

PACS numbers: 62.20.F-, 62.20.M-, 64.60.al, 68.35.Dv, 81.40.Cd, 81.40.Ef, 81.70.Bt

К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий

В. Н. Волчук

*Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры,
ул. Чернышевского, 24^а,
49600 Днепр, Украина*

В работе проведена оценка критериев качества многопараметрических технологий. Предложенный подход позволяет в зависимости от величины области самоподобия определяющего параметра оценивать степень значимости критериев на примере их определения для сортопрокатных чугуновых валков.

Ключевые слова: чугуновые валки, механические свойства, микроструктура, область самоподобия, фрактальный формализм.

У роботі проведено оцінку критеріїв якості багатопараметричних технологій. Запропонований підхід уможливилює, залежно від величини області самоподібності визначального параметра, оцінювати ступінь значущості критеріїв на прикладі визначення їх для сортопрокатних чавунних валків.

Ключові слова: чавунні валки, механічні властивості, микроструктура, область самоподібності, фрактальний формалізм.

In the article, the quality criteria of multiparametric technologies are analysed. An approach allowing estimating a significance of the criteria depending on the size of the area of key parameters' self-similarity is proposed. As an illustrative example, this approach for the case of cast-iron rolls is used.

Corresponding author: Volodymyr Mykolayovych Volchuk
E-mail: volchuky@yandex.ua

*Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture,
24^a Chernyshevsky Str., 49600 Dnipro, Ukraine*

Please cite this article as: V. M. Volchuk, On the Application of Fractal Formalism for Ranging Criteria of Quality of Multiparametric Technologies, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 39, No. 7: 949–957 (2017) (in Russian), DOI: 10.15407/mfint.39.07.0949.

Key words: cast-iron rolls, mechanical properties, microstructure, area of self-similarity, fractal formalism.

(Получено 10 февраля 2017 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Большинство многопараметрических технологий, включая технологии производства массивных металлических отливок, направлены на реализацию процесса получения изделия с заданными свойствами [1]. При этом критерии качества целевого продукта задаются существующими стандартами, штатной технологией и другими нормативными документами в допустимых пределах. Вероятно, последнее продиктовано тем, что разработчики нормативных документов стремятся выдержать технологический процесс, насколько это возможно, в конкретно выбранной рабочей области. Некоторые критерии, по своей физической природе могут противоречить друг другу. Например, увеличение твёрдости материала может противоречить изменениям пластичности, хрупкости, и т.п.

В этой связи возникает задача ранжирования по значимости критериев качества многопараметрических технологий. До недавнего времени, в основном, ранжирование критериев качества материалов проводилось согласно их служебному назначению. Однако при этом не учитывалась область их стабильности, которая не всегда может совпадать с определяющим параметром согласно требованиям заказчика. Ранжирование критериев по их важности для многопараметрической технологии должно гарантировать её стабильную работу в пределах, заданных нормативными документами.

Задача может решаться при помощи фрактального формализма, где в зависимости от величины области самоподобия определяющих параметров можно производить ранжирование критериев. При этом область самоподобия определяется стабильностью определяющего параметра в минимальных пределах изменений.

При определении области самоподобия используются принципы теории фракталов [2–9]. Применение фрактального формализма при идентификации объектов исследования до настоящего времени осуществляется, в основном, на микроуровне, где величина области самоподобия способствует выявлению диапазона минимально изменяющейся величины определяющего параметра. Диапазон самоподобия оценивается масштабом представления структуры, при котором фрактальные размерности элементов минимально различаются [10–12]. Подобный подход связан с определёнными временными и другими затратами.

В настоящей работе в качестве примера приводится оценка сте-

пени значимости критериев качества многопараметрической технологии производства сортопрокатных чугуновых валков¹, в зависимости от величины области самоподобия определяющего параметра. Такой подход позволяет применять его для ранжирования критериев качества широкого спектра различных многопараметрических технологий.

2. МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта идентификации рассматривались чугуновые сортопрокатные (С) валки с пластинчатой формой графита (П), легированные хромом (Х) и никелем (Н), исполнения СПХН (СПХН-41, СПХН-43, СПХН-45, СПХН-49, СПХН-51, СПХН-60 и СПХН-65) с гладкой поверхностью бочек. На рисунке 1 показана структура валкового чугуна, не подвергающегося термической обработке. Плавка металла для отливки валков осуществлялась в печах ИЧТ-6, ИЧТ-20.

Технологические параметры получения валков приведены в табл. 1.

В рабочей зоне бочек валков исполнения СПХН количество карбидов в виде цементита ледебуритной эвтектики изменялось от 8% до 37%, что соответствует эталону Ц25 согласно ГОСТ 3443. Содержание пластинчатого графита, который следует одновременно рассматривать как структурную составляющую и неметаллическое включение, изменялось от 0% до 3%, что соответствует баллу ПГ2, с длиной пластин, оцениваемых баллами ПГД45чПГД180. Анализ микроструктуры литых валков, вследствие изменения их химического состава, позволил зафиксировать изменения формы графитных включений в относительно узких пределах: с ПГф1 до ПГф2; распределения включений графита с ПГр1 до ПГр2. Площадь, занимаемая пластинчатым перлитом, составляла от 60 до 85%, что соответствует эталонам П70 и П85 соответственно.

Механические свойства валкового чугуна (предел прочности на разрыв — σ_B , предел прочности на изгиб — $\sigma_{изг}$, ударная вязкость — КС, твердость — HSD) согласно ГОСТу 27208 определяли с применением испытательной машины «INSTRON», маятникового копра ПСВ 5, машины испытательной ЦД-40, склероскопа Шора. Из литых проб отбирались заготовки, из которых изготавливались образцы для натуральных испытаний. Образцы вырезались из рабочей зоны гладких металлических бочек валков в тангенциальном направлении, а также изготавливались из отдельно отлитых проб в отливках — образцов-свидетелей. Ударная вязкость чугуна опреде-

¹Валки производства ПАО «Днепропетровский завод прокатных валков» (ПАО ДЗПВ).

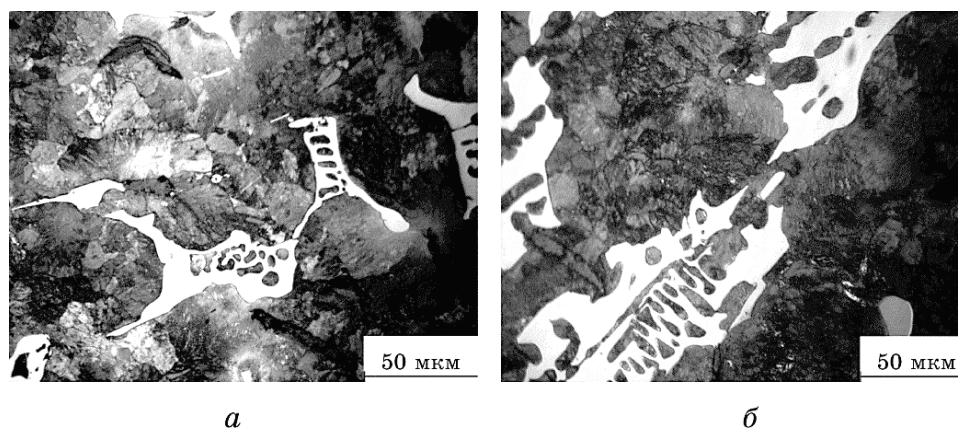


Рис. 1. Структура рабочего слоя бочек чугунных валков СПХН-45 (а) и СПХН-49 (б) на расстоянии 10 мм от поверхности: колонии ледебурита, графитной эвтектики, перлитная матрица; травление HNO_3 .

Fig. 1. Structure of the working layer of cast iron roll barrels of СПХН-45 (a) and СПХН-49 (б) at the distance of 10 mm from the surface: colonies of ledeburite, graphite eutectic, pearlite matrix; HNO_3 etching.

лялась на образцах без надреза размером $10 \times 10 \times 55 \text{ мм}^3$. Для оценки уровня прочности при изгибе использовались образцы $10 \times 10 \times 90 \text{ мм}^3$, а при испытаниях на растяжение — образцы диаметром 25 мм, при расчётной длине 50 мм.

В таблице 2 приведены механические свойства исследуемых валков.

Для статистического анализа в работе использовались результаты натуральных испытаний тангенциальных образцов. Выборка осуществлялась по 320 плавкам общей массой ≈ 900 тонн для валков исполнения СПХН, отлитых на ПАО ДЗПВ [13].

ТАБЛИЦА 1. Параметры литых заготовок чугунных валков.

TABLE 1. The parameters of cast iron pieces' rolls.

Технология изготовления валков				Параметры бочек валков			
№ плавки	Исполнение валка	Литьё в кокиль	Температура заливки чугуна, °С	Толщина намазки формы, мм	Диаметр, мм	Длина, мм	Масса, кг
1-173	СПХН-43			1310–1350	4–12	520	1000
2-134	СПХН-49	940				1200	6450
1-233	СПХН-45	1000				1900	9500
2-130	СПХН-45	920				1900	8200

ТАБЛИЦА 2. Механические свойства чугунных валков.

TABLE 2. Mechanical properties of the cast iron rolls.

№ п/п	№ плавки	Исполнение валка	σ_B , МПа	$\sigma_{изг}$, МПа	КС, кДж/м ²	HSD
1	1-173	СПХН-43	330	670	14	45
3	2-134	СПХН-49	320	440	15	51
2	1-233	СПХН-45	370	480	17	46
4	2-130	СПХН-45	420	600	19	47

3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Экспериментальные и статистические данные получены в рабочей зоне, в зависимости от химического состава валков согласно действующего ТУ У 14-2-1188-97 (рис. 2). Рабочие области критериев

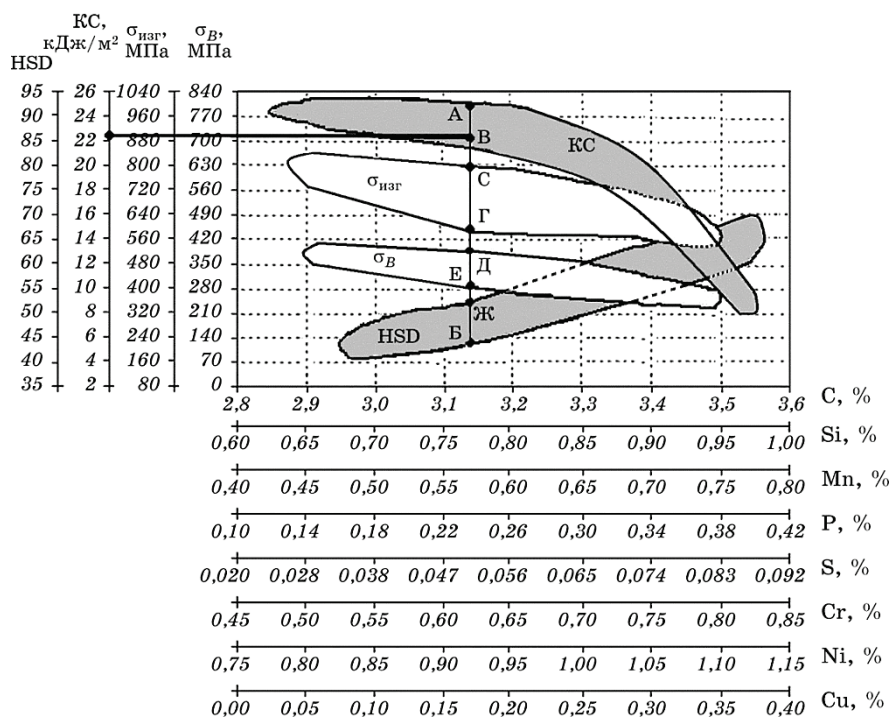


Рис. 2. Рабочая область механических свойств валков исполнения СПХН: $\sigma_B \cong 220-380$ МПа, $\sigma_{изг} \cong 390-840$ МПа, КС $\cong 8-25$ кДж/м², HSD $\cong 40-70$.

Fig. 2. Effective range of the mechanical properties of the СПХН rolls: $\sigma_B \cong 220-380$ МПа, $\sigma_{изг} \cong 390-840$ МПа, КС $\cong 8-25$ кДж/м², HSD $\cong 40-70$.

определялись графо-аналитическим методом, заключающимся в нормированном представлении переменных, величина которых приведена в процентах [14, 15]. Области значений механических свойств регулировались параметрами технологии: скоростью отвода тепла при остывании валков, способом изготовления — литьё в песчаную форму, металлическую, центробежное литьё и т.д.

На рисунке 2 приведены рабочие области механических свойств валков с учётом всего диапазона применяемых условий охлаждения в металлической форме.

Исследования рабочей области механических свойств рабочего слоя (до $\cong 50$ мм) бочек чугунных валков исполнения СПХН в рассматриваемом интервале элементов химического состава и параметров структуры, позволили установить следующее. Увеличение содержания углерода от 2,9 до 3,5% в рабочем слое валков (рис. 2) приводит к увеличению и укрупнению числа графитных включений, которые ослабляют металлическую перлитную матрицу. Этот факт обуславливает снижение прочности и ударной вязкости: показатели σ_B уменьшаются с 380 до 220 МПа; показатели $\sigma_{изг}$ — с 840 до 390 МПа, а показатели КС — с 25 до 8 кДж/м². Относительно высокие показатели прочности и ударной вязкости наблюдаются у валкового чугуна с содержанием до 3% углерода и до 0,5% кремния, который вызывает интенсивную графитизацию чугунных расплавов в отличие от углерода. При этом содержание легирующих элементов остаётся относительно невысоким: 0,45–0,55% Cr и 0,75–0,85% Ni. Как показано в работе [16], такое соотношение хрома и никеля обеспечивает повышение твёрдости по сечению валка с одновременным понижением хрупкости.

Повышение твёрдости от 38 до 68 единиц Шора сопровождается, во всех случаях, снижением прочностных свойств на изгиб и разрыв, что также обусловлено изменением содержания связанного углерода с 0,8 до 1,2%. На ударную вязкость благоприятно влияет возрастание никеля от 0,75 до 1,15% и уменьшение содержания фосфора до 0,31%. При больших диаметрах бочек валков твёрдость снижалась на 2–3 единицы, а при малых — повышалась на 1,0–1,5. При прочих равных условиях, это объясняется снижением или повышением скорости охлаждения соответственно при увеличении или уменьшении массы валка [16]. Валки исполнения СПХН-49 с диаметром бочки 940 мм и СПХН-45 с $\varnothing 920$ мм, изготавливаемые для чистовых и предчистовых клетей крупносортовых, рельсобалочных и непрерывно-заготовочных станков, благодаря невысокой скорости охлаждения имеют низкое содержание карбидной составляющей 8% и 11% соответственно. При этом твёрдость валка СПХН-49 составила 51–53 HSD, а валка СПХН-45 — 47 HSD, так как углерод наряду с карбидом железа образует и графит (до 3%). Валок исполнения СПХН-45 с диаметром бочки 1000 мм имеет твёрдость рабо-

чей зоны металлической бочки 54 HSD. Как отмечалось в работе [17], дальнейшее повышение показателей твёрдости за счёт увеличения содержания углерода и скорости охлаждения в производственных условиях ограничено и дальнейший рост твёрдости валков возможен только за счёт легирования.

Приведённый на рисунке 2 график оценки качества рабочих областей чугуна, делает возможным выбор значений конкретного механического свойства. При предпочтении к одному из рассматриваемых свойств валков, например к ударной вязкости (точка В на рис. 2), и проведя вертикаль АБ можно прогнозировать химический состав изделия и интервал существования его механических свойств. Как следует из этого рисунка, критерий $\sigma_{изг}$ изменяется в пределах от 580 до 800 МПа (отрезок СГ); σ_B — в пределах 290–380 МПа (отрезок ДЕ); HSD — в пределах 43–52 единиц (отрезок ЖБ). Химический состав валка принимает следующие значения: 3,14% С, 0,77% Si, 0,57% Mn, 0,236% P, 0,051% S, 0,62% Cr, 0,92% Ni, 0,17% Cu.

Область самоподобия нормированных оценок критериев качества для предела прочности на разрыв изменялась от 220 до 380 МПа, т.е. на 160 единиц (в пределах $(160/380) \cdot 100\% = 42\%$). С этим принимаем, что коэффициент самоподобия K_{σ_B} равен 0,42. Аналогично рассчитывались показатели самоподобия для остальных критериев, составившие для $K_{\sigma_{изг}} = 0,54$, $K_{K_C} = 0,68$ и $K_{HSD} = 0,43$ (рис. 3).

Несмотря на то, что определяющим параметром среди рассматриваемых критериев качества, является твёрдость, она имеет более низкий показатель области самоподобия — 0,43. В этой связи показатель самоподобия для твёрдости, как и показатель области самоподобия для прочности на разрыв — 0,42, менее чувствительны к изменениям химического состава, по сравнению с показателем самоподобия для вязкости — 0,68. Данные показатели качества легче

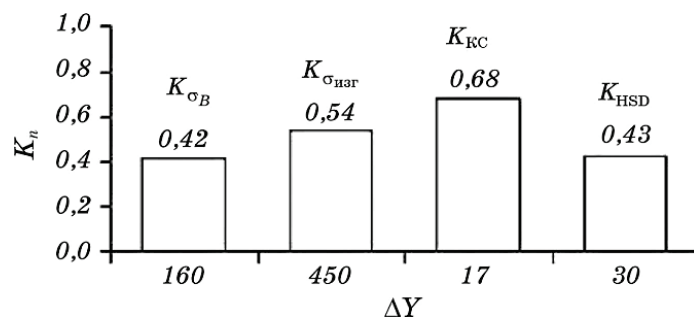


Рис. 3. Ранжирование коэффициентов самоподобия K_n в зависимости от определяющего параметра показателей качества ΔY .

Fig. 3. Ranking of the coefficients of self-similarity K_n as a function of the parameter defining the quality, ΔY .

удержать в областях их самоподобия, чем остальные показатели, при возможных изменениях параметров технологии. При этом ударная вязкость имеет более высокий диапазон изменения области самоподобия среди рассматриваемых областей. Это указывает на то, что ударная вязкость наиболее чувствительна к изменениям штатной технологии в пределах рабочей области по сравнению с остальными характеристиками. Поскольку вязкость валков играет важную роль в служебных характеристиках валкового чугуна, постольку можно предполагать, что для получения валка с заданным показателем вязкости необходимо задавать более узкий диапазон изменения химического состава.

4. ВЫВОДЫ

Применение фрактального формализма, как показано в работе, обеспечивает более точную оценку характеристик качества материала благодаря их ранжированию, что способствует стабилизации работы многопараметрической технологии.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Дубров, В. Большаков, В. Волчук, *Пути идентификации периодических многокритериальных технологий* (Саарбрюккен, Германия: Palmarium Academic Publishing: 2015).
2. B. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature* (New York–San Francisco: Freeman: 1982).
3. C. W. Lung and N. H. March, *Mechanical Properties of Metals. Atomistic and Fractal Continuum Approaches* (Singapore: World Scientific: 1999).
4. А. С. Бакай, *Материаловедение*, вып. 6: 2 (2009); там же, вып. 7: 2 (2009); там же, вып. 8: 2 (2009).
5. В. П. Шестопапов, *Доповіди НАН України*, № 3: 96 (1999).
6. В. Т. Гринченко, В. Т. Мацьпура, А. А. Снарский, *Введение в нелинейную динамику. Хаос и фракталы* (Киев: Наукова думка: 2005).
7. А. Ф. Булат, В. И. Дырда, *Фракталы в геомеханике* (Киев: Наукова думка: 2005).
8. В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогоев, *Синергетика и фракталы в материаловедении* (Москва: Наука: 1994).
9. J. Smrek and A. Y. Grosberg, *Phys. Rev. E*, **92**: 012702 (2015).
10. В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров, *Доповіди НАН України*, № 11: 99 (2008).
11. V. Bolshakov, V. Volchuk, and Yu. Dubrov, *Fractals and Properties of Materials* (Saarbrücken, Deutschland: Lambert Academic Publishing: 2016).
12. В. И. Большаков, В. Н. Волчук, *Металлофиз. новейшие технол.*, **33**, № 3: 347 (2011).
13. А. Е. Кривошеев, *Литые валки* (Москва: Металлургиздат: 1957).
14. В. І. Большаков, В. М. Волчук, Ю. І. Дубров, *Вісник НАН України*, № 8: 66

- (2013).
15. В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров, *Доповіди НАН України*, № 11: 77 (2014).
 16. Н. А. Будагьянц, В. Е. Карский, *Литые прокатные валки* (Москва: Металлургия: 1983).
 17. Т. С. Скобло, Н. М. Воронцов, С. И. Рудюк, Н. А. Будагьянц, В. А. Воронина, *Прокатные валки из высокоуглеродистых сплавов* (Москва: Металлургия: 1994).

REFERENCES

1. Yu. Dubrov, V. Bol'shakov, and V. Volchuk, *Puti Identifikatsii Periodicheskikh Mnogokriterialnykh Tekhnologiy* [Paths to Identification of Periodic Multicriteria Technologies] (Saarbrücken, Deutschland: Palmarium Academic Publishing: 2015) (in Russian).
2. B. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature* (New York–San Francisco: Freeman: 1982).
3. C. W. Lung and N. H. March, *Mechanical Properties of Metals. Atomistic and Fractal Continuum Approaches* (Singapore: World Scientific: 1999).
4. A. S. Bakai, *Materialovedenie*, Iss. 6: 2 (2009); *ibid.*, Iss. 7: 2 (2009); *ibid.*, Iss. 8: 2 (2009).
5. V. P. Shestopalov, *Dopov. Nac. Akad. Nauk Ukr.*, No. 3: 96 (1999) (in Russian).
6. V. T. Grinchenko, V. T. Matsypura, and A. A. Snarskiy, *Vvedenie v Nelineynuyu Dinamiku. Khaos i Fraktaly* [Introduction to Nonlinear Dynamics. Chaos and Fractals] (Kiev: Naukova Dumka: 2005) (in Russian).
7. A. F. Bulat and V. I. Dyrda, *Fraktaly v Geomekhanike* [Fractals in Geomechanics] (Kiev: Naukova Dumka: 2005) (in Russian).
8. V. S. Ivanova, A. S. Balankin, I. Z. Bunin, and A. A. Oksogoyev, *Sinergetika i Fraktaly v Materialovedenii* [Synergetics and Fractals in Materials Science] (Moscow: Nauka: 1994) (in Russian).
9. J. Smrek and A. Y. Grosberg, *Phys. Rev. E*, **92**: 012702 (2015).
10. V. I. Bol'shakov, V. N. Volchuk, and Yu. I. Dubrov, *Dopov. Nac. Akad. Nauk Ukr.*, No. 11: 99 (2008) (in Russian).
11. V. Bolshakov, V. Volchuk, and Yu. Dubrov, *Fractals and Properties of Materials* (Saarbrücken, Deutschland: Lambert Academic Publishing: 2016).
12. V. I. Bol'shakov and V. N. Volchuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **33**, No. 3: 347 (2011) (in Russian).
13. A. Ye. Krivosheyev, *Litye Valki* [Cast Rolls] (Moscow: Metallurgizdat: 1957) (in Russian).
14. V. I. Bol'shakov, V. M. Volchuk, and Yu. I. Dubrov, *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.*, No. 8: 66 (2013) (in Ukrainian).
15. V. I. Bol'shakov, V. N. Volchuk, and Yu. I. Dubrov, *Dopov. Nac. Akad. Nauk Ukr.*, No. 11: 77 (2014) (in Russian).
16. N. A. Budag'yants and V. Ye. Karskiy, *Litye Prokatnye Valki* [Alloy Mill Rolls] (Moscow: Metallurgiya: 1983) (in Russian).
17. T. S. Skoblo, N. M. Vorontsov, S. I. Rudyuk, N. A. Budag'yants, and V. A. Voronina, *Prokatnye Valki iz Vysokouglerodistykh Splavov* [Forming Rolls from High-Carbon Alloys] (Moscow: Metallurgiya: 1994) (in Russian).