

В. А. БАЖАНОВ

## В. И. ШЕСТАКОВ И К. ШЕННОН: РАЗНЫЕ СУДЬБЫ ТВОРЦОВ ОДНОЙ КРАСИВОЙ ИДЕИ\*

Одновременные открытия в науке не редкость. Достаточно вспомнить Ньютона и Лейбница, Лобачевского и Болиаи, Грассмана и Гамильтона. Редкость, когда судьбы авторов этих открытий складываются одинаково счастливо. Особенно, если один из авторов открытия жил в России XX века. Н. А. Васильев и Я. Лукасевич, И. Е. Орлов и К. Льюис – эти первопроходцы в области неклассической логики (паранепротиворечивая и релевантная логики соответственно) имели различные судьбы<sup>1</sup>. Высказанное утверждение вполне можно распространить на таких пионеров алгебрологической теории релейно-контактных схем, фактически положенной в фундамент современных информационных технологий, как В. И. Шестаков и К. Шеннон.

Недавно мир простился со всемирно известным профессором Клодом Шенноном (родился он в 1916 г.), о кончине которого известила и «New York Times»<sup>2</sup>; в 1987 г. в возрасте 80 лет из жизни незаметно ушел кандидат физико-математических наук Виктор Иванович Шестаков<sup>3</sup>, о котором мало знают даже историки логики<sup>4</sup>. Почему так распорядилась история? Почему В. И. Шестакову не воздали вовремя, ведь значение его открытия было осознанно фактически сразу же?

Известно, что В. И. Шестаков высказал идею и сформулировал теорию релейно-контактных схем раньше Шеннона (по свидетельству С. А. Яновской) – в 1934–1935 гг.<sup>5</sup>, хотя диссертации (соответственно кандидатскую и магистерскую) оба защитили в 1938 г.<sup>6</sup> Впрочем, как отмечал сам Шестаков, «еще в 1910 г. П. Эренфест в рецензии на книгу «Алгебра логики» Л. Кутюра (Одесса: *Mathesis*, 1909)<sup>7</sup> предугадывал возможность создания «алгебры распределительных схем» и

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 00-06-80149) и РГНФ (грант 03-03-00350).

Автор считает своим долгом отметить, что он обязан Л. И. Волгину осознанием значимости идей В. И. Шестакова для развития логики.

<sup>1</sup> См.: *Бажанов В. А.* Николай Александрович Васильев (1880-1940). М.: Наука, 1988; *Бажанов В. А.* Ученый и «век-волкодав». Судьба И. Е. Орлова в логике, философии, науке // *Вопросы философии*. 2001. № 11. С. 125–135.

<sup>2</sup> *Johnson, G.* Claude Shannon, Mathematician, Dies at 84 // *New York Times*. 2001, February, 27.

<sup>3</sup> См.: *Бирюков Б. В.* «Свет не вне меня, а во мне...» // *Вейль Г.* Математическое мышление. М.: Наука, 1987. С. 339.

<sup>4</sup> См., например: *Anellis, I.* John Vincent Atanasoff – His Place in the History of Computer Logic and Technology // *Modern Logic*. 1997. N 1. P. 10.

<sup>5</sup> См. также: *Добрушин Р. Л., Лупанов О. Б.* Примечания // Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М., 1963. С. 9; *Гастев Ю. А., Медведев Ю. Т.* Некоторые вопросы теории электрических систем // *История отечественной математики*. Киев: Наукова думка, 1970. Т. 4. Кн. 2. С. 443.

<sup>6</sup> М. Г. Гаазе-Рапопорт в своей статье «О становлении кибернетики в СССР» (см.: *Очерки истории информатики в России*. Новосибирск: ОИГТМ СО РАН, 1998. С. 225–256) утверждает, что В. И. Шестаков подготовил рукопись «Алгебра релейных схем» в январе 1935 г. Этот же факт упоминает В. А. Успенский (см.: *Успенский В. А.* Фрагменты воспоминаний // *Очерки истории информатики в России*. Новосибирск: ОИГТМ СО РАН, 1998. С. 121–136).

<sup>7</sup> *Эренфест П.* Рец. на кн. Л. Кутюра «Алгебра логики» (Одесса, *Mathesis*, 1909) // *ЖРФХО*. Физ. отд. 1910. Т. 42. Отд. 2. Вып. 10. С. 382–387.



В. И. Шестаков. Фото относится примерно к 1940 г. Публикуется впервые.



К. Шеннон. Конец 1930-х гг.

возможность применения для конструирования и упрощения «распределительных схем» аппарата алгебры Буля»<sup>8</sup>. Так, П. Эрэнфест размышлял о том, что «не встречаются ли в физике или технике [...] сложные системы посылок 9. Мне думается, что на этот вопрос следует ответить утвердительно. Пример: пусть имеется проект схемы проводов автоматической телефонной станции. Нужно определить: 1) будет ли она правильно функционировать при любой комбинации, могущей встретиться в ходе деятельности станции; 2) не содержит ли она излишних усложнений.

Каждая такая комбинация является посылкой, каждый маленький коммутатор есть логическое «или – или», воплощенное в эбоните и латуни; все вместе – система чисто качественных (в сети слабого тока именно не количественных) «посылок», ничего не оставляющая желать в отношении сложности и запутанности.

Следует ли при решении этих вопросов навсегда удовлетвориться [...] способом пробова на графике? Правда ли, что, несмотря на существование уже разработанной «алгебры логики», своего рода «алгебра распределительных схем» должна считаться утопией?»<sup>10</sup>

Аналогичные идеи, сформулированные, впрочем, существенно менее определенно и детально, нежели позже у Шестакова или Шеннона, высказывали Н. М. Герсеванов в 1923 г. и японский ученый А. Накасима в 1936 г.<sup>11</sup> Таким образом, идея носилась в воздухе, но сформулировать ее в явном виде смогли только В.

<sup>8</sup> Шестаков В. И. Алгебра двухполюсных схем, построенных исключительно из двухполюсников (алгебра А-схем) // Журнал технической физики. 1941. Т. 11. № 6. С. 532.

<sup>9</sup> Имеются в виду формулы булевых алгебр, действия с которыми и упрощения которых описаны Л. Кутюра.

<sup>10</sup> Эрэнфест. Рец. на кн. Л. Кутюра «Алгебра логики»... С. 386.

<sup>11</sup> См.: Поваров Г. Н. Предисловие редактора перевода // Беркли Э. Символическая логика и разумные машины. М.: ИЛ., 1961. С. 14; Nakashima, A. The Theory of Relay Circuit Composition // Nippon Electr. Commun. Eng. 1936. N 3. P. 197–226.

И. Шестаков и К. Шеннон<sup>12</sup>. «Кажется невероятным, – замечает Д. А. Поспелов, – что обнаруживается столь тесная связь между порождением человеческого духа, восходящим к Аристотелю, и вполне земными и привычными для любого инженера схемами, выполненными на реле»<sup>13</sup>.

## НЕТ ПРОРОКОВ В СВОЕМ ОТЕЧЕСТВЕ

После защиты диссертации в Научно-исследовательском институте физики МГУ В. И. Шестаков работал в должности доцента на физическом факультете МГУ, преимущественно вел физический практикум. Звание доцента он получил в 1941 г.; старшего научного сотрудника – в 1950 г. Его коллеги не догадывались о том, что рядом с ними скромно трудится человек, фактически ставший *классиком науки* уже при жизни (хотя сведений о нем нет даже в отечественных биографических справочниках математиков). Его часто забывали упоминать даже тогда, когда речь шла о примечаниях редакторов зарубежных книг или их переводчиков, относящихся к отечественным приоритетам<sup>14</sup>. Сегодня, кажется, Шестаков почти полностью забыт, и уж тем более его имя не упоминается вместе и наравне с именем Шеннона.

Шестаков всю жизнь тщательно и упорно развивал идею, которая озарила его в 1930-е гг.

Эта идея была связана с проблемой синтеза управляющих систем. Техническая сторона этой проблемы – конструирование тех или иных устройств – требовала серьезных математических оснований. Этой математической стороне проблемы, собственно, и посвятил свои работы В. И. Шестаков.

В. И. Шестаков открыл логико-алгебраическую модель электрических двухполюсников (позже и трех- и четырехполюсников) с последовательно-параллельными соединениями двухполюсных схемных элементов  $E_i = E(w_i)$  (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности и др.), сопротивления которых могут принимать любые положительные значения на оси действительных чисел; на двухэлементном множестве  $\{0, \infty\}$  эта модель вырождается в двужначную булеву алгебру логики.

Базовыми унарной и бинарной операциями в ЛА-модели Шестакова (названной так в работе Волгина, 2001 г.) логикой исчисления иммитансов  $w$  (импедансов  $z$  или

<sup>12</sup> Б. В. Бирюков в письме от 17 февраля 2002 г. автору статьи высказал предположение, что в начале 1930-х гг. Дж. Биркгоф приезжал в Москву и от В. И. Гливенко услышал об открытии В. И. Шестакова, но оно еще не было опубликовано. Биркгоф якобы поделился идеей со своим учеником и коллегой К. Шенноном, который реализовал ее не для проводимостей (что было бы естественно), а непроводимостей релейных схем. Пока это предположение ни в одном из своих компонентов (посещение Дж. Биркгофом Москвы в первой половине 1930 гг., знакомство с В. И. Гливенко, тесное сотрудничество Биркгофа с Шенноном) подтвердить не удалось (сообщения Ч. Даффи и ближайшего коллеги и друга семьи Дж. и Г. Биркгофов К. Шеннона Дж. Макки В. А. Бажанову от 2 апреля 2002 г.; анализ научных биографий, воспоминаний, баз данных, относящихся к Дж. и Г. Биркгофам, в Интернете; см. также: *Веблен О.* Джордж Девид Биркгоф (1884–1944) // Биркгоф Дж. Д. Природа, влияние и значение теории относительности. Ижевск, 2001, С. 164–174).

Еще ранее Б. В. Бирюков в статье «Die Antizipation nichtklassischer Ideen durch russische Logiker Ende des 19. und Anfang 20. Jahrhunderts», опубликованной в «Zwischen traditioneller und moderner Logik. Nichtklassische Ansätze». Paderborn. Mentis, 2001. S. 218–238, писал, ссылаясь на воспоминания С. А. Яновской, об этом же факте, но речь шла только о «неком американце», который якобы сообщил идею К. Шеннону. Полагаю, что последующая деятельность и поистине гениальные работы К. Шеннона по теории информации, кибернетике и т.д. делают такого рода предположения излишними, да и неправдоподобными.

<sup>13</sup> *Поспелов Д. А.* Фантазия или наука. На пути к искусственному интеллекту. М.: Наука, 1982. С. 73.

<sup>14</sup> См., например: *Субье-Ками А.* Двоичная техника и обработка информации. М.: Мир, 1964. С. 9.



В. И. Шестаков в учебной аудитории. Начало 1950-х гг. Публикуется впервые.

адмитансов  $y = 1/z = \bar{y}$ ) являются мультипликативная (дуальная) инверсия  $\bar{w} = w^{-1}$ ,  $w$  – конъюнкция (гармоническое среднее) и  $w$  – дизъюнкция (арифметическое сложение):

$$\Lambda(w_1, w_2) = w_1 \| w_2 = (w_1^{-1} + w_2^{-1})^{-1} = w_1 w_2 / (w_1 + w_2), \quad \Lambda(w_1, w_2) = w_1 + w_2.$$

В  $w$ -логике имеет место субдистрибутивный и супрадистрибутивный законы<sup>15</sup>:

$$w_0 + \|(w_1 + w_2) \leq (w_0 \| w_1) + (w_0 \| w_2),$$

$$w_0 + (w_1 \| w_2) \geq (w_0 + w_1) \| (w_0 + w_2),$$

преобразования (законы) де Моргана:

$$\overline{w_1 \| w_2} = \bar{w}_1 + \bar{w}_2, \quad \overline{w_1 + w_2} = \bar{w}_1 \| \bar{w}_2. \text{ и др.}$$

Здесь символы конкатенации « $\|$ » и А-сложения « $+$ » одновременно являются и символами топологических операций параллельного и последовательного соединения схемных элементов  $E_i = E(w_i)$ , где  $w_i$  есть сопротивление или проводимость элемента  $E_i$  (свойство изоморфизма топологической и логико-алгебраической моделей).

<sup>15</sup> См.: Волгин Л. И. Логика исчисления иммитансов многоэлементных электрических двухполюсников. Ульяновск: УлГТУ, 1998; Волгин Л. И. Определение сопротивлений и проводимостей двухполюсников логико-алгебраическим методом // Электричество. 1998. № 7. С. 64–69; Волгин Л. И. Субдистрибутивный и супрадистрибутивный законы логики исчисления иммитансов электрических двухполюсников // Электричество. 2001. № 2. С. 66–67.



В. И. Шестаков. Фото относится к началу 1970-х гг. Публикуется впервые.



К. Шеннон. Конец 1960-х гг.

На двухэлементном множестве  $\{0, \infty\}$  логика Шестакова вырождается в двухзначную булеву алгебру логики<sup>16</sup>.

Таким образом, В. И. Шестаков – первооткрыватель континуальной логики и ее применения (а следовательно, и булевой алгебры логики) в электротехнике, на языке которой могут быть представлены (смоделированы) неэлектрические объекты *любой* физической природы. В указанном смысле он – первооткрыватель применения логики в самых различных областях техники.

Он также и первооткрыватель совмещенных континуальных логико-алгебраических (параметрических) и топологических (структурных, схемных) моделей. Он предпринял оригинальные попытки сравнения логических систем и разработки принципиальных основ действия «счетных вычислительных машин».

В начале 1950-х гг. группа советских математиков и В. И. Шестаков начинают заниматься проблемами функциональной разделимости и неповторных суперпозиций. Эти проблемы вышли на первый план в ходе исследования мостиковых релейно-контактных схем (мостиковыми называются схемы, для получения которых недостаточно лишь параллельных и последовательных соединений, моделируемых конъюнкциями и дизъюнкциями). Принято считать, что «отправной точкой их исследования послужило высказанное на семинаре по математической логике в МГУ замечание П. С. Новикова об отсутствии математического доказательства того факта, подсказанного многолетним опытом и неоднократно упоминавшегося В. И. Шестаковым в его докладах, что уже простейшую мостиковую схему соот-

<sup>16</sup> О дальнейшем развитии w-логики см. работы Волгина.

ветствующей функции

$$M(a, b, c, d, e) = ad \vee ace \vee bcd \vee be$$

нельзя так представить через функции от двух аргументов, чтобы в выражении, служащем ее представлением, ни одна из букв не встречалась более одного раза»<sup>17</sup>. Невозможность такого представления позже была доказана А. В. Кузнецовым.

Проблема упрощения средств представления функций алгебры логики была поставлена В. И. Шестаковым и П. С. Новиковым еще ранее – в 1950 г.

В. И. Шестаков также предложил векторно-алгебраический метод синтеза автономных релейно-контактных схем, который был им обобщен и на неавтономные схемы<sup>18</sup>. В теории конечных автоматов В. И. Шестаков разрабатывал методы получения по уравнениям, схеме какого-либо автомата, отвечающего им процесса (анализ системы) и обратно: уравнений по характеру процесса (синтез системы)<sup>19</sup>.

В начале 1950-х гг., на заре компьютерной эры, создавались лишь первые образцы «счетных (цифровых) вычислительных машин»<sup>20</sup>. Поэтому работы В. И. Шестакова прежде всего касались теоретического программирования и анализа принципиальных возможностей вычислительной техники<sup>21</sup>.

## Дар Шеннона

Шеннон легко и часто изменял тематику своих исследований и научных увлечений, всюду ронял зерна новых идей, и, как может показаться при взгляде со стороны на его творчество, впоследствии терял к ним интерес, оставляя их детальную разработку последователям.

Шеннон высказал идею о передаче информации путем репликации ДНК (в своей диссертации на степень доктора философии в 1940 г.). Он понял, что компьютер не только большой и сложный арифмометр, и сконструировал «дифференциальный анализатор» – аналоговый компьютер, построенный на механическом принципе. Позже он пытался на аналоговом компьютере смоделировать выигрышную стратегию игры в рулетку, заложил основы теории информации, создал простейшие кибернетические устройства, моделировал шахматную игру компьютерными средствами, оставил след в криптографии, занимался анализом фондового рынка с использованием теории вероятностей. Он был блистательным мыслителем, гением, и это качество проявлялось тем ярче, чем сложнее перед ним стояла задача.

Сравнение трудов Шеннона и Шестакова показывает, что для Шеннона характерна значительно более широкая стратегия научного поиска, а для Шестакова более глубокая и основательная проработка проблемы логико-алгебраических

<sup>17</sup> Яновская. Математическая логика и основания математики // Математика в СССР за сорок лет. М.: Физматгиз, 1959. Т. 1. С. 13–120.

<sup>18</sup> См.: Ляпунов А. А. Математические исследования, связанные с эксплуатацией электронных вычислительных машин // Математика в СССР за сорок лет. М.: Физматгиз, 1959. Т. 1. С. 872.

<sup>19</sup> Яновская. Математическая логика... С. 114–115.

<sup>20</sup> См.: Дашевский Л. Н., Шкабара Е. А. Как это начиналось. М., 1981; Королев Л. Н. Развитие ЭВМ и их математического обеспечения. М.: Знание, 1984.; Малиновский Б. Н. История вычислительной техники в лицах. Киев: КИТ, 1995.

<sup>21</sup> См.: Шура-Бура М. Р. Программирование // Математика в СССР за сорок лет. М.: Физматгиз, 1959. Т. 1. С. 879–886.

моделей электрических цепей и сопряженных с ней вопросов. Характерная особенность публикаций В. И. Шестакова и К. Шеннона, равно как, например, и А. Эйнштейна – отсутствие соавторов в их пионерских работах, что вообще довольно типично для такого рода работ, которые можно оценить как прорыв к радикально новым направлениям научных исследований. Идея возникает в голове одного человека, а большинство принимает за истину с течением времени общезначимое мнение (часто забывая имя автора идеи, особенно если она претендует на «очевидность»).

Думается, что научная судьба Шестакова, отличная от судьбы Шеннона в смысле международного признания и оценки, может быть объяснена периферийным положением русскоязычных изданий в массиве мировой научно-технической литературы, невозможностью широкого «паблисити» оригинальных идей русского ученого, вынужденного, кстати, маскировать открытую им логическую модель электрических цепей алгебраической терминологией ввиду крайне негативного отношения носителей коммунистической идеологии 1920 – середины 1950-х гг. к формальной логике, считавшейся ими «метафизической» по своему духу и тем самым противостоящей истинной душе марксизма – диалектике.

Впрочем, В. И. Шестаков работал в атмосфере феномена идеологизированной науки и был не свободен от тех или иных ее проявлений. Так, по воспоминаниям А. Кольмана (фактически игравшего роль Лысенко в советской математике, репрессированного, а затем эмигрировавшего и раскаявшегося) после одного из первых в СССР публичных «положительных» докладов о кибернетике «никто другой, как инженер Шестаков, прославившийся моделированием случайных процессов логических умозаключений при помощи электрических сетей, весьма резко стал опровергать кибернетику как “лженауку”. Он повторял в ее адрес измышления невинных по части точных наук наших “мудролюбов”. Как известный мольеровский герой, не знавший, что он говорит прозой Шестаков не знал, что он сам и есть кибернетик!»<sup>22</sup>.

\* \* \*

Осознание важности работ Шестакова в его родном Отечестве в силу ряда причин не состоялось вовремя. Между тем восстановить приоритеты, отметить заслуги Виктора Ивановича Шестакова (1907–1987), – долг последующих поколений ученых, осознающих оригинальность, глубину и перспективность его идей.

---

<sup>22</sup> Кольман А. Мы не должны были так жить. N. Y.: Chalidze, 1982. С. 306. «Еще в октябре 1956 года, на совещании АН по автоматике, – вспоминает А. Кольман, – академик Колмогоров высказался о кибернетике отрицательно. И только в апреле 1957 года, на заседании Московского математического общества, он сделал доклад, в котором заявил, что его прежнее выступление против кибернетики объясняется тем, что он недостаточно знал ее, но теперь, ознакомившись с ней ближе, он решительно признал свою бывшую позицию ошибочной». Н. М. Нагорный летом 1987 г. рассказывал автору статьи, что А. Н. Колмогоров ревностно относился к Н. Винеру и не любил его, поскольку считал, что какие-то результаты, полученные именно им, Колмогоровым, первым, незаслуженно приписываются Винеру. Поэтому поначалу и кибернетика Колмогоровым была воспринята в штыки. Эта экспертная оценка выдающегося математика и послужила своего рода катализатором антикибернетической кампании в СССР. Затем, однако, Колмогоров объективно оценил новую теорию и постарался своим авторитетом восстановить статус кибернетики как новаторской науки.

\* \* \*

Известно 26 опубликованных научных работ В. И. Шестакова. Ниже мы публикуем библиографию его трудов:

**1938**

Некоторые математические методы конструирования и упрощения двухполюсных электрических схем класса А. Дисс... канд. физ.-мат. наук. М.: НИИФ МГУ, 1938.

**1941**

Алгебра двухполюсных схем, построенных исключительно из двухполюсников (алгебра А-схем) // Автоматика и телемеханика. 1941а, № 2. С. 15–24.

Алгебра двухполюсных схем, построенных исключительно из двухполюсников (алгебра А-схем) // Журнал технической физики. 1941б. Т. 11. № 6. С. 532–549.

**1944**

Об одном символическом исчислении, применимом к теории релейных контактных схем // Ученые Записки МГУ. Вып. 23. Кн. 5. 1944. С. 45–48.

**1946**

Представления характеристических функций предложений посредством выражений, реализуемых релейно-контактными схемами // Известия АН СССР. Сер. Математическая. 1946. Т. 10. № 6. С. 529–554.

**1952**

Решение математических задач на автоматических цифровых машинах. Программирование для быстродействующих электронных счетных машин. М.: Изд-во АН СССР, 1952. – 327 с. (с Люстерником Л. А., Абрамовым А. А., Шура-Бура М. Р.).

**1953**

Моделирование операций исчисления предложений посредством простейших четырехполюсных схем // Вычислительная математика и вычислительная техника. М.: Изд-во АН СССР. 1953 С. 56–89.

**1954**

Алгебраический метод анализа систем двухпозиционных реле // Автоматика и телемеханика. 1954. № 2. С. 107–123; № 4. С. 310–324.

Синтез электронных вычислительных и управляющих схем / Редактор В. И. Шестаков. М.: ИЛ, 1954.–359 с.

О преобразовании моноциклической последовательности в возвратную // ДАН СССР. 1954. Т. 98. С. 541–544.

Алгебраический метод синтеза многотактных релейных схем // ДАН СССР. 1954. Т. 99. С. 987–990.



**1956**

Векторно-алгебраический метод анализа и синтеза многотактных теорий релейных систем // Труды 3-го Всесоюзного математического съезда. Т. . М., 1956. С. 190–191.

Математическая проблематика структурной теории релейных схем // Труды 3-го Всесоюзного математического съезда. М., 1956. Т. 2. С. 150–151 (с Гавриловым М. А., Поваровым Г. Н., Рогинским В. Н., Харкевичем А. Д. ).

**1957**

Алгебраический метод синтеза многотактных систем г-позиционных реле // ДАН СССР. 1957. Т. 112. С. 62–65.

**1958**

Перфокарточный метод синтеза многотактных релейных схем // Автоматика и телемеханика. 1958. Т. 19. № 6. С. 592–605.

Математическая логика и автоматика // Математика в школе. 1958. № 6. С. 9–20; 1959. № 1. С. 19–39.

**1959**

Моделирование операций исчисления высказываний посредством релейно-контактных схем // Логические исследования. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 315–351.

Перфокарточный метод синтеза многотактных систем пропозициональных реле // Автоматика и телемеханика. 1959. Т. 20. № 11. С. 1496–1506.

**1960**

О двойной арифметической интерпретации трехзначного исчисления в высказывании, используемой при моделировании этого исчисления посредством релейно-коммутаторных схем // Применение логики в науке и технике. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 341–376.

К вопросу о синтезе смешанных релейных контактных схем класса П // Известия вузов СССР. Радиофизика. 1960. Т. 3. № 3. С. 526–533.

**1962**

Синтез одноконтурного сумматора двоичных чисел, построенного из двухпозиционных коммутаторов и поляризованных реле // Вопросы теории математических машин. М., 1962. Т. 2. С. 232–239.

**1964**

О взаимоотношении некоторых трехзначных логических исчислений // Успехи математических наук. 1964. Т. 19. Вып. 2 (116).

Логические машины // Философская энциклопедия, М.: Сов. энциклопедия. 1964. Т. 3. С. 232–234 (с Бирюковым Б., Калужниным Л.).

**1965**

Алгебра коммутаторных схем (алгебра четырехполюсников, соединенных двухполюсными коммутаторами) // Синтез релейных схем. Труды международного

---

симпозиума по теории релейных устройств и конечных автоматов (ИФАК). М.: Наука, 1965. С. 87–96.

**1967**

О некоторых расширениях исчислений Бочвара и Клини до функционально полных трехзначных исчислений // Научно-техническая информация. Сер. 2. 1967. № 12. С. 12–17.

**1971**

Об одном фрагменте исчисления Д. А. Бочвара // Информационные вопросы семиотики, лингвистики и автоматического перевода. М.: ВИНТИ, 1971. Вып. 1.