индукционной ХТ оценивали согласно критериям REGIST через 21 день после завершения запланированного предоперационного лечения. Объем оперативного лечения оставался прерогативой торакального хирурга при условии полного удаления первичного опухолевого очага с морфологически отрицательными краями по линии резекции и ипсилатеральной медиастинальной лимфодиссекцией и селективной бифуркационной лимфодиссекцией. Не позднее 30–40-го дня после операции пациентам начиналось проведение трех курсов адъювантной ХТ в режиме СЕ (карбоплатин+этопозид) после пневмонэктомии или РЕ (цисплатин+этопозид) после лобэктомии. В течение первого года наблюдения рентгенография органов грудной полости чередовалась с компьютерной томографией каждые 3 мес., затем каждые 6 мес. и сопровождалась ультразвуковым исследованием органов брюшной полости.

Статистический анализ предусматривал первичной точкой данного исследования оценку непосредственных результатов индукционного лечения, конечной – показатели бессобытийной выживаемости – времени от даты рандомизации до даты регистрации прогрессирования заболевания, рецидива или смерти от любой причины. Изучение бессобытийной кумулятивной выживаемости производилось методом Каплана – Мейера, сравнение посредством log rank test, различия считались статистически достоверными при значении $p < 0,05$.

Таблица 1

Распределение больных сравниваемых групп по основным антропометрическим и клиническим критериям

Показатель	Основная n=33 (%)	Контрольная n=32 (%)
Средний возраст	58,4 года	57,8 года
40–49 лет	5 (15,2)	5 (15,6)
50–59 лет	14(42,4)	15 (46,8)
60 и старше	14(42,4)	12 (37,5)
Мужской	23 (69,7)	23 (71,8)
Женский	10 (30,3)	9 (28,2)
T2	16 (48,4)	14 (43,7)
T3	14 (42,4)	14 (43,7)
T4	3 (9,1)	4 (12,5)
N0	4 (12,1)	6 (18,7)
N1	15 (45,4)	13 (40,6)
N2	14(42,4)	13 (40,6)
IIВ стадия	8 (24,4)	9 (28,1)
IIIА стадия	22 (66,6)	19 (59,4)
IIIВ стадия	3 (9)	4 (12,5)

Данное исследование рассмотрено и одобрено этическим советом учреждения в соответствии с постулатами, установленными Хельсинской декларацией. Пациенты, которые соответствовали критериям участия, дали письменное информированное согласие в соответствии с регламентирующими нормативными документами перед прохождением любого исследования, медицинского вмешательства или получения исследуемого препарата.

Результаты

В основной группе завершили индукционную ХИТ 90 % (30 из 33) больных, в контрольной груп-

пе индукционную ХТ – 87 % (28 из 32) пациентов. Выраженность неблагоприятных токсических реакций в обеих группах была умеренной, не требовала перерывов в лечении или редукции доз цитотоксиков. Вместе с тем у 19 (57,6 %) больных основной группы при в/в введении ФНО-Т отмечался спонтанно разрешавшийся достаточно выраженный озноб, как правило, не сопровождавшийся лихорадкой. Более серьезных неблагоприятных событий, возможно, связанных с исследуемым препаратом, не зарегистрировано.

Комплексное контрольное обследование выявило следующие непосредственные результаты индукционного лечения, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Непосредственные результаты индукционной терапии

Степень ответа на лечение	Основная группа n=30 (%)	Контрольная группа n=28 (%)
Полный регресс	3(10)*	1(3,6)
Частичный регресс	19(63,3)	12(42,8)
Стабилизация	7(23,3)	13(43,3)
Прогрессирование	1(3,3)	2(7,1)

*– различия статистически достоверны $p < 0,05$.

В итоге общий ответ на индукционное лечение составил 73,3 % в основной и 46,4 % в контрольной группе ($p = 0,063$), отмечена выраженная тенденция к улучшению данного показателя у больных, получивших индукционную ХИТ. Аналогичная положительная динамика выявлена при оценке частичного регресса и стабилизации заболевания у больных сравниваемых групп.

Хирургическому лечению подверглись 87,8 % больных из группы индукционной ХИТ и 81 % па-

циентов в контрольной группе (табл. 3). Наличие полного регресса опухоли морфологически подтверждено в двух наблюдениях в основной группе и в одном наблюдении в контрольной. Следует отметить, что, несмотря на высокую операбельность больных, часть оперативных вмешательств, очевидно, имела условно радикальный характер из-за выраженности фиброзного процесса в тканях средостения. Течение послеоперационного периода в обеих группах было неосложненным. Хотя боль-

ные, перенесшие пневмонэктомию, имели более длительный (до 3–4 недель) период функциональ-

ного восстановления, далеко не всегда полного, и в более отдаленные сроки.

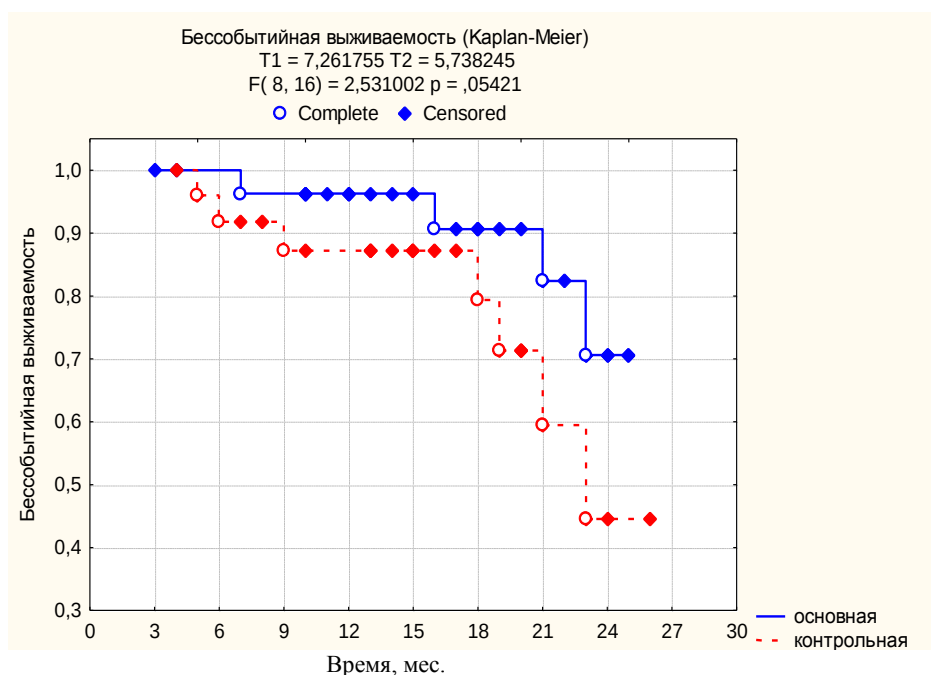
Таблица 3

Показатели хирургического лечения

Показатель	Основная группа n=29 (%)	Контрольная группа n=26 (%)
Пневмонэктомия	7 (24,2)	10 (38,4)
Лобэктомия	22 (75,8)	16 (61,6)
Плоскоклеточный рак	13 (44,8)	14 (53,8)
Аденокарцинома	16 (55,2)	12 (46,2)
GX	2 (6,8)	1 (3,8)
G1	2 (6,8)	2 (7,7)
G2	17 (58,6)	17 (65,4)
G3	8 (25,6)	6 (23,1)

Данные, представленные в табл. 3, однозначно демонстрируют тенденцию к сокращению объема оперативных вмешательств в основной группе по сравнению с контрольной. Увеличение количества паренхимосохраняющих резекций легкого после проведения индукционной ХИТ обеспечивает полноценное и достаточно раннее послеоперационное восстановление больных для своевременного начала адъювантной ХТ.

На момент проведения анализа в мае 2015 г. медиана последующего наблюдения за пациентами обеих групп составила 16,8 мес. Медиана выживаемости в контрольной группе составила 23 мес., в основной – не достигнута. 2-летняя бессобытийная выживаемость в основной группе достигла 71 % по сравнению с 45 % в контрольной ($p=0,05421$) (рисунк).



Бессобытийная выживаемость сравниваемых групп

Обсуждение

В целом результаты обсуждаемых исследований позволяют говорить о положительном эффекте индукционной ХТ, почти исключительно проявляю-

щемся в группе пациентов с ИБ-IIIА стадиями НМРЛ. Доля ответивших на индукционную ХТ была несколько ниже в исследовании SWOG 9900 – 41 % [10] либо несколько выше в MRC-LU22 (Medical Research Council LU22) – 49 % [11]. Ран-

доминированное, контролируемое, многоцентровое исследование III фазы показало, что индукционная ХТ относительно ранних стадий НМРЛ – вполне выполнимая, переносимая и эффективная тактика лечения. Непосредственные результаты протокола CHEST, предусматривавшего проведение трех курсов индукционной ХТ комбинацией цисплатина и гемцитабина, для IB-IIIА стадий НМРЛ были следующими: общий ответ на индукцию – 34,6 %, полных регрессов – 3,1, частичных – 31,5, стабилизация заболевания – 43,3 и прогрессирования – 5,5 % при 15,7 % неопределенных случаев [8]. При более строгой регистрации непосредственных результатов в нашем исследовании (табл. 2) в контрольной группе общий ответ на индукцию оказался несущественно выше – 46,2 %, при одинаковых показателях стабилизации заболевания – 43,3 и прогрессирования – 7,1 %. Вместе с тем использование индукционной ХТ в основной группе позволило существенно улучшить показатели общего ответа до 73,3 % (34,6 vs. 73,3 %; $p=0,047$) за счет значимого увеличения полных регрессов до 10 % (3,1 vs. 10 %; $p=0,03$) и частичных регрессов до 63,3 % (31,5 vs. 63,3 %; $p=0,049$) при тенденции к снижению стабилизации заболевания. Таким образом, оригинальное исследование показало одинаковую непосредственную эффективность двух и трех курсов индукционной ХТ комбинацией цисплатина с гемцитабином при существенном улучшении непосредственных результатов при проведении двух курсов индукционной ХТ с добавлением ФНО-Т.

Как было показано выше в нашем исследовании, 2-летняя бессобытийная выживаемость в основной группе составила 71 %, в контрольной – 45. Данные результаты должны рассматриваться в контексте других рандомизированных исследований индукционной ХТ на разных стадиях развития НМРЛ. Двухлетняя бессобытийная выживаемость в группе получивших индукционную ХТ оказалась выше, чем показатели в контрольной группе – 42 %, и аналогичной другим рандомизированным исследованиям, в том числе в исследовании SWOG 9900 (Southwest Oncology Group) – 73 % для группы ХТ и операции [10] и в ключевом исследовании A. Depierre с коллегами – 72 % [12], что предполагает благоприятное влияние предоперационной ХТ на выживаемость. Несомненно, различия в результатах лечения, наблюдаемые при сравнении исследований, связаны с различиями в когортах включенных пациентов. Например, на I стадию НМРЛ приходилось более 70 % пациентов в SWOG 9900 [10] и NATCH (Neoadjuvant or Adjuvant Chemotherapy in Patients with Operable Non-Small-Cell Lung Cancer) [12], более 60 % – в MRC-LU22 [11] и около 50 % – в исследовании CHEST [8].

Современный взгляд на проблему сложился после публикации метаанализа общей выживаемости по результатам рандомизированных исследований предоперационной ХТ, представленным S. Burdett, L.A. Stewart, L. Rydzewska (2006), затем обновленным с учетом результатов MRC-LU22 [11]. Дополнительно к восьми упомянутым протоколам в настоящее время в метаанализ включены результаты исследований CHEST и NATCH [8]. В итоге оценка 10 исследований, включивших данные о почти 2200 пациентах НМРЛ, продемонстрировала достоверную пользу индукционной ХТ с последующим оперативным лечением (95 CI, 0,81 – 0,98; $p = 0,02$). Более того, данный метаанализ показал, что ожидаемая эффективность индукционной ХТ подобна по своей выраженности адъювантной ХТ.

В исследовании CHEST стратификация по стадиям заболевания IB/IIА против IIВ/IIIА использовалась для выявления различий влияния индукционной ХТ в зависимости от стадии НМРЛ [8]. При сравнении результатов лечения образовавшихся подгрупп выявилась статистически значимая польза предоперационной ХТ только в подгруппе больных с IIВ-IIIА стадиями. Следует отметить, что данные выводы не согласуются с результатами протокола SWOG 9900, которые не обнаружили никакой разницы в эффективности лечения в зависимости от стадии [10], и результатами исследования A. Depierre с коллегами [12], по данным которых пациенты с ранними стадиями болезни имели большую пользу от индукционной ХТ. Вместе с тем подгрупповой анализ, основанный на стадии заболевания, следует считать гипотетическим, так как не исключено, что наблюдаемые результаты являются своего рода артефактами из-за небольших выборок в подгруппах, поэтому в нашей работе он сознательно не проводился.

Индукционную ХТ полностью завершили 90 % больных, а индукционную ХТ – 87 по сравнению с 85 % в CHEST [8], с 75 % в MRC-LU22 [11] и 79 % в SWOG 9900 [10]. Следует отметить, что 95 % пациентов получили по меньшей мере два курса ХТ с приемлемой токсичностью во всех анализируемых исследованиях. Значительная часть пациентов протокола CHEST – 14,7 %, распределенная в группу индукционной ХТ, в итоге не оперировалась [8]. Несмотря на это, общая выживаемость была в целом лучше в группе индукционной ХТ с последующей операцией. После индукционной ХТ отмечено снижение количества выполненных пневмонэктомий с 25 до 15 % и резекций легких в объеме большем, чем стандартная лобэктомия, с 52 до 28 %, что поддерживает теорию о снижении стадии заболевания в результате воздействия предоперацион-

ной ХТ. Подобные тенденции нашли своё отражение (табл. 3) и в данном исследовании.

Ни наше, ни обсуждаемые исследования не предназначались для непосредственного сравнения эффективности индукционной и адъювантной ХТ. Показано, что 90 % пациентов выполнена запланированная в предоперационном периоде ХТ, в то время как планируемая адъювантная ХТ завершена в 61 % наблюдений. Сравнивая различные подходы, важно обратить внимание на опубликованные рекомендации по лечению больных IIIA стадией НМРЛ, которые указывают на то, что индукционная ХТ приводит к интраоперационным техническим трудностям вследствие развития фиброза, а больные, как правило, требуют более тщательного послеоперационного наблюдения и ухода, с этими выводами нельзя не согласиться. Руководящие принципы подчеркивают важность выполнения оперативных вмешательств хирургом, имеющим опыт хирургического лечения данной группы пациентов [13].

Продолжающееся во 2-й фазе рандомизированное клиническое исследование индукционной ХИТ с использованием отечественного иммунного препарата рекомбинантного гибридного белка α -фактор некроза опухолей-тимозин- α -1 (ФНО-Т) при сравнительной оценке эффективности продемонстрировало результаты, подобные тем, о которых сообщалось в других исследованиях, изучавших результаты индукционной ХТ в том же диапазоне больных НМРЛ. Среди пациентов с IIB-IIIA стадиями НМРЛ преимущество 2-летней бессобытийной выживаемости года составило 26 % ($p = 0,054$), что позволяет сделать акцент в пользу применения хорошо переносимого иммунного препарата. Будущее развитие исследования в популяции с IIB-IIIA стадиями заболевания видится в дальнейшем наборе клинического материала для изучения влияния предложенной методики на показатели выживаемости и сборе данных для фармакогеномного определения предикторов исхода лечения.

Литература

1. Jemal A., Siegel R., Ward E., Hao Y., Xu J., Thun M.J. Cancer statistics, 2009 // *CA Cancer J. Clin.* 2009. Vol. 59. P. 225–249.
2. Ahrendt S.A., Yang S.C., Wu L., Roig C.M., Russell P., Westra W.H., Jen J., Brock M.V., Heitmiller R.F., Sidransky D. Molecular assessment of lymph nodes in patients with resected stage I non-small cell lung cancer: Preliminary results of a prospective study // *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 2002. Vol. 123. P. 466–473.
3. Douillard J.Y., Rosell R., De Lena M., Carpagnano F., Ram-lau R., Gonzalez-Larriba J.L., Grodzki T., Pereira J.R., Le Groumellec A., Lorusso V., Clary C., Torres A.J., Dabre J., Souquet P.J., Astudillo J., Fournel P., Arta-Cortes A., Jassem J., Koubkova I., His P., Riggi M., Hurloup P. Adjuvant vinorelbine plus cisplatin versus observation in patients with completely resected stage IB-IIIA non-small-cell lung cancer (Adjuvant Navelbine International Trialist Association [ANITA]): A randomised controlled trial // *Lancet Oncol.* 2006. Vol. 7. P. 719–727.
4. Strauss G.M., Herndon J.E. 2nd, Maddaus M.A., Johnstone D.W., Johnson E.A., Harpole D.H., Gillenwater H.H., Watson D.M., Sugarbaker D.J., Schilsky R.L., Vokes E.E., Green M.R. Adjuvant paclitaxel plus carboplatin compared with observation in stage IB non-small-cell lung cancer: CALGB 9633 with the Cancer and Leukemia Group B, Radiation Therapy Oncology Group, and North Central Cancer Treatment Group Study Groups // *J. Clin. Oncol.* 2008. Vol. 26. P. 5043–5051.
5. Болотина Л.В., Королева Л.А., Дешикина Т.И. Неoadъювантная химиотерапия при немелкоклеточном раке легкого // *Онкология. Журнал им. П.А. Герцена* 2012. № 2. С. 84–87.
6. Лазутин Ю.Н., Пыльцин С.П., Харитонов А.П. Современное состояние проблемы неoadъювантной химиотерапии немелкоклеточного рака легкого (НМРЛ) // *Злокачественные опухоли*. 2014. № 3. С. 22–27.
7. Van Zandwijk N., Smit E.F., Kramer G.W., Schramel P., Gans S., Festen J., Termeer A., Schlosser N.J., Debruyne C., Curran D., Giaccone G. Gemcitabine and cisplatin as induction regimen for patients with biopsy-proven stage IIIA N2 non-smallcell lung cancer: A phase II study of the European Organization for Research and Treatment of Cancer Lung Cancer Cooperative Group (EORTC 08955) // *J. Clin. Oncol.* 2000. Vol. 18. P. 2658–2664.
8. Scagliotti G.V., Pastorino U., Vansteenkiste J.F., Spaggiari L., Facciolo F., Orlovski T.M., Maiorino L., Hetzel M., Leschinger M., Visseren-Crui C., Torri V. Randomized phase III study of surgery alone or surgery plus preoperative cisplatin and gemcitabine in stages IB to IIIA non-small-cell lung cancer // *J. Clin. Oncol.* 2012. Vol. 30(2). P. 172–178.
9. Lazutin Y.N., Kharitonova A.P., Zinkovich S.A., Vladimirova L.Yu., Pylytsin S.P. Pilot results of neoadjuvant chemioimmunotherapy (NCIT) in treatment of patients (pts) with non-small cell lung cancer // *J. Clin. Oncol.* 2015. Vol. 3.
10. Pisters K.M., Vallieres E., Crowley J.J., Franklin W.A., Bunn P.A., Ginsberg R.J., Putham J.B.Jr., Chansky K., Gandara D. Surgery with or without preoperative paclitaxel and carboplatin in early-stage non-small-cell lung cancer: Southwest Oncology Group Trial S9900, an intergroup, randomized, phase III trial // *J. Clin. Oncol.* 2010. Vol. 28. P. 1843–1849.
11. Gilligan D., Nicolson M., Smith I., Groen H., Dalesio O., Goldstraw P., Hatton M., Hopwood P., Manegold C., Schramel P., Smit H., Van Meerbeeck J., Nankivell M., Parmar M., Pugh C., Stephens R. Preoperative chemotherapy in patients with resectable non-small cell lung cancer: Results of the MRC LU22/NVALT 2/EORTC 08012 multicentre randomised trial and update of systematic review // *Lancet.* 2007. Vol. 369. P. 1929–1937.
12. Depierre A., Milleron B., Moro-Sibilot D., Chevret S., Quoix E., Lebeau B., Braun D., Breton J.L., Lemarie E., Gouva S., Paillet N., Brechot J.M., Janicot H., Lebas F.X., Terrioux P., Clavier J., Foucher P., Monchatre M., Coetmeur D., Level M.S., Leclerc P., Blanchon F., Rodier J.M., Thiberville L., Ville-neuve A., Westeel V., Chastang C. Preoperative chemother-

rapy followed by surgery compared with primary surgery in resectable stage I (except T1N0), II, and IIIa non-small-cell lung cancer // *J. Clin. Oncol.* 2002. Vol. 20. P. 247–253.

13. Robinson L.A., Ruckdeschel J.C., Wagner H. Jr., Stevens C.W. Treatment of non-small cell lung cancer-stage IIIA: ACCP evidence-based clinical practice guidelines (2nd edition) // *Chest.* 2007. Vol. 132. P. 243S–265S.

References

1. Jemal A., Siegel R., Ward E., Hao Y., Xu J., Thun M.J. Cancer statistics, 2009. *CA Cancer J Clin.*, 2009, vol. 59(4), pp. 225–249.
2. Ahrendt S.A., Yang S.C., Wu L., Roig C.M., Russell P., Westra W.H., Jen J., Brock M.V., Heitmiller R.F., Sidransky D. Molecular assessment of lymph nodes in patients with resected stage I non-small cell lung cancer: preliminary results of a prospective study. *J Thorac. Cardiovasc. Surg.*, 2002, vol. 123(3), pp. 466–473.
3. Douillard J.Y., Rosell R., De Lena M., Carpagnano F., Ramlaou R., Gonz  les-Larriba J.L., Grodzki T., Pereira J.R., Le Groumellec A., Lorusso V., Clary C., Torres A.J., Dahabreh J., Souquet P.J., Astudillo J., Fournel P., Artal-Cortes A., Jassem J., Koubkova L., His P., Riggi M., Hurteloup P. Adjuvant vinorelbine plus cisplatin versus observation in patients with completely resected stage IB-IIIa non-small-cell lung cancer (Adjuvant Navelbine International Trialist Association [ANITA]): a randomised controlled trial. *Lancet Oncol.*, 2006, vol. 7(9), pp. 719–727.
4. Strauss G.M., Herndon J.E. 2nd, Maddaus M.A., Johnstone D.W., Johnson E.A., Harpole D.H., Gillenwater H.H., Watson D.M., Sugarbaker D.J., Schilsky R.L., Vokes E.E., Green M.R. Adjuvant paclitaxel plus carboplatin compared with observation in stage IB non-small-cell lung cancer: CALGB 9633 with the Cancer and Leukemia Group B, Radiation Therapy Oncology Group, and North Central Cancer Treatment Group Study Groups. *J. Clin. Oncol.*, 2008, vol. 26(31), pp. 5043–5051.
5. Bolotina L.V., Koroleva L.A., Deshkina T.I. Neoadjuvantnaya khimioterapiya pri nemelkokletochnom rake legkogo [Neoadjuvant chemotherapy for small cell lung cancer]. *Onkologiya. Zhurnal im. P.A. Gertsena*, 2012, no 2, pp. 84–87.
6. Lazutin Yu. N., Pyl'tsin S.P., Kharitonova A.P. Sovremennoe sostoyanie problemy neoadjuvantnoi khimioterapii nemelkokletochnogo raka legkogo (NMRL) [Current state of problem neoadjuvant chemotherapy small cell lung cancer (NSCLC)]. *Zlokachestvennye opukholi*, 2014, no 3, pp. 22–27.
7. Van Zandwijk N., Smit E.F., Kramer G.W., Schramel F., Gans S., Festen J., Termeer A., Schlosser N.J., Debruyne C., Curran D., Giaccone G. Gemcitabine and cisplatin as induction regimen for patients with biopsy-proven stage IIIA N2 non-small-cell lung cancer: a phase II study of the European Organization for Research and Treatment of Cancer Lung Cancer Cooperative Group (EORTC 08955). *J. Clin. Oncol.*, 2000, vol. 18(14), pp. 2658–2664.
8. Scagliotti G.V., Pastorino U., Vansteenkiste J.F., Spaggiari L., Facciolo F., Orłowski T.M., Maiorino L., Hetzel M., Leschinger M., Visseren-Gruel C., Torri V. Randomized phase III study of surgery alone or surgery plus preoperative cisplatin and gemcitabine in stages IB to IIIA non-small-cell lung cancer. *J. Clin. Oncol.*, 2012, vol. 30(2), pp. 172–178.
9. Lazutin Yu.N., Kharitonova A.P., Zinkovich S.A., Vladimirova L.Yu., Pyl'tsin S.P. Pilot results of neoadjuvant chemioimmunotherapy (NCIT) in treatment of patients (pts) with non-small cell lung cancer (NSCLC). *J. Clin. Oncol.*, 2015, no 15.
10. Pisters K.M., Valli  res E., Crowley J.J., Franklin W.A., Bunn P.A. Jr., Ginsberg R.J., Putnam J.B.Jr., Chansky K., Gandara D. Surgery with or without preoperative paclitaxel and carboplatin in early-stage non-small-cell lung cancer: Southwest Oncology Group Trial S9900, an intergroup, randomized, phase III trial. *J. Clin. Oncol.*, 2010, vol. 28(11), pp. 1843–1849.
11. Gilligan D., Nicolson M., Smith I., Groen H., Dalesio O., Goldstraw P., Hatton M., Hopwood P., Manegold C., Schramel F., Smit H., van Meerbeeck J., Nankivell M., Parmar M., Pugh C., Stephens R. Preoperative chemotherapy in patients with resectable non-small cell lung cancer: results of the MRC LU22/NVALT 2/EORTC 08012 multicentre randomised trial and update of systematic review. *Lancet*, 2007, vol. 369(9577), pp. 1929–1937.
12. Depierre A., Milleron B., Moro-Sibilot D., Chevret S., Quoix E., Lebeau B., Braun D., Breton J.L., Lemari   E., Gouva S., Paillot N., Br  chet J.M., Janicot H., Lebas F.X., Terrioux P., Clavier J., Foucher P., Monch  tre M., Co  tmeur D., Level M.C., Leclerc P., Blanchon F., Rodier J.M., Thiberville L., Villeneuve A., Westeel V., Chastang C. Preoperative chemotherapy followed by surgery compared with primary surgery in resectable stage I (except T1N0), II, and IIIa non-small-cell lung cancer. *J. Clin. Oncol.*, 2002, vol. 20(1), pp. 247–253.
13. Robinson L.A., Ruckdeschel J.C., Wagner H.Jr., Stevens C.W. Treatment of non-small cell lung cancer-stage IIIA: ACCP evidence-based clinical practice guidelines (2nd edition). *Chest.*, 2007, vol. 132.

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

ПЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ПРОБЛЕМЫ ТЕОРИИ ОПЕРАТОРОВ И ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ»

С 26 апреля по 1 мая 2015 г. при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и фонда Дмитрия Зимина «Династия» прошла пятая ежегодная Международная научная конференция «Современные методы и проблемы теории операторов и гармонического анализа и их приложения».

В данной серии конференций традиционно принимают участие ведущие российские и зарубежные ученые, в том числе представители Португалии, Мексики, Армении, Украины, Белоруссии, Германии, Израиля, Турции, Азербайджана, Камеруна, Латвии и других стран. С каждым годом количество участников увеличивается, хотя показательным является не само количество, а расширение географии участников (российских и зарубежных), в том

числе тех, кто раньше не имел контактов с ростовской математической школой. Традиционно в рамках конференции была реализована инициатива преемственности поколений. Две секции конференций были посвящены памяти выдающихся математиков Н.С. Ландкофа (Россия) и А.А. Килбаса (Беларусь).

Пленарные лекции после должной доработки будут выставлены в свободном доступе на YouTube и на сайте конференции <http://karapetyants.sfedu.ru/conf/>.

Интервью ведущих участников конференции по современным проблемам науки и образования предполагается транслировать по телеканалам «Мой мир», «РБК Южный регион», «Ростов-на-ТВ». Сайт конференции: <http://karapetyants.sfedu.ru/conf/>

А. Карпетянц

ПРИРОДООХРАННЫЙ ФЕСТИВАЛЬ «ВОСПЕТАЯ СТЕПЬ»

Одно из основных направлений работы ассоциации «Живая природа степи» – просветительская деятельность, экологическое образование и воспитание населения, развитие экотуризма. Ежегодно ассоциация проводит многочисленные природоохранные акции в администрациях Ростовской области (РО) и её районах, различных предприятиях, в Донской государственной публичной библиотеке, Дворце творчества детей и молодежи, многочисленных экологических объединениях, средних школах, других структурах. Устраиваются природоохранные конкурсы фотографий и картин, семинары, олимпиады, экологеря и т.д. Манычский комплекс, включающий стационар, Центр редких животных европейских степей ассоциации и заповедник «Ростовский», стал наиболее посещаемым экотуристами местом в РО и на Юге России.

В целях объединения занимающихся природоохранной деятельностью структур РО, подведения итогов их работы, популяризации природных ресурсов Манычской долины, повышения роли экотуризма в образовательной среде ассоциация совместно с заповедником 10–11.10.2013 г. на Манычском комплексе провела I областной фестиваль экологического туризма «Воспетая степь». Он, как и последующие фестивали, стал своеобразным отчётом годовой деятельности ассоциации и связанных с ней структур по экологическому образованию и воспитанию населения, развитию экотуризма на Дону. На фестивале собрались около 300 участников. II областной фестиваль экологического туризма «Воспетая степь» состоялся 18–19.04.2014 г. Одна из задач фестиваля – акцентирование внимания жителей области на уязвимости степных экосистем и необходимости бережного к ним отношения. Этот фестиваль объединил около 500 человек из городов и районов области, других регионов России. III фестиваль прошел 19–20.09.2014 г. и был приурочен к Международному дню журавля. В нем приняли участие 630 человек.

Объявленный межрегиональным IV фестиваль экологического туризма «Воспетая степь» организовали ассоциация, минприроды РО и заповедник. Он проходил 18–19.04.2015 г. в Манычской степи, покрытой весенней зеленью и яркими узорами цветущих растений. Активное участие в нем приняли члены Общественной палаты РО, ДОСААФ РО и

ЗС РО, департамента по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций РО (ДПЧС); его поддержали постоянные партнеры ассоциации: ОАО «Газпром газораспределение Ростов н/Д», ООО «Газпром межрегионгаз Ростов н/Д» (Газпром РО), ЗАО «Аксинья» – Семикаракорская керамика, ЮФУ, ЮНЦ РАН, ООО «Солнечное», ООО «Конный завод «Донской», кондитерская фабрика «Мишкино». За несколько дней в открытой степи к востоку от п. Волочаевского с помощью ДПЧС вырос палаточный городок со сценой, лекторием, многочисленными мастер-классами, презентационными площадками, сувенирными шалашами, стоянкой для автомашин, буфетами.

На фестиваль приехали около 3500 заявленных и более 1500 незаявленных человек: школьники и педагоги практически со всех районов области, студенты, представители государственной власти, бизнеса, общественных организаций и просто любители природы. Помимо жителей РО, в нем приняли участие представители Республики Калмыкия, Краснодарского и Ставропольского краев, Волгоградской, Воронежской и Московской областей, Санкт-Петербурга. Свои площадки представили минприроды РО, ассоциация, заповедник, Волгодонская АЭС, Азовский музей-заповедник, музей-заповедник им. Шолохова, КИГИ РАН, Содружество детей и молодежи Дона, Ботанический сад ЮФУ, Ростовское художественное училище им. Грекова, общественная организация «Экомост», островянский детский дом, Детский эколого-биологический центр г. Ростова н/Д, Дворец детского и юношеского творчества г. Ростова н/Д, Дом детского творчества Кагальницкого района и другие структуры. В весеннем празднике Манычских степей приняли участие губернатор РО В.Ю. Голубев, председатель Законодательного собрания РО В.Е. Дерябкин, генеральный директор Газпрома РФ А.Б. Миллер и Газпрома РО А.М. Узденов, ряд министров РФ и РО, члены ЗС РО, директор программы ЦТ «В мире животных» Ю.Б. Лапин и ее ведущий Н.Н. Дроздов, другие известные лица.

Фестиваль начался с авиашоу: парашютисты ДОСААФ РО выполнили показательные прыжки с флагами России, РО, фестиваля «Воспетая степь». Гостей праздника приветствовали заместитель губернатора РО В.Н. Василенко и глава Орловского р-на Ю.В. Харенко. Фестиваль проводился в зна-

менательный, юбилейный год Победы, поэтому уважаемыми гостями стали жители района, ветераны войны. Церемонию открытия продолжили парад флагов, выступления детских творческих коллективов РО и Калмыкии. Школьники Орловского района подготовили масштабное костюмированное представление «Императрица Екатерина в донских степях». Во время красочного флешмоба степь раскрасили яркие костюмы участников, изображавших степные первоцветы.

На многочисленных площадках участники фестиваля знакомились с деятельностью минприроды РО, ассоциации, заповедника, ЮФУ, ЮНЦ РАН, МЧС и других структур, изготавливали изделия из природных материалов (декупаж, экосумка), запускали воздушных змеев, занимались йогой, рисовали природу на пленэре, изготавливали сувениры (площадки «Декупаж», «Экосумка», «Семикаракорская керамика», «Затейливый сухоцвет», «Плетение из лозы», «Гончарный круг», др.), познавали основы экотуризма и педагогических практик (оригами, вышивка на заборе, акватушь). Большое внимание было уделено ресурсам живой природы, редким и исчезающим растениям и животным РО, их сохранению и восстановлению. Одной, из наиболее посещаемых оказалась площадка Калмыкии с традиционной калмыцкой кибиткой. В ней гости могли познакомиться с бытом и историей этого степного народа. Интерес вызвала площадка ДОСААФ, где можно было услышать участников Великой Отечественной войны (И.П. Клей, П.С. Соболев), потрогать легендарный автомат ППШ, винтовку Мосина, станковый пулемет.

По времени фестиваль совпал с массовым цветением тюльпанов Геснера (Шренка), Бибер-

штейна и двуцветкового, касатика карликового, многих других весенних трав, создавших неповторимые красочные узоры степного ковра. Массовый перелет пернатых, мелодичные песни многочисленных жаворонков в небе и резкий свист сусликов на земле обогащают красоту весенней степи. С ней участники праздника смогли познакомиться не только на месте проведения фестиваля. Многие десятки автобусов и легковых машин вывезли их на склоны соленых озер Лопуховатое, Грузское и в другие места, где цветущие тюльпаны и ирисы наблюдались в массовом количестве на больших площадях. Здесь сотрудники заповедника и ассоциации провели экскурсию по экологическим тропам, и в течение нескольких часов все могли полюбоваться красотой весенней степи, познакомиться со степными животными, провести фотосессию, снять фильмы, с помощью профессиональных художников сделать зарисовки.

Благодаря природоохранной деятельности ассоциации и заповедника, поддержке минприроды РО в пришло малоизвестные населению Манычские степи с каждым годом привлекают к себе все большее внимание. Если в первые годы создания заповедника и ассоциации количество их посетителей исчислялось сотнями, то в последние годы оно составляет десятки тысяч. Люди знакомятся здесь с природными богатствами степей, вопросами сохранения, восстановления и устойчивого их использования, приобретают новые природоохранные знания, формируют экологическое мышление и культуру. Ассоциация, заповедник и минприроды планируют продолжать и совершенствовать эту деятельность.

В.А. Миноранский

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

К 85-ЛЕТИЮ ДОКТОРА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК, ПРОФЕССОРА ЮРИЯ ФЕДОРОВИЧА КОРОБЕЙНИКА



18 июля 2015 г. исполняется 85 лет известному ученому, заслуженному деятелю науки Российской Федерации, заслуженному профессору Южного федерального университета Юрию Федоровичу Коробейнику.

Ю.Ф. Коробейник – крупный специалист в области дифференциальных операторов бесконечного порядка, теории абсолютно представляющих систем, теории интерполяции в пространствах аналитических функций. Его работы широко известны в России и далеко за ее пределами. Им опубликовано около 350 научных статей и 9 монографий, оказавших значительное влияние на формирование научных и педагогических кадров в Ростове-на-Дону и далеко за его пределами. Под его руководством защищены 22 кандидатские диссертации и 4 докторские.

В 2015 г. Ю.Ф. Коробейник отмечает не только 85-летие, но и 60-летие своей научной и педагогической деятельности. Вся его профессиональная жизнь, начиная со студенческой скамьи, связана с Ростовским государственным, ныне Южным федеральным университетом. На всех постах, на которых ему пришлось работать, от ассистента до заведующего кафедрой и проректора университета по научной работе, он с неукротимой энергией стремился к одной цели – укреплению и дальнейшему развитию университета и механико-математического учебно-научного

комплекса. Ярким свидетельством его высочайшего авторитета среди математиков и механиков Ростова является то, что Ю.Ф. Коробейник в течение 15 лет, с 1985 по 1999 г., был бессменным президентом Ростовского математического общества. Он является председателем диссертационного совета по защита диссертаций по специальностям 01.01.01 и 01.01.02 – единственного в ЮФО и СКФО по этим специальностям. На протяжении всей своей многолетней научной деятельности Ю.Ф. Коробейник был лектором и членом оргкомитетов многих математических симпозиумов, конференций и научных школ. Он принял самое деятельное участие в становлении и развитии журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки», многие годы был членом его редколлегии, сейчас – член редсовета. С 2004 г. Ю.Ф. Коробейник активно работает в редколлегии «Владикавказского математического журнала», единственного специализированного математического издания в Южном федеральном округе. Он был одним из инициаторов установления плодотворных связей между математиками Южного федерального университета и Южного математического института Владикавказского научного центра РАН.

Заслуги Ю.Ф. Коробейника получили высокую оценку государства и научной общественности. В 1991 г. ему было присвоено звание заслуженного деятеля науки Российской Федерации, он награжден орденом Дружбы. Ю.Ф. Коробейник является членом-корреспондентом Южно-Российского отделения Академии наук высшей школы и действительным членом Международной академии педагогического образования. В 1996 г. ученый совет Ростовского государственного университета присвоил ему почетное звание заслуженного профессора.

Поразительная работоспособность, искреннее уважение к окружающим и способность помочь им в трудную минуту снискали Ю.Ф. Коробейнику глубокое уважение среди коллег и признательность его учеников. Несмотря на солидный возраст, Юрий Федорович продолжает активно зани-

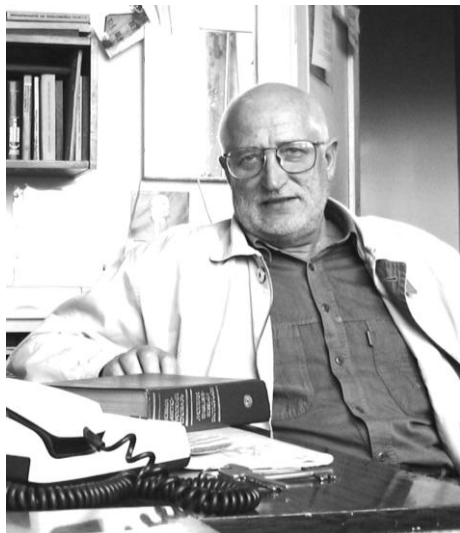
маться наукой и участвовать в воспитании молодых математиков – получает новые результаты, является соруководителем научного семинара по анализу.

Поздравляя Юрия Федоровича с юбилеем, желаем ему крепкого здоровья и многих лет жизни, наполненных новыми творческими успехами.

А.В. Абанин, А.О. Ватульян, А.Г. Кусраев, М.И. Карякин

Редакция и редколлегия журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» серии «Естественные науки» сердечно поздравляют юбиляра и желают ему здоровья и творческого долголетия!

К 70-ЛЕТИЮ ДОКТОРА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК, ПРОФЕССОРА МИХАИЛА ИВАНОВИЧА ЧЕБАКОВА



7 августа 2015 г. исполнилось 70 лет доктору физико-математических наук, профессору Михаилу Ивановичу Чебакову – заведующему лабораторией механики деформируемых тел и конструкций Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета, известному специалисту в области механики контактных взаимодействий.

М.И. Чебаков поступил в Ростовский госуниверситет в 1963 г. и с тех пор, с перерывом на службу в армии, его жизнь и трудовая деятельность неразрывно связаны с Ростовским госуниверситетом, ныне Южным федеральным университетом.

Окончив в 1970 г. механико-математический факультет РГУ по специальности «механика», а в 1974 г. – заочную аспирантуру, он защитил кандидатскую диссертацию, а впоследствии и докторскую. В РГУ (ЮФУ) работает с 1970 г. на различных научных должностях, продолжительное время в НИИ механики и прикладной математики занимал должность заведующего отделом механики контактных взаимодействий. Им опубликовано свыше 230 научных работ, в том числе 2 монографии (2004 и 2007 гг.), он регулярно выступает с докладами на научных конференциях и съездах, в том числе и международных.

Михаил Иванович многие годы является руководителем базовых бюджетных тем университета. Под его руководством выполнено несколько научных тем, финансируемых РФФИ. М.И. Чебаков был исполнителем двух издательских грантов РФФИ, руководителем гранта НАТО, исполнителем международной темы, финансируемой ИНТАС; был стипендиатом Германской службы академических обменов (ДААД). Является членом двух докторских диссертационных советов.

В настоящее время он является координатором с российской стороны большого международного проекта Седьмой рамочной программы Европейского союза (2012–2016 гг.). Проект связан с разработкой методов диагностики, контроля прочности и способов ремонта магистральных нефте- и газопроводов.

Развивая идеи выдающихся ученых академика И.И. Воровича и профессора В.М. Александрова, М.И. Чебаков разработал эффективные аналитические и численные методы решения различных типов интегральных уравнений, парных интегральных уравнений и парных рядов – уравнений, на их основе им созданы новые подходы к решению широкого класса статических и динамических задач механики контактных взаимодействий. Многие его исследования имеют практическую направленность, связанную с разработкой методов расчета таких трибосистем, как подшипники скольжения, зубчатые передачи, тормозные системы, рельс – колесо и др. Ряд прикладных исследований, связанных с железнодорожным транспортом, выполнен им в рамках научных проектов Ростовского госуниверситета путей сообщения.

М.И. Чебаков ведет педагогическую работу, читает спецкурс по контактным задачам теории упругости, руководит аспирантами, дипломными и курсовыми работами студентов.

К юбилею М.И. Чебаков подошел в отличной форме, накопив капитал бесценного опыта и жизненной мудрости, специальных знаний, навыков научного исследователя и преподавателя.

Его научные работы и организаторские способности внесли достойный вклад в становление и успехи руководимых им научных подразделений.

*Главный редактор журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион»
Академик РАН В.И. Колесников*

Редакция и редколлегия журнала «Известия вузов. Северо-Кавказский регион» серии «Естественные науки» желают Михаилу Ивановичу Чебакову дальнейших творческих успехов в работе, здоровья и благополучия, а также сохранить запас прочности, устойчивости и жизнелюбия!

**НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ И ПРИКЛАДНОЙ ЖУРНАЛ
ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ.
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ РЕГИОН. ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ**

Журнал «Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки», имеющий статус центрального издания, включенного в перечень ВАК, продолжает прием работ по следующим отраслям науки:

1. Физико-математические науки
(математика, механика);
2. Общая биология (физико-химическая
биология);

3. Науки о Земле.
- Также публикуются материалы в разделах:
- Заметки о книгах;
 - Хроника.

Журнал издается с периодичностью 4 номера в год. Помимо основных номеров выходят специальные тематические выпуски, посвященные разным научным направлениям, работам отдельных организаций, а также научные труды вузов, приуроченные к юбилейным датам. С электронной версией журнала можно ознакомиться на сайте Научной электронной библиотеки **www.elibrary.ru**.

Публикация материалов, на которые получена положительная рецензия, оплачивается лично автором или организацией. Стоимость работ – договорная.

Оформление работ осуществляется согласно правилам:

1. Статья – 2 экз. В начале статьи указать индекс УДК.
2. Электронный вариант статьи на диске. Текст должен быть набран в редакторе MicroSoft Office 98 Word 2000, 2003, 2007 через 1,5 интервала, шрифтом Times New Roman размером 14 пт, страницы пронумерованы. Для записи формул применять только редактор формул Equation 3.0.
3. Сопроводительное или рекомендательное письмо, если статья представляется от организации.
4. Полное название организации и ее адрес **на русском и английском языках**.
5. Сведения об авторах с указанием адреса, по которому будет вестись переписка **на русском и английском языках**.
6. Название статьи и фамилии авторов **на английском языке**.
7. Реферат **на русском и английском языках** (500 знаков/10 строк).
8. Ключевые слова **на русском и английском языках**.

Журнал распространяется по подписке – через ОАО «Роспечать» в подписной период. 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) 264-57-37.

E-mail: izvestiya@sfedu.ru

Адрес в интернете: www.izvestiya.sfedu.ru