

О работах Н.П. Бусленко в области имитационного моделирования¹

В.В. Рыков*, В.А. Ивницкий**, Е.В. Морозов***

*Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, Россия

**Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, Россия

***Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, Россия

Поступила в редколлегию 13.05.2005

Аннотация—Поводом для написания настоящей статьи послужил юбилей Российского Государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина и его кафедры Прикладной математики и компьютерного моделирования, фактическим организатором которой и создателем школы компьютерного моделирования на ней был Николай Пантелеймонович Бусленко. Николай Пантелеймонович руководил кафедрой с 1972 г. до своей смерти в 1977 г. Он привлек для работы на кафедре многих специалистов, в том числе и одного из авторов этой статьи, большинство из которых работают на кафедре до настоящего времени. Он также заложил основы научной школы компьютерного моделирования, которая успешно работает на кафедре до настоящего времени под руководством действующего в настоящее время заведующего кафедрой, проф. М.Г. Сухарева.

1. ВВЕДЕНИЕ

Истоки имитационного моделирования уходят корнями, видимо, в доисторические времена. Наши дети, также как и детеныши животных, получают первоначальные жизненные знания и опыт имитируя поведение родителей.

Математическое моделирование представляет собой описание реальных явлений в виде математических соотношений (функций), поведение которых описывает (имитирует) поведение тех или иных сторон реального явления, или уравнений, решение которых отражает (представляет) поведение этого реального явления.

Имитационное моделирование является мощным методом исследований прикладной математики. Особенно эффективным метод имитационного моделирования оказывается при исследовании стохастических явлений, где он получил название метода статистического моделирования, статистических испытаний, или метода Монте-Карло, по названию знаменитого места сосредоточения игорных домов, и, видимо, не случайно, так как игроки были первыми “специалистами” в области статистического моделирования. Они интуитивно или с помощью простых расчетов прикидывали шансы на выигрыш и затем проверяли их многократным проведением экспериментов. Один из них, по имени шевалье Де Мере, вошел в историю своим обращением к Б. Паскалю, в котором он поставил последнему несколько вопросов, которые, по его мнению, противоречили законам теории вероятностей. Паскаль объяснил ошибку Де Мере (см. Гнеденко [17], Секей [73]).

Современное применение метода имитационного моделирования, как и его название, относится к началу 50-х годов прошлого века и связано, как это, к сожалению, часто случается, с военными применениями. Видимо, это обусловлено тем, что военные в наше время, как, впрочем, и во все времена, были и остаются самыми финансируемыми структурами человеческого сообщества. Естественно, военные применения не очень афишируются, и мы не будем касаться их в настоящем обзоре.

¹ Работа В.В. Рыкова и Е.В. Морозова частично поддержана грантом РФФИ 04-07-90115, а работа Е.В. Морозова также и грантом 04-01-00671.

Широкое распространение метода статистического моделирования в СССР связано с именем Николая Пантелеймоновича Бусленко (в дальнейшем НПБ), хотя, конечно, математическая база этого метода была подготовлена задолго до его работ.

Теоретической основой статистического моделирования являются классические теоремы теории вероятностей: законы больших чисел и его обобщения для случайных процессов — эргодические теоремы, позволяющие строить оценки неизвестных характеристик исследуемого явления, а также центральная предельная теорема, используемая для оценки точности результатов моделирования.

2. МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ МАТЕМАТИКОВ

Вероятно, одной из первых монографий по методу статистического моделирования явилась совместная с Ю.А. Шрейдером работа НПБ [14], в которой были изложены основы и некоторые применения этого метода. Более подробно эти вопросы развиты в справочнике нескольких авторов [15], где подробно изложены основы метода, приведены разнообразные применения, в частности, для вычисления интегралов, при решении задач нейронной физики, при исследовании систем массового обслуживания, в теории передачи информации. Подробно рассмотрены как алгоритмические, так и физические способы получения случайных и псевдослучайных чисел и методы их анализа на случайность и независимость. Несмотря на почти полувековой срок с момента издания этого справочника, изложенный в нем материал не потерял своей значимости и до наших дней.

Большинство применений, содержащихся в этих работах, относится преимущественно к решению различных вычислительных задач математики. Здесь был обобщен накопленный к тому времени опыт применения метода Монте-Карло для решения сложных вычислительных задач, содержащийся в работах И.М. Гельфанда и его коллег, Д.И. Голенко, И.М. Соболя и др. Это же направление развивалось в дальнейшем в работах Ермакова [20] Соболя [74] и др. (см., например, [72]). Популярное изложение основ и идей метода Монте-Карло можно найти в [75].

НПБ, по-видимому, первым осознал и с присущей ему энергией начал “пробивать” применение метода Монте-Карло к исследованиям в мирных целях (не связанным с военными применениями), в частности, для разработки автоматизированных систем управления (АСУ) производственными процессами.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Середина прошлого века в СССР была временем всеобщей “АСУнизации” страны. Создавались и разрабатывались всевозможные АСУ ТП, АСУ П, АСУ Отрасли, АСУ государства и т.п. Возможно, что этот “глобализм” наряду с многими другим подобными “проектами” стал одной из причин развала экономики страны. Однако, он дал мощный толчок развитию методов имитационного моделирования в нашей стране.

Во многих центрах одновременно велись работы по проектированию систем управления различными процессами и объектами с использованием методов имитационного моделирования, что, безусловно, должно было привести и привело к разработке общих подходов к решению возникающих здесь многочисленных проблем.

Одними из самых мощных центров были предприятия, связанные с ВПК: ЦНИИ-1 Министерства обороны, руководителем которого был НПБ, НИИ Автоматической аппаратуры, где он возглавлял один ведущих отделов и многие другие. Имитационное моделирование было одним из средств решения возникающих на этих предприятиях проблем. Однако НПБ сумел использовать средства и потенциал этих предприятий для организации более широких исследований в области имитационного моделирования. Душой этих исследований был НПБ. Многочисленные исследователи группировались вокруг него.

Так, в одном из отраслевых институтов, Центральном научно-исследовательском институте комплексной автоматизации (ЦНИИКА), имитационное моделирование использовалось для анализа металлургического, химического производств, при расчете надежности АЭС. Результаты этих исследований публиковались в технических отчетах, докладывались на конференциях. Аналогичные исследования велись и в других отраслевых институтах. Однако, они требовали теоретического и методологического обобщения. Такое обобщение было сделано НПБ в его монографии “Математическое моделирование производственных процессов на ЦВМ” [6].

В четырех частях этой монографии все этапы математического моделирования представлены применительно к производственным процессам. В первой части приведены общие сведения о моделировании процессов, принципах их формализации и математического описания. Во второй части рассматриваются математические схемы, наиболее часто используемые при формализации производственных процессов. Третья часть книги посвящена различным приемам построения моделирующих алгоритмов. В последней, четвертой части, приводятся примеры комплексного моделирования производственных процессов.

Монография сыграла выдающуюся роль в развитии и популяризации методов имитационного моделирования в СССР.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Имитационное моделирование требует специального математического описания. В процессе построения такого описания обнаружилось, что математическое описание различных сложных систем обладает многими общими признаками. Так возникло и оформилось отдельное направление математического моделирования — теория сложных систем. В следующей своей монографии, вышедшей в 1968 г. (второе издание в 1978 г.), НПБ вводит понятие сложной системы и разрабатывает концепцию их имитационного моделирования.

Попытки дать формальное определение “сложной системы” неизбежно приводят к потере каких-либо сложных систем или их классов. Поэтому само понятие сложной системы, как это обычно принято в математике при определении первичных понятий, вводится на интуитивном уровне, с помощью многочисленных примеров из различных областей человеческой деятельности. Показано разнообразие математических моделей, используемых для описания элементов сложных систем и их взаимодействия. Описаны принципы построения моделирующих алгоритмов и различные типы операторов моделирования. Рассмотрены вопросы оценки точности моделирования и оценки необходимого числа реализаций для достижения заданной точности. Рассмотрены принципы моделирования специальных классов математических моделей. Введено понятие агрегата и агрегативной системы, приведена общая схема описания сложной системы в виде агрегативной системы. Разработаны принципы построения универсальной имитационной модели. В новом свете подробно рассмотрены примеры моделирования некоторых производственных процессов и систем управления.

Вопросы оценки точности результатов моделирования получили в дальнейшем развитие в работах В.А. Ивницкого и его коллег [1], [22] – [25], [76] и др. Ясно, что для функционирования имитационной модели системы нужны исходные данные. Как правило, эти исходные данные определяются с некоторыми погрешностями. В начале 70-х годов прошлого века этот вопрос встал очень остро в связи с тем, что области широкого применения имитационного моделирования стали существенно расширяться и распространяться на все более сложные и ответственные системы. Модели становились весьма детализированными и для них требовались большие объемы исходных данных. Большие объемы исходных данных вместе с присущими им погрешностями поставили перед исследователями проблему оценки точности результатов моделирования систем при неточных исходных данных.

Были выделены ошибки различных типов: исходных данных, датчика случайных чисел, конечности числа реализаций на модели и т.д., разработаны методы расчета их влияния на выходные результаты моделирования и аппарат оценки точности результатов моделирования систем при этих

условиях, а также определения необходимых объемов как исходных данных, так и испытаний на самой имитационной модели для получения желаемой точности моделирования.

Дальнейшее развитие проблематика теории сложных систем получила в следующей монографии НПБ, написанной вместе с его коллегами, – И.Н. Коваленко и В.В. Калашниковым – “Лекции по теории сложных систем”, которая не только явилась следующим шагом в развитии теории сложных систем и их имитационного моделирования, но и стала первым учебником в этом направлении.

5. ЛЕКЦИИ ПО ТЕОРИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Проанализировав многочисленные примеры систем и их математических моделей авторы пришли к необходимости введения нового математического понятия и объекта, который объединял бы такие, казалось бы разнообразные, модели как дифференциальные уравнения, конечные автоматы, динамические системы, системы массового обслуживания (СМО). Таким понятием явилось понятие агрегата и агрегативной системы.

Под *агрегатом* понимается математический объект $(T, X, \Gamma, Y, Z; H, G)$, элементами которого являются: T — фиксированное подмножество действительных чисел, интерпретируемое как время; X, Γ, Y, Z — множества любой природы, интерпретируемые как множества входных, управляющих, выходных сигналов и состояний системы; H, G — операторы переходов и выходов соответственно, которые формируют функции выходных сигналов $y(t)$ и состояний системы $z(t)$ по ее входным сигналам. Такая общая конструкция позволяет с единых позиций описывать различные математические объекты, такие как, например, дифференциальные уравнения, конечные автоматы, динамические системы, системы массового обслуживания. Еще более важным свойством и достоинством агрегата является возможность объединять агрегаты в агрегативные системы. При этом выходные сигналы одного агрегата становятся входными сигналами другого. Такой подход позволяет разнообразные математические модели объединять в единую систему и разработать для них единую методологию имитационного моделирования и анализа. Такая задача была решена в монографии “Лекции по теории сложных систем” [13]. В данной работе показано как различные математические модели, такие как дифференциальные уравнения, линейчатые и кусочно-линейные марковские процессы, СМО и др., представляются в виде агрегатов. Кроме того, предложена методика имитационного моделирования агрегата общего вида на ЭВМ. Подробно представлены процедуры статистического анализа агрегативных систем.

Помимо создания аппарата описания сложных систем в виде агрегатов, в Лекциях серьезное внимание уделено качественному анализу их поведения, в частности, такому важному вопросу, как анализ устойчивости. Особый вклад в развитие этого направления исследований сложных систем принадлежит одному из выдающихся учеников НПБ — В.В. Калашникову (см. [27] – [29]).

Известно, что достижения человечества лишь тогда становятся реальными, когда они могут быть переданы следующим поколениям. Как уже отмечалось выше Лекции (недаром названные так) явились первым в СССР учебником (хотя и не утвержденным Министерством) по теории сложных систем и имитационному моделированию, который, несмотря на новые учебники (см., например, [21]), и до сего дня верой и правдой служит делу просвещения.

6. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В процессе программных реализаций имитационных моделей обнаружилось много общих алгоритмов, которые было целесообразно представить в виде специальных программных модулей и/или макрокоманд. Таким образом, следующим естественным шагом явилась разработка специальных языков и систем имитационного моделирования.

В области программного обеспечения имитационного моделирования на первых порах конкурировали два метода: так называемый “ Δt -метод” и “метод последовательных событий”. Согласно

первому методу, временная ось разбивается точками $t_k = k\Delta$ на достаточно малые интервалы и изменения в процессе, описывающем поведение системы, имитируются в эти моменты времени. Благодаря малости интервалов, соответствующий процесс с дискретным временем оказывается достаточно близким к процессу с непрерывным временем. Этот подход наиболее удобен, когда изменения реального процесса действительно происходят в дискретные моменты времени. Однако в случае, когда моменты изменения состояний системы несоизмеримы, этот метод требует дополнительного обоснования точности приближения и оказывается неэкономным, ввиду того, что часто приходится просматривать неизменные состояния системы.

Поэтому в результате предпочтение получил другой метод, — метод последовательных событий, который состоит в том, что имитируются состояния системы лишь в дискретные случайные моменты времени действительных изменений состояний системы и/или моделирующего его процесса.

Различные попытки в реализации этого направления предпринимались многими авторами и в различных организациях. В частности, при участии и под руководством одного из авторов настоящего обзора в ЦНИИКА была разработана система программных модулей, успешно использовавшаяся при моделировании различных производственных процессов. В дальнейшем аналогичные вопросы разрабатывались в МИНХиГП им. И.М. Губкина. Результаты разработок представлены в технических отчетах и материалах различных конференций.

Следует отметить, что большинство (если не все) из этих работ велись при поддержке НПБ и при участии работавшего непосредственно с ним коллектива. В дальнейшем эти работы были обобщены и представлены в монографии В.Н.Бусленко “Автоматизация имитационного моделирования сложных систем” [4].

Большой вклад в развитие принципов программного обеспечения имитационного моделирования и его автоматизации внесли ученики НПБ, В.В. Калашников и др., а также его “научные внуки” — ученики его учеников (см. [31]–[43]). Эти работы посвящены не только разработке методов и программных средств непосредственно имитационного моделирования сложных агрегативных систем, но и вычислению различных характеристик (функционалов), связанных с процессами в сложных системах, и их оптимизации.

За рубежом идеи имитационного моделирования получили более прагматическое развитие и сразу пошли по пути создания специальных языков имитационного моделирования, таких как JPSS, СИМУЛА, СИМСКРИПТ и др.

7. ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ИДЕЙ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Идеи моделирования сложных систем и методы их анализа, заложенные и развивавшиеся НП, продолжают развиваться его учениками и последователями.

С теоретической точки зрения исследование характеристик сложных систем так или иначе опирается на свойство регенерации описывающих их поведение случайных процессов. Если в поведении процесса удастся обнаружить моменты регенерации, т.е. моменты, в которые процесс “забывает свое прошлое”, то процесс “разбивается” на независимые циклы (части траектории между моментами регенерации) и все стационарные и нестационарные вероятностно-временные характеристики процесса можно выразить через соответствующие характеристики на отдельных периодах регенерации. Широкое применение метод регенеративного моделирования получил при исследовании некоторых коммуникационных сетей [26], [77]. Однако в реальных процессах, протекающих в современных сложных системах, в частности, в телекоммуникационных сетях, классическая регенерация происходит весьма редко (или не наблюдается вовсе). Поэтому одним из важных направлений развития методов имитационного моделирования в целом является обобщение свойства регенерации случайных процессов. Возможны различные пути обобщения понятия регенерации. Самым простым и естественным является замена регенерации марковской регенерацией, которая в дальнейшем получила наименование полурегенерации. Впервые это понятие появилось в работе [67] под названием реге-

нерирующих процессов с несколькими типами точек регенерации. Здесь же впервые были получены предельные теоремы для полурегенерирующих процессов, которые в дальнейшем были расширены и обобщены в других исследованиях.

Другим возможным обобщением является дальнейшее ослабление понятия регенерации. Одно из таких далеко идущих обобщений является метод обновляющих событий (обновлений), развитый в работах А.А. Боровкова [3] и приведший к понятию слабо регенерирующего процесса, который допускает зависимость между двумя соседними циклами регенерации, в то время как длины циклов остаются независимыми.

Затем и независимо от Боровкова было введено более общее но по сути аналогичное понятие, которое получило название регенерации в широком смысле, где допускается зависимость между любым числом циклов регенерации при том, что длины циклов остаются независимыми, [2]. Отметим, что при описании процессов обслуживания регенерация в широком смысле, как правило, может быть сведена к слабой регенерации, так что указанное обобщение в данном контексте является в определенной мере иллюзорным. Обычно явление регенерации связано с попаданием рассматриваемого процесса в некоторое фиксированное состояние, после чего процесс “забывает свое прошлое”. Содержательно слабая регенерация отличается от сильной тем, что когда в развитии процесса происходит некоторое (обновляющее) событие, то процесс “забывает свое прошлое”, однако не сразу, а в течение некоторого периода (обновления). Обновляющее событие может иметь сложную природу, однако существование таких событий позволяет существенно упростить исследование соответствующих процессов.

Метод обновлений был адаптирован в работах одного из авторов статьи и успешно применен для алгоритмического описания и имитационного исследования стохастических процессов в современных телекоммуникационных сетях [52] – [56]. Отметим также, что однозависимость циклов регенерации слабо регенерирующего процесса позволяет привлечь для статистического исследования хорошо развитые методы анализа слабо зависимых величин [19].

Наконец, еще одно направление обобщения понятия регенерации связано с построением “вложенных” моментов регенерации. Вложенные моменты регенерации позволяют представить поведение процесса на отдельном периоде регенерации в виде условно независимых кусков, а затем “собрать” характеристики процесса в целом по наблюдением за поведением этих частей с учетом статистики переходов. Такой подход позволяет независимо имитировать поведение элементов системы на элементарных вложенных периодах регенерации и переходы внутри периодов регенерации и между соседними уровнями и по аналитическим формулам восстанавливать характеристики процесса в целом. Этот подход особенно привлекателен для моделирования сложных иерархических систем. В работах [59] – [61] идеи агрегирования развиты в направлении построения иерархических (вложенных) агрегированных систем.

Другим направлением развития идей НПБ в области имитационного моделирования является разработка методов и программных средств моделирования непрерывно-дискретных систем [18], [57]. В [58] предложены способы ускорения процесса моделирования сложных систем, и в частности, систем массового обслуживания [49] – [50]. Особенности статистического моделирования СМО посвящена монография [48], а дальнейшее развитие идей имитационного моделирования применительно к сложным системам можно найти в [76]. И.Н. Коваленко [45] – [47] разработан аналитико-статистический метод расчета характеристик высокоответственных систем. Существо метода состоит в том, что для исследуемой характеристики находятся двусторонние оценки, каждая из которых зависит от некоторого (интегрального) выражения, а для вычисления последнего строится специальная имитационная модель.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что имитационное моделирование остается одним из наиболее мощных и перспективных средств прикладной математики. К сожалению, его широкое применение требует

привлечения достаточно больших и весьма квалифицированных коллективов исполнителей. К сожалению, в России эти исследования будут, видимо, обречены на неуспех до тех пор пока здесь, как и в бывшем СССР, научные работы будут финансироваться по “остаточному принципу”. На рынке интеллектуального труда Россия способна конкурировать на мировом уровне в тех областях деятельности (науки и творчества), которые требуют индивидуального мастерства (математика, теоретическая физика, балет, индивидуальные виды спорта и т.п.). В тех областях деятельности, которые требуют значительных и долговременных инвестиций, мы обречены на поражение, т.к. ни бывшее, ни, тем более нынешнее, руководство страны не способно ни осознать необходимости, ни решиться на подобные вложения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. А. Александров, В.А. Ивницкий. Оценка точности результатов моделирования при неточной входной информации. *Известия АН СССР. Техническая кибернетика*, № 3, 1978, С. 92–99.
2. С. Асмуссен (S. Asmussen). *Applied Probability and Queues*, New York, Wiley, 1987.
3. А.А. Боровков. *Асимптотические методы в теории массового обслуживания*. М.: “Наука”, 1980, 381 с.
4. В.Н. Бусленко. *Автоматизация имитационного моделирования сложных систем*. М.: “Наука”, 1977, 239 с.
5. Н.П. Бусленко. К теории сложных систем. *Изв. АН СССР. Техн. киберн.*, № 5, 1963.
6. Н.П. Бусленко. *Математическое моделирование производственных процессов на ЦЭВМ*. М.: “Наука”, 1964.
7. Н.П. Бусленко. *Моделирование сложных систем*. М.: “Наука”, 1968. (Второе издание: М.: “Наука”, 1978, 399 с.)
8. Н.П. Бусленко. Об одном классе сложных систем. *Проблемы прикладной математики и механики*, М.: “Наука”, 1971.
9. Н.П. Бусленко. Математическая модель сопряжения элементов в сложных системах. *Электронная техника, сер. 9 (АСУ)*, № 1, 1972.
10. Н.П. Бусленко. Сложные системы и моделирование. *Кибернетика*, № 6, 1976.
11. Н.П. Бусленко, А.Н. Аверкин. О формальном описании связей между элементами сложной системы. *Кибернетика*, Киев, № 6, 1972.
12. Н.П. Бусленко, В.В. Калашников. Об устойчивости функционирования сложных систем. *Кибернетика*, Киев, № 2, 1967.
13. Н.П. Бусленко, В.В. Калашников, И.Н. Коваленко. *Лекции по теории сложных систем*. М.: “Советское радио”, 1973, 440 с.
14. Н.П. Бусленко, Ю.А. Шрейдер. *Метод статистических испытаний (Монте-Карло) и его реализация в цифровых машинах*. М.: “Физматгиз”, 1961.
15. Н.П. Бусленко, Ю.А. Шрейдер. *Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло)* СМБ. М.: “Физматгиз”, 1962, 331 с.
16. Н.П. Бусленко, Ю.А. Шрейдер. *Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) и его реализация на ЭВМ*. М.: “Наука”, 1969.
17. Б.В. Гнеденко. *Курс теории вероятностей*. М.: “Наука”, изд. 6, 1988, 447 с. Дополнение. Очерк истории теории вероятностей.
18. В.М. Глушков, В.В. Гусев, Т.П. Марьянович и др. *Программные средства моделирования непрерывно-дискретных систем*. Киев: “Наукова думка”, 1975.
19. С. Джансон (S Janson) Renewal theory for m-dependent variables, *Annals of Probability*, 1983, pp. 47–57.
20. С.М. Ермаков. *Метод Монте-Карло и смежные вопросы*. М.: “Наука”, 1975, 471 с.

21. С.М. Ермаков, Г.А. Михайлов. *Курс статистического моделирования*. М.: "Наука", 1976, 319 с.
22. В.А. Ивницкий. Об оценке точности результатов моделирования сложных систем с неточной входной информацией при схеме независимых испытаний. *Известия АН СССР. Техническая кибернетика*, № 4, 1974, С. 208–217.
23. В.А. Ивницкий. Об оценке точности результатов моделирования. *Известия АН СССР. Техническая кибернетика*, № 3, 1977 г., С. 191–201.
24. В.А. Ивницкий. Оценка точности результатов моделирования сложных систем для векторного выходного показателя и случайностей разных типов. Труды семинара *Проблемы устойчивости стохастических моделей*, ВНИИСИ ГКНТ и АН СССР, 1982 г., С. 46–61.
25. V.A. Ivnitcki. Accuracy estimation of the results of complex system simulation with vector output and several types of randomness. *Lectures Notes in Mathematics*, "Springer Verlag", № 982, 1983 г., P. 38–59.
26. Д.Л. Иглехарт, Д.С. Шедлер Д.С. *Регенеративное моделирование сетей массового обслуживания*, М.: "Радио и связь", 1984.
27. В.В. Калашников. *Качественный анализ поведения сложных систем методом пробных функций*. М.: "Наука", 1978, 248 с.
28. В.В. Калашников. *Сложные системы и методы их анализа*. М.: "Знание", 1980, 64 с.
29. В.В. Калашников. *Организация моделирования сложных систем*. М.: "Знание", 1982, 64 с.
30. В.В. Калашников. *Topics on Regenerative Processes*, CRC Press, Boca Raton, 1994.
31. В.В. Калашников. Направленные имитационные эксперименты. *Электронная техника, сер. 9, Экономика и системы управления*, N1 (54), 50–53.
32. В.В. Калашников. Organization of Systems Research by Simulation. *Methods and Applications of Measurement and Control*, v.1, Press, 110–111.
33. В.В. Калашников. Qualitative Methods in Queueing Theory and Their Application for the Organizing of Directed Simulation Experiments. *Fundamental of Tele-traffic Theory*, Preprints of the Int. Conference (Moscow, USSR), 209–213.
34. В.В. Калашников. Problems of methodology and technology for systems modelling and simulation. *System analysis and Simulation*, Berlin, Akademie - Verlag, Band 27, 311–313.
35. В.В. Калашников (в соавтстве). *Технология системного моделирования*. М.: Машиностроение, 520 с.
36. В.В. Калашников (в соавтстве). Новая версия агрегативной имитационной системы. Сб. *Теоретические и прикладные вопросы моделирования*, МИНИУ, 5–14.
37. В.В. Калашников, В.И. Лутков. Структура внешнего программного обеспечения агрегативной имитационной системы. *Теория сложных систем и методы их моделирования*, ВНИИСИ, 88–93.
38. В.В. Калашников, В.С. Манусевич, Б.Г. Малофеев. Комплекс программ для оценки длительности переходных режимов стохастических систем. Сб. *Теория сложных систем и методы их моделирования*, ВНИИСИ, 69–76.
39. В.В. Калашников, А.И. Морозов. Программная поддержка экспериментов в моделировании. Построение модели. *Электронная техника, сер. 9, "Экономика и системы управления"*, вып. 3 (76), 59–63.
40. В.В. Калашников, А.И. Морозов. Программная поддержка экспериментов в моделировании. Организация эксперимента. *Электронная техника, сер. 9, "Экономика и системы управления"*, вып. 2 (79), 39–45.
41. В.В. Калашников, А.И. Морозов, В.М. Седунов, Л.Е. Шашков. EXAM: An object-oriented environment for simulation experiment. "Pattern Recognition and Image Analysis", vol. 2, no. 1, 66–76.
42. V.V. Kalashnikov, V.V. Nemchinov. The Organization of the Research Process by Aggregative Simulation System. *Systems Analysis. Modelling. Simulation*, vol. 1, no. 2, 101–111.
43. В.В. Калашников, Б.В. Немчинов, С.Т. Петров. КОМПАС - программный язык для описания агрегативных систем. Сб. *Моделирование дискретных управляющих систем*, УНЦ АН СССР, 44–46.

44. И.Н. Коваленко. О некоторых классах сложных систем. *Изв. АН СССР. Техн. киберн.*, № 6, 1964, №№ 1, 3, 1965.
45. И.Н. Коваленко. Аналитико-статистический метод расчета характеристик высоконадежных систем. *Кибернетика*, № 6, 1976.
46. И.Н. Коваленко. *Исследования по анализу надежности сложных систем*. Киев: “Наукова думка”, 1976, 212 с.
47. И.Н. Коваленко. *Анализ редких событий при оценке эффективности и надежности систем*. М.: “Советское радио”, 1980, 209 с.
48. А.Л. Лившиц, Э.Мальц. *Статистическое моделирование систем массового обслуживания*. М.: “Советское радио”, 1978.
49. И.Ю. Линник. Об улучшении сходимости метода Монте-Карло при вычислении параметров СМО. *Вероятностные методы решения задач мат. физики*, 1971.
50. И.Ю. Линник, П.П. Мироненко. Метод фиктивного шага при статистическом моделировании неполнодоступных систем с отказами. *Изв. АН СССР, Техн. кибернетика*, № 6, 1976.
51. Г. Марковиц, Б. Хауснер, Карр. *СИМСКРИПТ — алгоритмический язык моделирования*. М.: “Советское радио”, 1966.
52. Е.В. Морозов. Wide sense regenerative processes with applications to multi-channel queues and networks. *Acta Appl. Math.*, vol. 34, pp. 189–212.
53. E. Morozov. Tightness in the ergodic analysis of regenerative queueing processes, *Queueing Systems*, vol. 27 (1997), 179–203.
54. E. Morozov Weak regenerative structure of open Jackson queueing networks. *Journal of Mathematical Sciences*, 91 (1998), 2956–2961.
55. E. Morozov, I. Aminova. Steady-state simulation of some weak regenerative networks. *European Transactions on Telecommunications*, 13 (2002), 409–418.
56. E. Morozov. Weak regeneration in modeling of queueing processes. *Queueing Systems*, 46 (2004), 295–315.
57. Ю.Г. Поляк. *Вероятностное моделирование на ЭВМ*. М.: “Советское радио”, 1971.
58. В.М. Рахвальский. Ускорение процесса моделирования при оценке эффективности и надежности сложных систем методом статистических испытаний. *Изв. АН СССР. Техн. киберн.*, № 1, 1966.
59. В.В. Рыков. Регенерирующие процессы с вложенными периодами регенерации и их применение при исследовании приоритетных систем массового обслуживания. *Кибернетика*. № 6 Киев, 1975.
60. В.В. Рыков. Исследование одноканальной системы общего вида методом регенерирующих процессов. I. *Изв. АН СССР. Технич. киберн.* 1983. № 6. С. 13–20.
61. В.В. Рыков. Исследование одноканальной системы общего вида методом регенерирующих процессов. II. Исследование основных процессов на периоде регенерации. *Изв. АН СССР. Технич. киберн.* 1984. N. 1. С. 126–132.
62. V.V. Rykov. Controllable agregative systems and their simulations. *IMACS trans. on comp. sci. - 85*. Amsterdam: North-Holl. 1985.
63. V.V. Rykov. Agregative systems: their modelling and simulation. *Simulation, Gaming, Training and Business Process Reengineering in Operations*. Abstracts of the international conference. Riga, Sept. 19-21, 1996, pp. 38-39.
64. V.V. Rykov. On decomposition of hierarchical computer communication networks. *Proceedings of The International Conference on Distributed Computer Communication Networks*. Pp. 77-85. M.: Inst. for Information Transmission Problems RAS, 1996
65. В.В. Рыков. Два подхода к декомпозиции сложных иерархических систем. Непрерывно взаимодействующие подсистемы. *Автоматика и телемеханика*, № 10, 1997, сс. 91-104.

66. В.В. Рыков. Два подхода к декомпозиции сложных иерархических систем. Агрегативные системы. *Автоматика и телемеханика*, № 12, 1997, сс. 140-149.
67. В.В. Рыков, М.А. Ястребенецкий. О регенерирующих процессах с несколькими типами точек регенерации. *Кибернетика*. № 3, С. 82–86, Киев, 1971.
68. В.В. Рыков, С.Ю. Жолков. Общие регенерирующие процессы в теории А-систем. *Методы прикладной матем. в нефтяной и газовой пром-ти. Труды МИНХиГП им. И.М.Губкина*. Вып. 140, С. 55–76. М.: МИНХиГП, 1978.
69. В.В. Рыков, С.Ю. Жолков. Общие регенерирующие процессы и агрегативные системы. *Теория систем, программирование и исследование операций. Матем. вопр. упр. произв.* Вып. 8, С. 33–48, М.: МГУ, 1979.
70. V.V. Rykov, S.Yu. Jolkoff. Generalized regeneranive processes with embedded regeneranion periods and their applications. *MOS. Ser. Optimization*. vol. 12, (1981), no. 4, pp. 575–591.
71. В.В. Рыков, С.Ю. Жолков. Разложимые регенерирующие процессы в теории массового обслуживания. *Теор. масс. обл. Труды Всесоюзн. шк. - сем.* М.: ВНИИСИ, 1981, С. 103–112.
72. К.К. Сабельфельд. *Методы Монте-Карло в краевых задачах*. Новосибирск.: “Наука” (Сибирское отделение), 1989, 280 с.
73. Г. Секей. *Парадоксы в теории вероятностей и математической статистике*. Пер. с англ. М.: Мир, 1990, 340 с.
74. И.М. Соболев. *Численные методы Монте-Карло*. М.: “Наука”, 1978, 64 с.
75. И.М. Соболев. *Метод Монте-Карло*. М.: “Наука”, 1973.
76. А.С. Шаракшанэ, И. Г.Железнов, В.А.Ивницкий. *Сложные системы*. М.: “Высшая школа”, 1977 г., 248 с.
77. Дж.С. Шедлер (G.S. Shedler) *Regeneration and Networks of Queues*, New York: Springer-Verlag, 1987.