

АКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СРЕДЫ И ТОЧНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ АНОМАЛИИ ПОЛЯ

В. К. БОГУШЕВИЧ, Л. Н. ЗАМАРЕНОВА, М. И. СКИПА

Отделение гидроакустики МГИ НАН Украины

The questions of the difference of anomaly and non-anomaly rays in conditions of different inhomogeneities and the difference of signal travel times of this rays, accuracy of inhomogeneity sound velocity field reconstruction on base of non-anomaly rays by acoustic ray sounding are considered.

Акустический мониторинг морской среды, использующий распространяющийся звук (прозвучивание), позволяет восстанавливать поля скорости звука $c(x, y, z, t)$ ее неоднородностей. При лучевом подходе к решению задачи восстановления поля в качестве измеряемых величин берутся времена распространения сигналов, T_m , по лучам Γ_m . Аномалию поля скорости звука, $\Delta c(x, y, z, t)$, восстанавливают по совокупности аномалий времён, ΔT_m , сигналов лучей, пересекающих неоднородность [1, 2]:

$$\Delta T_m = T_m - T_m^0 = \int_{\Gamma_m} (c_0 + \Delta c)^{-1} ds - \int_{\Gamma_m^0} c_0^{-1} ds, \quad m = 1, \dots, M, \quad (1)$$

где $c_0(x, y, z)$ – опорное состояние поля, s – расстояние по лучу, Γ_m^0 , T_m^0 – опорный луч и время в среде с полем c_0 , Γ_m , T_m – аномальный луч и время в среде с полем $c_0 + \Delta c$.

Задача (1) нелинейна и очень сложна. Обычно её упрощают путём линеаризации и замены траекторий Γ_m на Γ_m^0 [1, 2]. Полагая $\Delta c/c_0 \ll 1$, с относительной ошибкой порядка $\Delta c/c_0$

$$\int_{\Gamma_m^0} (c_0 + \Delta c)^{-1} ds - \int_{\Gamma_m^0} c_0^{-1} ds = - \int_{\Gamma_m^0} c_0^{-2} \cdot \Delta c ds. \quad (2)$$

Но при малых $\Delta c/c_0$ малым будет отличие и траекторий Γ_m и Γ_m^0 и их времён:

$$\left| \int_{\Gamma_m} (c_0 + \Delta c)^{-1} ds - \int_{\Gamma_m^0} (c_0 + \Delta c)^{-1} ds \right| = \Delta t(\Gamma_m, \Gamma_m^0) \ll \left| \int_{\Gamma_m^0} c_0^{-2} \cdot \Delta c ds \right|. \quad (3)$$

В этих случаях выражение для ΔT_m в линеаризованном по Δc виде можно записать

$$\Delta T_m^* \approx - \int_{\Gamma_m^0} c_0^{-2} \cdot \Delta c ds, \quad m = 1, \dots, M. \quad (4)$$

Точность восстановления поля Δc (4) определяется двумя слагаемыми, первое из которых (2) характеризуется относительной величиной аномалии поля $\Delta c/c_0$, а второе (3) – отличием траекторий Γ_m и Γ_m^0 . В Чёрном море величины Δc редко достигают 15 м/с и первая составляющая ошибки всегда мала (обычно не превышает 1% величины ΔT_m). Большую величину обычно имеет вторая составляющая ошибки, $\Delta t(\Gamma_m, \Gamma_m^0)$, определяемая отличием траекторий. Величина Δt , зависит как от размеров, положения и характеристик неоднородностей, так и от характеристик траекторий Γ_m и Γ_m^0 – глубин заворота z_m и положения относительно неоднородности. Определению влияния

указанных факторов на отличие траекторий Γ_m и Γ_m^0 и величину ошибки $\Delta t(\Gamma_m, \Gamma_m^0)$, определению условий корректной применимости линеаризации (4), $\Delta t(\Gamma_m, \Gamma_m^0) \ll \Delta T_m$, в случаях характерных неоднородностей Чёрного моря, и посвящена эта работа.

В условиях Чёрного моря с его большой пространственной плотностью лучевых траекторий для акустического мониторинга эффективно применение лучевого зондирования и лучевой реконструкции на основе неаномальных лучей (метод наложения) [3]. Метод применим для наблюдения за многими неоднородностями. Поэтому вопрос отличия траекторий Γ_m и Γ_m^0 и ошибки времени распространения, связанной с этим отличием, является важнейшим в задачах мониторинга Чёрного моря.

1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОШИБКИ ВЫЧИСЛЕНИЯ АНОМАЛИИ ВРЕМЕНИ

Оценка точности восстановления аномалии поля Δc при лучевом зондировании проводилась для характерных неоднородностей Чёрного моря – антиволноводная аномалия, внутритермоклинная линза и вихревое образование. Эта точность оценивалась по точности вычисления аномалии времени распространения ΔT_m , связанной с Δc соотношением (4). Для этого определялись точные значения аномалии времени распространения, $\Delta T_m = T_m - T_m^0$, рассчитанные для аномального и неаномального полей (1), и приближённые значения, получаемые при использовании метода наложения (4), и определяемые интегрированием величины Δc по длине аномальных участков неаномальных траекторий Γ_m^0 . В случае неоднородностей малого вертикального размера, B , когда аномальные участки траекторий s_{am} можно полагать линейными и когда $s_{am}/B = ds/dz$, интегрирование по лучам заменялось интегрированием кривой аномалии скорости звука $\Delta c(z)$. Определялась ошибка вычислений приближённых величин ΔT_m^* , $\varepsilon = 100(\Delta T_m^* - \Delta T_m)/\Delta T_m$, в разных условиях и для разных лучевых траекторий.

2 ПРОТЯЖЁННЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ

Для протяжённых неоднородностей с определённым приближением можно полагать неизменность характеристик по длине и представлять их аномалией в вертикальном профиле скорости звука $c(z) = c_0(z) + \Delta c(z)$. К таким неоднородностям можно относить протяжённые антиволноводные аномалии и внутритермоклинные линзы. Оценивались характеристики лучей для опорного, $c_0(z)$, и аномального, $c(z)$, профилей, сравнивались точные и приближённые значения аномалии времени распространения и зависимость ошибки от характеристик траекторий.

Антиволноводная аномалия

В качестве неоднородности с положительной величиной аномалии Δc , располагающейся ниже оси ПЗК, рассматривалась антиволноводная аномалия [4] с характерным профилем аномалии скорости звука $\Delta c(z/B)$ – рис. 1. Для неоднородности с вертикальным размером $B=25$ м, располагающейся в интервале глубин от $z_a^e = 95$ м до $z_a^h = 120$ м, различие опорного луча Γ_m^0 и аномального, Γ_m , проходящего через антиволноводную

область показано на рис. 2. Аномальный луч имеет меньшую глубину заворота z_m и меньшую горизонтальную протяжённость на глубине нижней границы неоднородности, $r_{a(120)}$. Для этой неоднородности зависимость отличия лучей Γ_m и Γ_m^0 – разница их горизонтальных протяжённостей, $r_{0(120)} - r_{a(120)}$, – от аномалии неоднородности Δc_{\max} для разных лучей показана на рис. 3. При расчётах использовались разрешённые лучи на трассах №1, 2, 3 протяжённостью $r = 18,5$ км, 20 км и 21 км. Приведенные на рис. 3 значения их глубины заворота демонстрируют уменьшение отличия траекторий с увеличением z_m . На рис. 4 для этих же лучей показана зависимость от Δc_{\max} ошибки ε вычисления ΔT_m . Графики на рис. 3 и 4 подобны – бóльшим отличиям траекторий Γ_m и Γ_m^0 соответствуют бóльшие ошибки вычисления ΔT_m^* . Зависимость ошибки ε от глубины точек заворота лучей z_m и их отстояния по глубине от оси, $z_m - z_a^0$, и нижней границы неоднородности, $z_m - z_a^H$, для трёх значений аномалии Δc_{\max} показана в таблице 1.

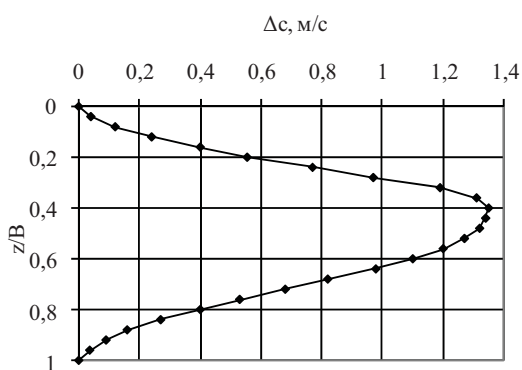


Рис. 1

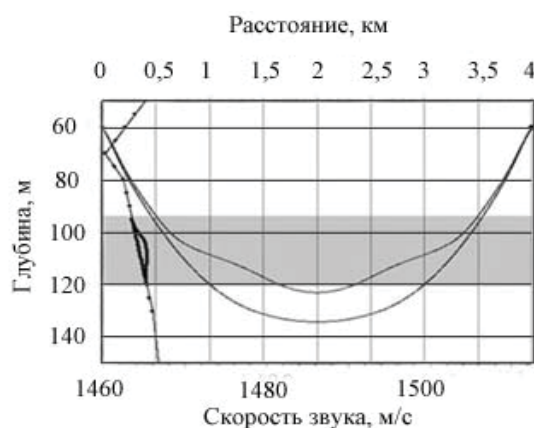


Рис. 2

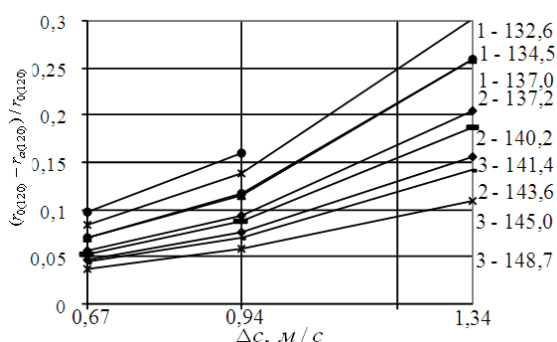


Рис. 3

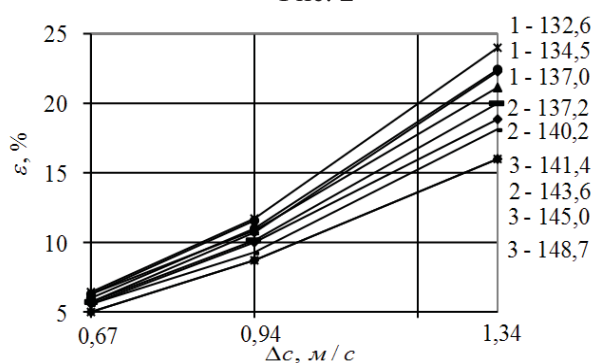


Рис. 4

Зависимость ошибки ε от Δc_{\max} и вертикального размера B неоднородности для лучевой траектории с $z_m = 143,6$ м, приведена в таблице 2. Зависимость ошибки ε от Δc_{\max} и размера B для аномалии с тем же профилем $\Delta c(z)$ (рис. 1), глубиной оси $z_a^0 = 200$ м, и

лучей с большими глубинами заворота, $z_m = 1865, 868$ и 527 м, приведены в табл. 3. Таблицы 1-3 демонстрируют сильную зависимость ошибки ε от величины аномалии Δc_{\max} и её зависимость от отстояния точек заворота траекторий от границ неоднородности.

Внутритермоклинная линза

В качестве неоднородности, располагающейся выше оси ПЗК и имеющей отрицательную величину аномалии Δc , рассматривалась внутритермоклинная линза [5]. Для внутритермоклинных линз размером $B = 15$ м, с разными глубинами расположения и разными профилями $\Delta c(z)$ (рис. 5) зависимость ошибки ε от толщины верхнего

Табл. 1

z_m , м	$z_m - z_a^0$, м	$z_m - z_a^H$, м	$\varepsilon, \%$		
			$\Delta c_{\max}, \text{ м/с}$		
			0,67	0,94	1,34
132,6	25,1	12,6	6,5	11,6	-
134,5	27,0	14,5	6,4	11,5	23,9
137,0	29,5	17,0	5,9	10,9	22,4
137,2	29,7	17,2	5,7	10,7	22,0
140,2	32,7	20,2	5,7	10,6	21,1
141,4	33,9	21,4	5,7	10,1	19,9
143,6	36,1	23,6	5,6	9,7	18,8
145,0	37,5	25,0	5,6	9,3	18,1
148,7	41,2	28,7	5,0	8,7	16,0

Табл. 3

z_m^0 , м	Δc_{\max} , м/с	$\varepsilon, \%$			
		$B, \text{ м}$			
		25	50	100	200
1865	0,67	-0,31	-0,36	-0,40	-1,0
	1,34	0	0	0,04	0
	2,68	0,78	0,8	0,8	0,8
	5,36	2,5	2,5	2,6	2,6
	10,72	6,5	6,6	6,7	6,8
868	0,67	0,14	0,1	0,1	-0,14
	1,34	1,2	1,2	1,2	1,1
	2,68	3,4	3,5	3,6	3,5
	5,36	8,8	9,0	9,4	9,6
	10,72	28,0	29,7	-	-
527	0,67	1,2	1,1	0,9	0,06
	1,34	3,4	3,4	3,3	2,7
	2,68	7,7	8,8	9,4	9,0
	5,36	26,3	29,2	-	-

Табл. 2

Δc_{\max} , м/с	$\varepsilon, \%$			
	$B, \text{ м}$			
	14,0	17,5	25,0	35,0
0,67	-	3,5	5,6	9,6
0,94	-	7,0	9,7	12,3
1,34	11,4	14,6	18,8	29,2
1,68	15,1	24,8	-	-

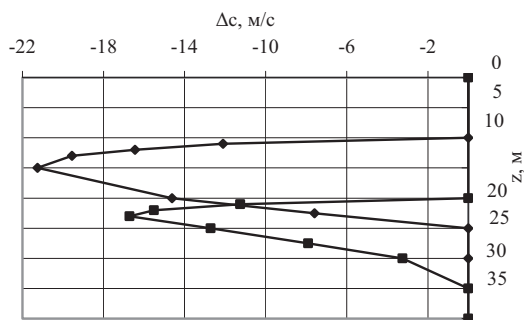


Рис. 5

перемешанного слоя h_{nc} , величины градиента скорости звука g_1 в этом слое и глубины верхних точек заворота z_m траекторий (с числом циклов N_u) приведены в таблице 4. Данные таблицы показывают сильную зависимость ошибки ε от величины аномалии Δc_{\max} и её слабую зависимость от градиента g_1 и глубины точки заворота z_m .

Если рассмотренные неоднородности не являются протяжёнными, то идеализация неизменности характеристик по длине справедлива только для большей части их горизонтального размера. При вертикальных размерах неоднородностей,

$B \sim 10 \dots 30$ м, и углах, под которыми их пересекают лучи, $\chi = 3 \dots 10^\circ$, длины аномальных участков лучей обычно не превышают 200...300 м. При этом даже при минимальных размерах неоднородностей, $L = 2 \dots 3$ км, для абсолютного большинства лучей, пересекающих эти неоднородности, будут применимы результаты этого раздела.

Табл. 4

Профиль, аномалия	$N_{\text{ц}}$	z_m , м	$z_{0a} - z_m$, м	$z_{\text{ва}} - z_m$, м	$\varepsilon, \%$
ПСЗ 1-1, $g_1 = 0,109$ 1/с, $h_{nc} = 20$ м $z_a = 20 \dots 35$ м, $\Delta c_{\text{max}} = -16,8$ м/с	7	0,72	22,28	19,28	-9,1
	8	9,31	13,69	10,69	-10,8
	9	14,25	9,25	6,25	-12,1
	10	17,07	5,93	2,93	-13,3
ПСЗ 1-2, $g_1 = 0,218$ 1/с, $h_{nc} = 20$ м $z_a = 20 \dots 35$ м $\Delta c_{\text{max}} = -16,8$ м/с	8	2,06	20,94	17,94	-8,0
	9	7,25	15,75	12,75	-8,7
	10	13,63	9,37	6,37	-10,4
ПСЗ 2, $g_1 = 0,160$ 1/с, $h_{nc} = 10$ м $z_a = 10 \dots 25$ м, $\Delta c_{\text{max}} = -21,26$ м/с	12	2,42	12,58	7,58	-21,3
	13	4,25	10,75	5,75	-22,6

3 ВИХРЕВОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

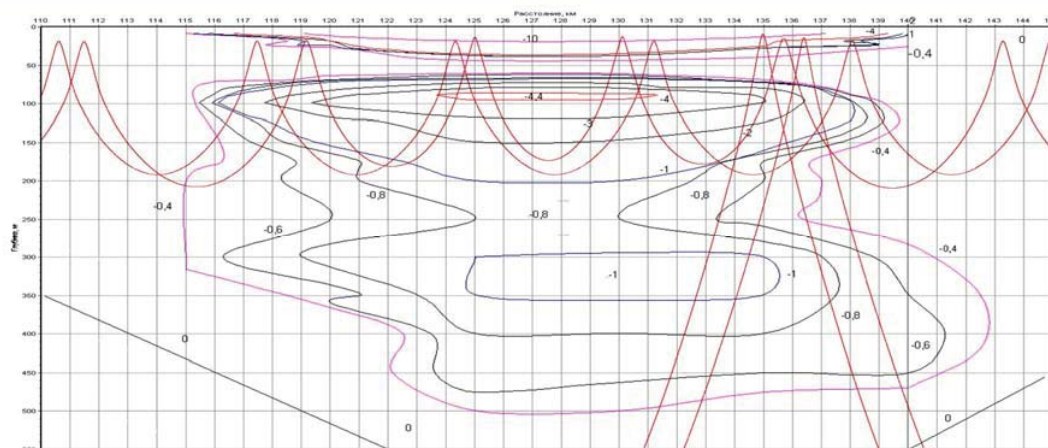


Рис. 6

В качестве акустической модели вихря принималась аномалия скорости звука с вертикальным размером $B \sim 500$ м и горизонтальным размером $L \sim 25$ км (рис. 6), полученная по данным работы [6]. В отличие от рассмотренных выше неоднородностей в случае вихревого образования аномалия Δc изменяется как по вертикали, так и по горизонтали, и имеет сложный и знакопеременный характер. Расчёты проводились для трассы протяжённостью $r = 180$ км и разных лучей, используемых для восстановления аномалии поля Δc , т.е. крутых, с $z_m \gtrsim 1000$ м, косых, с $500 < z_m < 1000$ м, и пологих, с $z_m < 500$ м. Для уменьшения ошибок вычисления, связанных с микронолучевостью распространения, использовалось усреднение времени по микролучам. Для лучей разного типа и разных глубин заворота z_m , углы выхода лучей $\chi_{\text{вых}}^0$, число циклов, $N_{\text{ц}}$, времена

распространения по неаномальному, T_m^0 , и аномальному, T_m , лучам, точное и приближённое значения аномалии времени ΔT_m и ΔT_m^* , значения разницы последних величин, абсолютное, Δ , и относительное, ε , приведены в таблице 5.

Табл. 5

Тип лучей	$\chi_{\text{вых}}^{\circ}, ^{\circ}$	$z_m, \text{ м}$	$N_{\text{ц}}$	$T_m^0, \text{ с}$	$T_m, \text{ с}$	$\Delta T_m^*, \text{ мс}$	$\Delta T_m, \text{ мс}$	$\Delta, \text{ мс}$	$\varepsilon, \%$
Крутые лучи, $z_{\text{и}} = 600\text{ м}$ $z_{\text{нр}} = 900\text{ м}$	8,996	1 740	5,1	121,723 76	121,725 00	1,23	1,24	-0,08	-0,64
	7,509	1 400	5,5	121,793 29	121,797 34	4,04	3,93	+0,11	+2,74
	-7,032	1 300	5,8	121,918 31	121,923 14	4,83	4,88	-0,05	-1,0
	5,792	1 090	6,4	121,975 99	121,980 57	4,57	4,48	+0,09	+2,14
Косые лучи $z_{\text{и}} = 100\text{ м}$	-5,268	1 000	6,8	122,082 04	122,085 71	3,67	2,96	+0,71	+19,4
	8,235	750	7,9	122,184 40	122,189 01	4,61	4,87	-0,26	-5,6
Пологие лучи, $z_{\text{и}} = 100\text{ м}$ $z_{\text{нр}} = 100\text{ м}$	7,638	620	8,8	122,266 54	122,271 89	5,35	5,65	-0,30	-5,7
	6,914	475	10,8	122,388 23	122,398 84	10,60	11,20	-0,60	-5,6
	6,357	382	12,8	122,480 46	122,491 44	10,98	11,29	-0,31	-2,8
	5,473	270	18,8	122,683 43	122,695 58	12,14	12,80	-0,66	-5,4
	5,066	240	20,7	122,735 55	122,748 80	13,25	14,18	-0,93	-7,0
	4,307	186	26,6	122,862 86	122,879 13	16,27	14,17	+2,10	+12,9
	3,842	160	30,5	122,931 26	122,950 49	19,23	21,48	-2,25	-11,7

Данные таблицы 5 показывают, что величина ошибки ε в случае большинства траекторий не превышает 5...7%, что можно считать хорошим результатом. Для пологих лучей, $\chi_{\text{вых}}^0 = 4,307^{\circ}$ и $\chi_{\text{вых}}^0 = 3,842^{\circ}$, ошибка слишком велика, +12,9% и -11,7%. Анализ результатов показывает, что эта ошибка определяется взаимным пространственным положением вихря и траекторий Γ_m и Γ_m^0 . На рис. 6 приведены траектории лучей Γ_m и Γ_m^0 ($\chi_{\text{вых}}^0 = 4,307^{\circ}$, $z_m^0 = 186$ м), имеющих большие величины как абсолютной, $\Delta = +2,097$ мс, так и относительной, $\varepsilon = +12,9\%$, ошибок времени. Такие ошибки можно значительно уменьшить за счёт пространственного усреднения ΔT_m и ΔT_m^* при сдвиге точек излучения-приёма по дальности (при неизменном расстоянии между ними).

Для траектории $\chi = -5,268^{\circ}$ ошибка имеет значение $\varepsilon = +19,4\%$, что объясняется значительным пространственным сдвигом луча Γ_m , проходящего в пограничной области вихря (рис. 6). В случае крутых лучей уменьшение аномалии Δc от середины вихря к его периферии приводит к сдвигу верхних точек заворота аномальных траекторий (относительно опорных) к середине вихря, что приводит к увеличению T_m и является причиной дополнительной ошибки. Эту ошибку тоже можно значительно уменьшить при использовании для оценивания пограничных областей неоднородности самых крутых лучей, с максимальными глубинами заворота. Такие лучи проходят в неоднородности наименьший путь и имеют наименьший сдвиг по дальности относительно луча Γ_m^0 .

ВЫВОДЫ

Проведенные расчёты показывают, что отличие траекторий Γ_m и Γ_m^0 и ошибки времени распространения, связанные с этим отличием, в условиях рассматриваемых неоднородностей невелики, что позволяет эффективно использовать неаномальные

траектории для восстановления аномалии поля. При этом приближённые расчёты на основе интегрирования аномалии поля по аномальным участкам неаномальных траекторий могут обеспечивать хорошую точность восстановления характеристик неоднородностей в задачах акустического мониторинга.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Munk, C. Wunsch. Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring // *Deep-Sea Res.* – 1978. – 26A. – P.123–161.
2. Гончаров В.В., Куртепов В.М. Успехи и проблемы акустической томографии океана // *Акустические волны в океане* / Под ред. Бреховских Л.М., Андреевой И.Б. – М.: Наука, 1987. – С. 15–24
3. Богушевич В.К., Замаренова Л.Н., Скипа М.И. О возможностях акустического лучевого зондирования неоднородностей морской среды // *Консонанс-2005. Акустичний симпозіум 27-29 вересня 2005 р.: Зб. праць* – Київ: Ін-т гідромеханіки. – 2005. – С. 90-96.
4. Дивизинюк М.М. Акустические поля Черного моря. – Севастополь: НИЦ «Государственный океанариум» МО Украины и НАНУ. – 1998. – 351 с.
5. Субботин А.А., Щуров С.В. Термохалинная структура внутритермоклинной линзы в северо-западной части Черного моря // *Проблемы Черного моря (тезисы докладов конференции)*. Севастополь, 10-17 ноября 1992 г. – Севастополь: 1992. – С. 52-53
6. Блатов А.С., Иванов В.А. О вихреобразовании в Черном море // *Комплексные исследования Черного моря*. – Севастополь, МГИ. – 1979. – С. 43–51.