

УДК 519.711

Клод Элвуд Шеннон и 80-летие открытия логической теории дискретных вычислительных и управляющих устройств

Левин В. И.

Актуальность. В 2018 году исполнилось 80 лет с момента открытия логической теории дискретных вычислительных и управляющих устройств. Это открытие, совершенное тремя выдающимися учеными – А. Накашимой (Япония), К.Э. Шенноном (США) и В.И. Шестаковым (СССР), имело огромное значение для всей науки. Оно открыло дорогу новой научной дисциплине – кибернетике, составив ее теоретическую базу. Поэтому освоение фундаментальных результатов названных первооткрывателей остается актуальной задачей. **Цель статьи** – дать подробный обзор версии логической теории дискретных устройств и версии математической теории связи, предложенных К.Э. Шенноном, включая историю их открытия, методологию, результаты и применения в различных областях науки и техники. **Метод.** Для достижения поставленной цели используется: 1) изучение работ ученого по первоисточникам и научно-исторической литературе, 2) изучение биографии ученого по воспоминаниям современников и научно-биографической литературе, 3) сравнение работ ученого с работами других ученых в данной области. **Результат.** Установлено, что К.Э. Шеннон был одним из первых, кто показал возможность математического моделирования дискретных вычислительных и управляющих устройств с помощью булевой алгебры логики. Это позволило разработать формализованные методы анализа, синтеза и проектирования таких устройств, позволяющие создавать устройства большой сложности. **Новизна.** Установлено, что К.Э. Шеннон является одним из авторов открытия, согласно которому булева алгебра логики является адекватным математическим аппаратом для представления схем дискретных устройств. Это открытие было опубликовано им в июне 1938 года. Оно позволило в дальнейшем разработать конструктивные методы анализа, синтеза и проектирования схем дискретных вычислительных и управляющих устройств. Ученый также одним из первых предложил метод изучения не параллельно-последовательных (т.е. мостиковых) схем и метод разложения сложных схем на подсхемы для преодоления «проклятия размерности». Он также является первооткрывателем математической теории связи и теории информации.

Ключевые слова: логическая теория, дискретные устройства, булева алгебра, энтропия, информация, шум, система связи.

1. Введение

Когда известный ныне ученый Тренгард Мур впервые увидел Шеннона, он был аспирантом, сдававшим устный экзамен для получения степени доктора философии в Массачусетском технологическом институте (МТИ) [1]. В те времена особенно трудным был письменный экзамен, – вспоминает Мур, – потому было важно сдать устный. Шеннон согласился войти в экзаменационную комиссию по Муру, поскольку Мур был аспирантом Сэма Колдуэлла – консультанта Шеннона по его магистерской диссертации. Вопросы Шеннона резко от-

Библиографическая ссылка на статью:

Левин В. И. Клод Элвуд Шеннон и 80-летие открытия логической теории дискретных вычислительных и управляющих устройств // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 1. С. 1–32. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10101

Reference for citation:

Levin V. I. Claude Elwood Shannon and 80th Anniversary of Discovery of Logical Theory of Discrete Computing and Control Devices. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 1, pp. 1–32. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10101 (in Russian).

личались от вопросов, задававшихся другими. Они концентрировались на математических идеях, которые вполне могли выходить за пределы обсуждаемых тем. По словам Мура, Шеннон был «озабочен путями мышления». Он интересовался больше мышлением Мура, тем, понимает ли он фундаментальные математические концепции, пусть даже находящиеся за пределами его исследования. Шеннон чувствовал, что тот, кто действительно понимает идеи, может воссоздать их перед другими. К счастью, Мур понимал. Он вспоминает, что судьба других аспирантов оказалась иной – несмотря на совершенство своей работы, они не могли ответить на вопросы Шеннона, и выяснялось, что человек просто заучил концепцию.



Клод Шеннон,
около 1946 г.

Наиболее популярные и революционные свои работы Шеннон сделал очень рано. Многие эксперты, включая профессора МТИ, его коллегу Роберта Фано, считают, что два его важнейших вклада в науку – магистерская диссертация по переключениям 1938 г. и революционная статья по теории связи 1948 г. [2]. Его магистерская диссертация 1938 г., развивающая метод использования булевой логики для представления схем, и его статья 1948 г. по теории связи определили область и революционный метод, с помощью которого мы обозреваем мир. Основа этих двух работ и большинства других его работ – идея, что математические концепции можно использовать для создания структур и понимания чего угодно.

Большую часть своих исследований Шеннон сосредотачивал на темах, которые максимально влияли на научное сообщество. Неудивительно, что его, как инициатора создания области науки «теория информации», даже провозгласили «отцом дискретной эры» [3]. Его стиль работы характеризовался большой независимостью, а его результаты были весьма уникальны. Вместе с тем, области науки, в которых он работал, в большой мере определялись влиянием внешних факторов. Точнее говоря, каждая из областей его научной деятельности – теория переключений, генетика, теория информации и криптография –

были подсказаны окружением, в котором Шеннон находился в это время и специфическими интересами лиц, советами которых он пользовался.

Наиболее интересным и ярким примером влияния среды на выбор темы его исследования является его работа «Алгебра теоретической генетики», представленная в 1940 г. на степень доктора философии в МТИ. Однако эта работа не привлекла к себе такого внимания, как другие его работы. Тем не менее, вклад в науку, продемонстрированный им в этой работе по генетике, был по духу похож на его вклад в работах по теории переключательных схем и теории информации, влияние которых на науку было огромным. Надо заметить, что Шеннон не делал ничего, чтобы продвинуть свои «непопулярные» работы по генетике, равно как и мало замеченные работы по криптографии. В результате эти работы не были приняты обществом и не оказали на него заметного влияния. Хотя, как уже говорилось, на выбор области исследований Шеннона большое влияние оказывало его окружение, его личная роль в исследовании была совершенно независимой и решающей. Это было связано с тем, что он работал с математическими теориями, способными представлять системы из различных областей.

Суть стиля научной работы Шеннона заключалась в его стремлении (и способности) сначала сформулировать решаемую проблему в наиболее общей, абстрактной форме, а затем перейти от нее к эквивалентной, но одновременно простейшей форме, в которой выброшены несущественные детали и потому закономерности изучаемого объекта становятся ясно видимыми. Именно этим подходом объясняется способность Шеннона взять проблему и применить к ней математическую теорию, революционизируя в результате сам способ рассмотрения данной области. Таков вклад Шеннона во все области, в которых он работал, но в первую очередь – в теорию переключений и теорию информации. Этот его вклад оказал большое влияние на современное общество.

Предлагаемая статья представляет собой обзор основных работ К.Э. Шеннона по логической теории дискретных вычислительных и управляющих устройств [1-4] и математической теории связи [11, 14], рассматриваемых на фоне работ в этой области других ученых [3, 4, 7-9, 32, 33, 39]. При этом использованы работы [3, 4, 7], посвященные истории развития логической теории дискретных устройств и теории связи. Кроме того, использованы предшествующие работы автора, посвященные истории и анализу результатов К.Э. Шеннона [40, 41]. Настоящая работа отличается от них значительно большим объемом и включает их в переработанном виде как составные части.

2. Работы по теории информации

Аспрей в своей работе [4] представил несколько интересных теорий, касающихся эволюции понятий информации и теории связи. Он рассмотрел корни науки об информации в XIX – начале XX веков, содержащиеся в математической логике, физике, психологии, электротехнике, сфокусировав внимание на работах Уоррена Мак-Каллоха, Уолтера Питтса, Клода Шеннона, Алана Тьюринга, Джона фон Неймана и Норберта Винера и связав эти различные ис-

следования в единую научную дисциплину. Аспрей выделяет 5 областей, в которых были введены научные основы понятия информации:

1) работы Джеймса Клерка Максвелла, Людвиг Больцмана и Лео Сцилларда по термодинамике и статистической механике, особенно связанные с понятием энтропии;

2) исследования в области связи и управления, которые появились в результате развития телеграфии, радио и телевидения;

3) работы XIX века по физиологии нервной системы и работы XX века по гомеостазису и внутреннему регулированию живых организмов;

4) развитие функциональных и поведенческих теорий мозга в психологии, приведшее к взгляду на мозг как на процессор, перерабатывающий информацию, и к потребности в экспериментальной проверке теорий мозга путем наблюдения за поведением человека;

5) развитие теории рекурсивных функций в математической логике как формальной, математической характеристики вычислительного процесса человека.

Аспрей характеризует Клода Шеннона, Норберта Винера, Уоррена МакКаллоха, Уолтера Питтса, Алана Тьюринга и Джона фон Неймана как лидеров движения, которое происходило во время и после 2-й Мировой войны с целью унификации определений теории информации и обработки информации, которая выросла на этой почве.

До 1940 г. не существовало сколь-нибудь унифицированной теории связи. К. Шеннон был первым, кто предложил такую теорию. В письме к В. Бушу 16.02.1939 г. он впервые представил универсальную двухступенчатую схему любой системы связи (ступень 1 – передатчик, ступень 2 – приемник). Из этого можно видеть, что уже тогда – менее чем через год после защиты его магистерской диссертации «Символический анализ релейных и переключательных схем» и параллельно с выполнением его докторской диссертации «Алгебра теоретической генетики» – Шеннон уже начал работу по структуризации процесса передачи данных, чтобы найти корень проблемы связи. Позднее, в 1948 г. в своей основополагающей работе «Математическая теория связи» он предложил более полную совокупность частей любой системы связи: 1) источник информации; 2) передатчик; 3) канал связи; 4) приемник; 5) хранилище принятой информации. В этой же работе К.Э. Шеннон выделил 3 типа систем связи – дискретные, непрерывные и смешанные и установил, что дискретный случай является базой для двух других случаев и «имеет применения не только в теории связи, но и в теории вычислительных машин, проектировании телефонных станций и многих других областях».

Таким образом, мы видим, что в 1939 г. Шеннон был еще далек от завершения теории связи. Однако уже через 9 лет он опубликовал свою «Математическую теорию связи», где дал полное и простое описание обобщенной системы связи. Его соединение в единое целое частей системы связи, его моделирование информации как энтропии и его теория о предельных возможностях связи в условиях шума и без него были прыжками через современное ему мышление в технику связи.

Большой интерес представляет методика, которую использовал Шеннон в работе над теорией информации и другими проблемами. Сам он в своей лекции 1953 г. описал эту методику так [5]: «Первое, о чем я должен сказать, это упрощение. Допустим, у вас есть проблема, которую надо решить – построить машину, создать физическую теорию, доказать математическую теорему и т.д. Тогда, вероятно, самый сильный подход к решению этой проблемы – попытаться исключить из нее все второстепенное, оставив лишь суть. Каждая проблема содержит данные разных типов, и, если вы выделите главные из них, то яснее увидите, что надо делать и, вероятно, найдете решение. Иногда вы можете упростить проблему до такого вида, который даже не похож на первоначальную постановку, из которой вы исходили. Но очень часто, решив эту гораздо более простую проблему, вы можете усовершенствовать полученное решение до того, что вернетесь к решению всей проблемы в ее первоначальном виде». Именно так Шеннон формулировал и решал свои проблемы – сначала на самом высоком уровне абстракции, затем выбрасывал все несущественное и, наконец, применял подходящую математику – булеву логику, знакомую ему с дней в Мичигане, для магистерской диссертации по переключательным схемам, алгебру для его докторской работы по генетике и теорию вероятностей для работы по теории связи. Сделав это, Шеннон смог создать научные теории, которые стали базой для соответствующих областей науки и техники.

Исследования, выполненные во время Второй Мировой войны, подняли значение теории информации. Так, Винер развил кибернетику на основе своих работ с Ванневаром Бушем, И.В. Ли (волновые фильтры) и Джулианом Бигелоу (управление огнем защитной артиллерии). Аналогично, по мнению Аспрея [4], теория связи Шеннона была использована во время войны для огромного продвижения в деле разработки радаров и в несколько меньшей степени – в деле обеспечения безопасности связи.

3. Теория переключательных схем: первые работы

Написанная Шенноном в августе 1937 г. магистерская работа «Символический анализ релейных и переключательных схем» не была революционным исследованием, чем-то, чего прежде не видывали. Более того, это был взгляд изнутри на связь известных вполне вещей – булевой алгебры и схем. И именно это было новым. Знакомясь с магистерскими диссертациями, подготовленными в то время на факультете электротехники МТИ, мы видим, что главными темами тогда были энергия, мощность, моторы и т.д. Вместе с тем, в 1937-40 гг. было несколько диссертаций по схемам, например, «Эквивалентные схемы для представления больших столичных пространств в задачах изучения стабильности переходных процессов» [6]. Это показывает, что исследователей тогда интересовало, как эквивалентные схемы могут быть использованы для представления различных типов сетей. Последние Шеннон с успехом исследовал в своей диссертации. Заметим, что на факультете математики МТИ в этот период не было диссертаций, охватывающих тематику булевой алгебры.

Связь между булевой алгеброй и схемами в действительности впервые была распознана в 1886 г. американским философом и логиком Чарльзом Пир-

сом; однако он никогда не пытался продолжить исследование [7]. В 1910 г. Пауль Эренфест из Санкт-Петербургского университета был первым, кто предложил идею использования логики в технике; он полагал, что лучшим объектом для этой цели являются станции телефонной коммутации [8]. Советский инженер Герсеванов в 1923 г. реально применял математическую логику для проектирования силовых гидравлических установок [7]. Далее в 1936 г. психолог из Чикаго Бенджамен Бурак сконструировал прибор, который с помощью электрических лампочек демонстрировал логические отношения в системе переключателей. Однако он опубликовал свою работу лишь в 1949 г. [7]. Логический прибор Бурака был создан за год до завершения магистерской диссертации Шеннона.

Магистерская диссертация Шеннона осуществлялась параллельно работам двух современных ему исследователей в Советском Союзе и Японии – двух странах, где занимались теорией переключений и логическим проектированием. Советский физик В.И. Шестаков сделал в этой области кандидатскую диссертацию (1938 г.) и опубликовал ряд статей (1941-44 гг.). Свое первое сообщение в этой области он сделал в 1935 г., после изучения телеграфных и телефонных систем и ознакомления с алгеброй логики. Также в 1935 г. японский инженер А. Накашима опубликовал статью «Теория реализации релейных схем». Теория переключений и логическое проектирование в восточной Европе (ГДР, Польша, Чехословакия, Венгрия, Румыния) и Советском Союзе развивались в связи с проблемами автоматического управления в теории систем. В Японии же продолжавшееся развитие применений булевой логики к техническим системам было связано с задачами проектирования релейных систем [7].

4. Истоки магистерской диссертации Шеннона

Шеннон начал готовиться к получению магистерской степени в МТИ в 1936 г. в качестве ассистента-исследователя в лаборатории В. Буша. Он только что закончил Мичиганский университет с двумя бакалаврскими степенями – по математике и электротехнике, что явилось основой для его будущих исследований. Рассказывают, что Шеннон получил место в лаборатории после того, как повесил на доске объявлений кампуса свое объявление, написанное на почтовой открытке. В это время Буш был вице-президентом МТИ и деканом инженерного факультета. Буш поручил новому сотруднику работу по созданию дифференциального анализатора, который был аналоговой вычислительной машиной, собранной из зубчатых передач, приводов и тяг и предназначенной для вычислений и решения дифференциальных уравнений. Шеннон помог решить проблемы, связанные с анализатором, преобразовав механические связи между тягами так, чтобы их движения соответствовали необходимым математическим уравнениям.

До прихода Шеннона В. Буш и его коллеги работали над проектом дифференциального анализатора около 10 лет. Законченная машина была поддержана Фондом Рокфеллера. Она весила почти 100 т и содержала 2000 вакуумных трубок, несколько тысяч реле, 150 моторов и автоматические устройства с перфокартами для выборки данных. Во время II Мировой войны Рокфеллеровский

дифференциальный анализатор был, вероятно, самым важным компьютером для выполнения операций в США [9]. Он дал искру Шеннону для его совершенно революционной магистерской диссертации «Символический анализ релейных и переключательных схем».

Дифференциальный анализатор возник из работы над интерграфом. Буш совместно с Ф.Г. Киром, Х.Л. Хазеном, Х.Р. Стюартом и Ф.Д. Гейгом создали интерграф в 1927 г. Это была машина для механического решения систем дифференциальных уравнений первого порядка [10]. Тогда на первой странице газеты «Нью-Йорк Таймс» появилось приветствие: «Думающая машина решает задачи высшей математики, решает уравнения, на которые у человека уходят месяцы». Интерграф использовал электрические и механические устройства и потому имел недостатки: неточность действия и излишнюю сложность. Вдохновленный математической элегантностью и механической простотой механического диск-интегратора, Буш решил строить новую механическую машину [9]. Дифференциальный анализатор, разработанный в 1931 г., был развитием интерграфа и мог решать дифференциальные уравнения до шестого порядка. Он состоял из длинных, похожих на столы, опорных рамок, пересеченных соединительными валами. Одна его сторона состояла из множества чертежных досок, а другая содержала шесть диск-интеграторов. Валы управляли пишущими перьями, так что они могли чертить кривые на чертежных досках. Оператор мог также двигать перо вручную по данной кривой. Это придавало желаемое вращение некоторым валам. Связывая члены уравнений с вращениями вала, скомбинированными с работой набора зубчатых передач, можно было использовать машину для выполнения всех базовых математических операций – в дополнение к интегрированию [9]. Рокфеллеровский дифференциальный анализатор имел чрезвычайно сложную схему управления, составленную примерно из ста переключателей, которые могли автоматически открываться и закрываться с помощью электромагнита. Именно эта схема и привела Клода Шеннона к важному открытию.

В то время, когда Шеннон писал свою магистерскую диссертацию, Рокфеллеровский дифференциальный анализатор находился еще в стадии конструирования. Доктор Чарльз Вест, вспоминая Шеннона, пишет, как однажды ночью его просто осенило, что схемы, которые он строил, очень похожи на булеву логику, которую он изучал, будучи студентом в Мичигане [11]. Затем он осознал, что переключатели в схеме можно совместить таким образом, чтобы схема выполняла необходимые операции символической логики. Это событие (произошедшее, скорее всего в конце 1936 г.) было крупным открытием, которое связало две хорошо известные области, которые до этого рассматривались отдельно, связь между ними не была хорошо исследована или широко опубликована. После этого логические понятия «истина» и «ложь», обозначенные числами 1 и 0, получили широчайшее применение. В частности, стало возможным представлять с помощью реле операции двоичной арифметики. По словам Шеннона «Возможно представление сложных математических операций с помощью релейных схем» [3]. От начального рассмотрения проектирования схем, которые могли складывать двоичные числа, Шеннон перешел к реализации

схем, которые уже могли осуществлять сравнение чисел и выполнять такие действия, как «Если число X равно числу Y , то выполнять операцию A ». Благодаря этому дифференциальный анализатор получил способность выполнять действия и решения, которые открывали новую эру для компьютеров и искусственного интеллекта [3]. Так родилась цифровая логика.

5. Магистерская диссертация

«Символический анализ релейных и переключательных схем»

Магистерская диссертация Шеннона «Символическая анализ релейных и переключательных схем» содержит метод нахождения простейшей схемы, реализующей сеть с требуемыми характеристиками. Алгоритм решения этой проблемы синтеза содержал шаги 1 (выразить требуемые характеристики сети в виде системы уравнений, в терминах уравнений различных реле или переключателей схемы) и 2 (преобразовать уравнения в простейшую форму, имеющую наименьшее число вхождений членов). Соответствующее исчисление было развито на базе использования простых алгебраических алгоритмов. Это исчисление было почти в точности аналогично исчислению высказываний в алгебре логики, открытому Джорджем Булем. Причем на последнем шаге решения проблемы синтеза нужное представление схемы можно было сразу получить из преобразованных уравнений.

Диссертация Шеннона начинается с постулатов и теорем, необходимых для построения исчисления, используемого для упрощения отдельных членов уравнений. Затем это исчисление входит в анализ свойств схем и используется в примерах решения реальных проблем представления схем.

Во время работы схем их полюса могут быть свободны, т.е. незамкнуты (тогда имеем бесконечное сопротивление) или замкнуты (нулевое сопротивление). Если цепь между полюсами a и b , обозначаемая X_{ab} , замкнута, то ее сопротивление можно представить символом 0 (нуль). Символ 1 (единица) используется для представления сопротивления разомкнутой цепи. Используя эти базовые определения, Шеннон формулирует специальные постулаты, касающиеся действий с 0 и 1. Далее с помощью этих постулатов получаются теоремы, описывающие статику работы схем, содержащих только последовательные и параллельные соединения. При этом используются только логические операции дизъюнкции и конъюнкции. Операция отрицания была новой логической операцией, которая применялась к сопротивлению X , обозначалась как X' и определялась как получение значения, противоположного к X . Аксиомы Шеннона имели вид:

$0 \cdot 0 = 0$ (замкнутая схема, соединенная параллельно с замкнутой схемой, есть замкнутая схема).

$1 + 1 = 1$ (разомкнутая схема, соединенная последовательно с разомкнутой схемой, есть разомкнутая схема).

$1 + 0 = 0 + 1 = 1$ (разомкнутая схема, соединенная последовательно с замкнутой схемой в любом порядке, есть разомкнутая схема).

$0 \cdot 1 = 1 \cdot 0 = 0$ (замкнутая схема, соединенная параллельно с разомкнутой схемой в любом порядке, есть замкнутая схема).

$0 + 0 = 0$ (замкнутая схема, соединенная последовательно с замкнутой схемой, есть замкнутая схема).

$1 \cdot 1 = 1$ (разомкнутая схема, соединенная параллельно с разомкнутой схемой, есть разомкнутая схема).

В каждый момент сопротивление $X = 0$ либо $X = 1$.

Доказанные теоремы имели вид:

$X + Y = Y + X$, $XY = YX$ (законы коммутативности),

$X + (Y + Z) = (X + Y) + Z$, $X(YZ) = (XY)Z$ (законы ассоциативности),

$X(Y + Z) = XY + XZ$, $X + YZ = (X + Y)(X + Z)$ (законы дистрибутивности),

$1 \cdot X = X$, $0 + X = X$, $1 + X = 1$, $0 \cdot X = 0$ (законы действий с константами),

$X + X' = 1$, $XX' = 0$, $0' = 1$, $1' = 0$, $(X')' = X$ (законы действий с отрицаниями).

Этим была установлена основа для демонстрации эквивалентности введенного исчисления для схем и исчисления высказываний в логике. Символы булевой алгебры позволяли здесь представлять переменные с помощью значений 0 и 1. Связь, установленная Шенноном между булевой логикой и символическим анализом релейных схем, может быть суммирована таким образом.

Символ	Интерпретация в релейных схемах	Интерпретация в исчислении высказываний
0	Цепь замкнута	Высказывание ложно
1	Цепь разомкнута	Высказывание истинно
$X + Y$	Последовательное соединение цепей X и Y	Высказывание, истинное при истинности хотя бы одного из X и Y
XY	Параллельное соединение цепей X и Y	Высказывание, истинное при истинности обоих – X и Y
X'	Цепь, разомкнутая при замкнутости X и замкнутая при разомкнутости X	Отрицание высказывания X
=	Две цепи замкнуты или разомкнуты одновременно	Любое из двух высказываний влечет другое
X	Цепь X	Высказывание X

В исчислении высказываний с помощью теорем де Моргана можно вывести много теорем, полезных для упрощения выражений. На их основе выполнялось упрощение схем, т.е. приведение уравнений, описывающих схемы, к виду, содержащему наименьшее число элементов (т.е. сопротивлений). Эти методы оказались очень полезными для схем, содержащих только последовательные и параллельные соединения.

В диссертации Шеннона рассмотрены также не последовательно-параллельные переключательные схемы и приведены заимствованные из общей теории схем регулярные методы, позволяющие сводить такие схемы к последова-

тельно-параллельным, которые затем могут изучаться с помощью разработанного логического исчисления. Эти регулярные методы основаны на выделении всех цепей между входным и выходным полюсами схемы, подсчете сопротивления каждой цепи путем суммирования сопротивлений всех входящих в нее элементов и перемножении подсчитанных сопротивлений, что дает вход-выходное сопротивление всей схемы. (Другой вариант – выделение всех сечений схемы на две подсхемы, содержащие соответственно входной и выходной полюсы, подсчет сопротивления каждого сечения путем перемножения сопротивлений всех входящих в него элементов и сложение подсчитанных сопротивлений, что и дает вход-выходное сопротивление всей схемы).

Еще одной особенностью магистерской диссертации Шеннона было то, что она содержала методы разложения логических функций по их аргументам и показывала, как с помощью этих методов упрощать схемы.

В последней главе диссертации приводится много примеров успешного применения разработанного логического исчисления к анализу и синтезу конкретных релейных и переключательных схем: селекторных схем, замка с электрическим секретом, двоичных сумматоров. Эти примеры наглядно демонстрируют совершенный Шенноном научный прорыв и возможную практическую пользу от этого.

6. Первое признание

Открытие Шеннона разрушало основы и вело к новой эре господства цифровой логики и компьютеров. Однако сама связь между булевой алгеброй и схемами была признана уже давно и применена в нескольких частях света – впервые в 1886 г. Почему же было так много «загоревшихся» исследователей, использовавших идею булевой логики в технических приложениях, но никогда не заходивших достаточно далеко и часто не публиковавших свои результаты? С тех пор и вплоть до Шеннона эта идея «спотыкалась» много раз, хотя зацепиться за данную концепцию ввиду ее очевидности было нетрудно (в отличие от концепции, использованной позднее Шенноном при разработке теории информации). Теории Шеннона стали широко публиковаться и распространяться потому, что пришло подходящее время для технологий, позволяющих сделать соответствующий шаг. Отчасти это было вызвано также появлением машин, которые начали брать на себя некоторые функции мышления, а впоследствии научились принимать решения. Общественное и экономическое развитие явилось следствием общих изменений в мире, которые потребовали чего-то похожего на цифровую логику, перевести машины на уровень новой эры. В течение предыдущих 50 лет, когда другие выдающиеся умы во многих странах приходили к похожим теориям, там просто не было возможностей реализовать преимущества от сделанных открытий. Выполненные работы говорили лишь об интересе исследователей. Напротив, диссертация Шеннона явилась основой для создания теории переключений и логического проектирования, которые сразу были применены к множеству проблем, возникающих, например, при переключении в железнодорожных системах, передаче информации и исправлении ошибок, в автоматической телефонии, в вычислительных машинах и т.д.

Другим важным элементом признания работы Шеннона явилось присуждение ему в 1939 г. американской премии имени Альфреда Нобеля как молодому автору технической статьи, обладающей выдающимися достоинствами. Это была неожиданная для него честь, как это видно из его письма к В. Бушу: «Вы, вероятно, слышали, что я получил премию Альфреда Нобеля за мою статью по переключательным схемам. Фактически я подозреваю, что Вы не только слышали, но и кое-что сделали, чтобы я ее получил. Если это так, то большое спасибо. Я был так удивлен и счастлив получить письмо с сообщением о награде, что чуть не упал в обморок» [12]. Вероятно, Буш представил диссертацию Шеннона в Нобелевский комитет без консультации с ним. Из этого эпизода ясно, каково было влияние Буша на признание работы Шеннона. Вся эта история показывает, насколько Шеннон был безразличен к славе – он был целиком сосредоточен на исследовании, которое было абстрагировано от технических аспектов. Когда велась работа по созданию дифференциального анализатора, создавались сотни переключателей для его схемы управления. Это и заставило Шеннона подумать о применении логики к схемам. Совершенное открытие, по мнению В. Буша и из-за технологических потребностей того времени, стало общественным событием, которое сделало исследование Шеннона знаменитым и позволило ему внести огромный вклад в цифровую эру.

После диссертации по булевой логике и переключательным схемам В. Буш решительно признал талант Шеннона. Однако он знал, что Шеннон «очень застенчив, исключительно скромно и представляет тип человека, склонного к уединению и ожидающего неудач» [13]. Поэтому он старался создать наилучшие условия для него. В 1938 г. с помощью Буша Шеннон был принят в качестве докторанта на факультет математики МТИ. С этого времени они начали переписываться и обмениваться идеями о возможных темах исследований. Тогда же началась работа Шеннона по генетике.

7. Докторская диссертация по теоретической генетике

Однажды Ванневар Буш попросил К. Шеннона посмотреть, не будет ли ему интересно поработать в области генетики. Он тогда поделился с коллегой, что «ему пришло в голову, что подобно тому, как специальная алгебра хорошо работает в руках Шеннона в теории релейных схем, другая специальная алгебра может оказаться подходящей для изучения некоторых аспектов менделевской теории наследственности [14]». Шеннон был лучшим кандидатом для такой работы, но у него не было никаких знаний по генетике. По словам Буша «В то время, когда я предложил ему применить его странную алгебру к новому объекту (генетике – В.Л.), он даже не знал, что означает это слово» [15]. Несмотря на это, он быстро подготовил рукопись с некоторыми идеями, изложенными в алгебраических терминах. Эти идеи были столь новы, что Буш устроил его на работу к Барбаре Беркс, в качестве исследователя в университете Коулд Спринг Харбор на летний семестр 1939 г. Начатое там Шенноном исследование перешло в докторскую диссертацию, которую он представил к защите в 1940 г. под названием «Алгебра теоретической генетики» Почему Буш предложил Шеннону область генетики? В 1939 г. он стал президентом Института Карнеги в Ва-

шингтоне, который имел в Коулд Спринг Харборе исследовательскую лабораторию по генетике. Так что он знал обо всем, происходившем в генетике, и решил, что было бы хорошо попробовать Шеннону в этой области его «странную алгебру», как он сделал это раньше.

Приоритетные работы в генетике имели всегда сильную привязку к математике. Грегор Мендель в его экспериментах с горохом, наблюдая наследование признаков в последующих поколениях, пришел к понятию гена. Однако его исследование осталось неизвестным в течение нескольких десятилетий – до 1900 г., когда результаты были переоткрыты другими. Исследователи стремились связать определенные математические знания с возможностями генных комбинаций. Применение генетики перешло от растений к животным, потом на людей. Изучение наследственных черт характера человека называли евгеникой. В 1904 г., когда началось серьезное применение математики в генетике, Чарльз Давенпорт основал в лабораториях Коулд Спринг Харбора отдел евгеники, который стал центром евгенических исследований в США. Евгеники интересовались болезнями вроде гемофилии и болезни Паркинсона, передающимися от поколения к поколению как наследование по модели Менделя. Они также исследовали определенные черты человека, такие как музыкальность, слабоумие, интеллект. К сожалению, методика евгенических исследований отличалась большой неточностью и личной предвзятостью – любой иностранец или лицо с низкими доходами мог быть объявлен лицом, обладающим нежелательными чертами. В связи с этим евгеника начала вызывать интерес общественности. Особую популярность она приобрела в 1920-е – 1930-е годы. В США, Англии и Германии это вылилось в движение по борьбе с нежелательными человеческими чертами. Появились предложения стерилизовать лиц с такими чертами, доходило до стерилизации умственно неполноценных пациентов.

В середине 1930-х гг. евгеника откололась от генетики – из-за огромных различий в их методах исследования. Генетики сосредоточились на развитии математических методов для обработки статистики экспериментов. Так, Хогбен в публикации 1933 г. (отреферированной в диссертации Шеннона) исходил из серьезного применения алгебры, в ее матричном представлении [16]. Он составил таблицу операций, описывающих в рекуррентной форме процесс воспроизведения популяций. Однако лидерами новой эры научного и математического подхода к генетике в это время были Холдэн, Фишер и Райт. Они создали основы более точного математического подхода к изучению популяции и генов, инициировав классический период популяционной генетики [17]. Они сделали важный вклад в изучение разведения, мутации и селекции растений и животных. В отличие от Шеннона, они не использовали никакой новой символики. Однако Сьюэлл Райт начал использовать статистику к выводу соотношений между различными генетическими факторами. Статьи, написанные этой тройкой, имели много прямых применений в биологии, основанных на экспериментальных данных [18]. Это были те самые генетики, которые начали противостоять продвижению евгеники. Холдэн громко критиковал евгенику, заметив, что по ней «Леонард да Винчи был бы стерилизован в некоторых штатах из-за определенных отклонений» [18]. В конце 1930-х годов популярность евгеники

уменьшилась. Стала ясна сомнительность методов многих евгеников. Ванневар Буш, став президентом Института Карнеги, в 1940 г. закрыл отдел евгеники. Смерть этой науки наступила, когда выяснилось, что нацисты использовали ее для оправдания своего геноцида.

Когда Шеннон передал В. Бушу свою первую рукопись с некоторыми идеями по генетике, тот был впечатлен «простотой, с которой Шеннон получил некоторые достаточно общие соотношения» [18] и попросил коллег оценить важность материала. Одна из них была Б. Беркс из отдела евгеники в Коулд Спринг Харборе. Доктор Беркс была автором исследований по изучению интеллекта. Ее очаровала как сама рукопись, так и неожиданный подход к генетике. Ее комментарий был: «Наверняка, Шеннон одарен – вероятно, в очень высокой степени» [19]. Она отметила и некоторые проблемы в статье – большая часть материала уже известна, но согласилась, что статья должна быть опубликована, поскольку ее методология уникальна. Информацию об этом отзыве Шеннону сообщил Буш: «Результаты, которые Вы получили, уже довольно старые, но метод, очевидно, новый» [20]. Он посоветовал Шеннону познакомиться с генетикой и быстро опубликовать статью. И хотя Шеннон в это время работал в отделе математики параллельно над несколькими проектами (статья «Математика переключательных схем», проблема искажения при передаче данных, его основной проект «Машина для символического представления математических операций» и другие), он решил исправить статью и позже, с помощью Буша, опубликовать ее [21]. Во время совместной работы с доктором Беркс в лаборатории генетики Коулд Спринг Харбора летом 1939 г. Шеннон усовершенствовал свою идею, сделав ее «способной генерировать метод и учитывать все практически важные случаи, включая зависимость факторов и множественность партнеров» [22]. Результатом этой работы стала его докторская диссертация «Алгебра теоретической генетики». Эта диссертация суммировала его новый метод описания генетической информации с помощью математической структуры. Так, он использовал греческие буквы для представления менделевских популяций и описал различные операции, которые могут преобразовывать их. На этой основе он вывел известные генетические теории. Как и в магистерской диссертации, он представил работу выделенной, сославшись лишь на две другие работы – Роббинса и Хогбена, которые работали с более простым математическим аппаратом в генетике. Доктор Беркс послала ему через Буша ссылку на работу Холдэна, но Шеннон посчитал, что она не имеет отношения к его исследованию. В докторской работе он упомянул, что «поскольку такая работа не была сделана раньше с помощью специальной алгебры, подобной нашей, наши ссылки должны иметь лишь общий характер».

Шеннон использовал прежние идеи и методы к его нынешнему исследованию в популяционной генетике. Он использовал математику для изучения способов размножения различных комбинаций партнеров в течение нескольких поколений. Но его манера работы изменилась. Интересный анализ его диссертации дают современные генетики. Они указывают на теорему 12 с уникальной идеей, которую не открыли еще в течение 5-10 лет [23]. Это было развитием теоремы 11, которую сам Шеннон считал самым важным достижением. «Это

первый случай, когда было получено общее выражение для потомков популяции спустя n поколений, при случайном спаривании и с учетом двух связанных факторов». Теорема 11 касается случая двух партнеров, в то время как теорема 12 распространяет результат на случай трех партнеров [24]. Для Шеннона это было математически тривиальным, но для генетики такое развитие идеи было оригинальным. В обобщении его формулы популяции в форме ряда он заметил интересную параллель с его предыдущей работой: «Эти ряды очень похожи на обобщение булевой функции в символической логике и не только проливают свет на математическую природу используемых символов, но и полезны в вычислениях» [25]. В отличие от генетиков, которые сначала экспериментировали, а потом выводили соответствующие формулы, Шеннон отталкивался от общих знаний для получения базового множества представлений. Причем он снова показал свой интерес к сокращению реальных процессов до дискретных математических единиц. В дополнение к этому, Шеннон привлек к работе над диссертацией математическую технику из своей предшествующей работы по переключательным схемам. Работой по генетике он расширил свою деятельность на другие области, которые впоследствии повлияли на его другие работы. Кроме того, эта работа позволила ему углубить свои знания по алгебре и статистике, которые пригодились ему в последующих исследованиях.

8. Непризнание работы по генетике

Хотя все считали докторскую диссертацию Шеннона оригинальной и выдающейся, она не внесла никакого вклада в генетику и осталась неизвестной. Это случилось потому, что работа никогда не была опубликована в журнале, хотя В. Буш и Б. Беркс настаивали на публикации. Буш писал Шеннону после прочтения черновика рукописи: «Это надо немного отшлифовать и затем опубликовать. Я буду рад, если Вы это сделаете и передадите рукопись, а я напишу предисловие и рекомендую в некоторые места, где можно хорошо представить» [26]. Буш также консультировался с департаментом математики Института Карнеги «чтобы быть уверенным, что он все учел» [27]. В свою очередь, Беркс предложила журнал «Генетика» как хорошее место для пробы [28]. После оформления диссертации Шеннона Буш послал ее копии нескольким коллегам. Отклики были весьма положительны. Рид с кафедры биохимии Университета Джонса Гопкинса считал работу «очень хорошей», а символику и операции «очень подходящим механизмом для изучения сложных проблем наследственности» [29]. Данн, статистик правительства, тоже высоко оценил работу [30]. Однако, несмотря на общую поддержку, публикация не состоялась. Дело в том, что после окончания докторской диссертации Шеннон потерял интерес к теме. Это было связано как с личными обстоятельствами (в это время Шеннон в первый раз женился и был занят устройством своего нового дома), так и с профессиональными (захотелось сделать что-то новое, а не продолжать старые исследования). В это время Шеннон работал в департаменте математики МТИ сразу над несколькими интересными проблемами, далекими от генетики. Они включали его идеи по фокусировке линз и искажению в передаче данных, которые он разрабатывал следующие несколько лет, чтобы приблизиться к теории

информации. В сложившихся условиях у Шеннона не было ни желания, ни времени подготовить публикацию своей докторской работы. Впрочем, если бы даже публикация состоялась, вряд ли другие исследователи приняли бы эту работу. Беркс предупреждала Буша, что такая оригинальная работа требует продолжения и постоянного внимания создателя, так как «мало ученых, готовых в своем поколении применять новые, необычные методы, придуманные другими» [31]. Окружение в генетике сильно отличалось от других мест работы Шеннона. Так, когда Шеннон работал над дифференциальным анализатором, его теории имели существенное отношение к электротехнике и проектированию схем. Люди воспринимали техническую сторону дела как воплощение его идей. Это же относилось к его работе во время войны в лабораториях Белла. А вот генетики не могли оценить математику отдельно от своих экспериментов, чтобы двинуть свою работу вперед. Поэтому математики не заинтересовались проблемами популяционной генетики. Произошедшие в это время события окончательно оторвали Шеннона от генетики. Сначала В. Буш закрыл отдел евгеники. Это внесло много хаоса и отвлекло тех, кто мог бы помочь и поддержать Шеннона. А разразившаяся 2-я Мировая война показала миру, в какую пропасть свалилась евгеника и указала Шеннону его место – математика в службе криптографии.

9. Работы по криптографии

После работы в Институте высших исследований в Принстоне Шеннон перешел в Лаборатории Белла, где велись пионерские исследования по переключательным схемам и теории цепей. Национальные цели передвинулись в связи с войной с чисто академических к прикладным исследованиям. Среди многих других ученых, призванных в лаборатории Белла, Шеннон должен был проводить исследования, которые широко финансировало Правительство. Это были работы по изучению и совершенствованию процессов управления огнем и сглаживания данных. Работы в области военных технологий в наибольшей мере акцентировались на связи. Поэтому работа, которую К. Шеннон в лабораториях Белла выполнял формально по криптографии, больше походила на его работу по теории информации. Война требовала много информации для координации множества военных действий. Причем было жизненно необходимо, чтобы эта своя информация оставалась в секрете, а вражеская информация была уничтожена. В интервале между 1-й и 2-й Мировыми войнами штат криптоаналитиков вырос с 400 до 1600 человек. Существовавшие в США машины позволяли раскрывать неизвестный код в течение 1-8 ч. Эти машины были физическим воплощением тогдашней теории криптографии. Развивая эту теорию дальше, К. Шеннон говорил: «Лаборатории Белла работали над секретными системами. Я работал над системами связи и также был назначен в некоторые комитеты, изучавшие технику криптоанализа. Работа над обеими математическими теориями – связи и криптографии – шла одновременно с 1941 г. Нельзя сказать, что одна завершилась раньше другой – обе были так близки, что не могли быть разделены» [32]. Большая часть обеих работ завершилась к 1944 г, хотя дальше они еще совершенствовались вплоть до их опубликования в 1948 и 1949 гг.

Большая часть исследований Шеннона включает идею избыточности языка. Так, в английском языке буква *u* всегда следует за *q* и потому *u* избыточна, так как не несет дополнительной информации. Шеннон понимал, что избыточность – основа криптоанализа. Он говорил: «В большинстве шифров только наличие избыточности в исходном сообщении делает возможной расшифровку». Это значит, что сообщение с меньшей избыточностью имеет криптограмму, которую труднее расшифровать. В книге [32] констатируется: «Шеннону удалось установить количество материала, необходимого для получения единственного и непротиворечивого решения, когда простой текст имеет определенную степень избыточности». Важно заметить, что этот тест Шеннона появился в конце войны. Поэтому в течение войны работало много плохих шифрующих и дешифрующих систем, так что сообщения не были должным образом защищены. Тест позволил отбраковывать значительное число ошибочно декодированных сообщений.

Шеннон показал, как сделать шифrogramму более трудной для дешифрации, с целью сделать ее секретной – ведь зашифрованный текст требует расшифровки, чтобы получить исходное сообщение. Шеннон отметил, что «засекречивающая система почти идентична системе связи с шумами». Он не ограничился этой хорошей аналогией, добавив: «главное отличие в этих двух случаях в том, что: 1) операция шифрования в общем случае имеет более сложную природу, чем появление шума в канале; 2) ключ для засекречивающих систем обычно выбирается из конечного множества возможностей, в то время как шум гораздо чаще вводится непрерывно как воздействие, выбранное из бесконечного множества» [32].

Шеннон был озабочен судьбой исследований по криптографии в Лабораториях Белла и старался, чтобы к криптографии относились уважительно, как к формальному пути для введения некоторого числа принципов теории информации. Его математическое понимание предмета «криптология» позволяло ему объяснять криптографические системы. Широко использовавшаяся тогда система «Вернам» была математической абстракцией, представленной Шенноном в меморандуме Лабораторий Белла. Он мог показать, почему эта система так эффективна и «полностью секретна». Мы видим, что математический анализ физических систем был повторяющейся темой работ Шеннона.

Основной вклад Шеннона в криптографию изложен в его работе «Теория связи секретных систем». Здесь введено определение секретных систем как «множества преобразований одного пространства (набора всех возможных сообщений) в другое пространство (набор всех возможных криптограмм)». Большая часть работы была выполнена в то же время, что и работа по теории информации. Сходство обеих обнаруживается при сравнении граф-схем, иллюстраций и математических выражений. Диаграммы, описывающие системы связи и системы секретной связи содержали одинаковую методологию обобщения смысловых составляющих проблемы реального мира. Шеннон разработал математику для абстрактного представления обеих систем. Он реконструировал и объяснял эти системы с помощью его новой математической интуиции. Два стиля диаграмм, описывающих системы связи и системы связи с секретом, не

были исключительно шенноновскими – другие публикации Лабораторий Белла в области схем связи содержали аналогичные диаграммы. Многие люди, работавшие с Шенноном в криптографии, были также вовлечены в теорию информации. В аннотации к конфиденциальному отчету Шеннона «Математическая теория криптографии» 1945 г. список подлежащих ознакомлению сотрудников Лабораторий Белла включает корифеев – Блэка, Найквиста, Боде, Хартли и других, известных как пионеры в области связи.

10. Работы в других областях

Кроме указанных выше тем, К.Э. Шеннон активно занимался исследованиями во многих других областях. Здесь в первую очередь следует назвать его работу «Вычислимость на вероятностных машинах», в которой ставится и частично решается следующая важная научная проблема: существуют ли (и какие именно) новые возможности у машин со случайным поведением по сравнению с полностью детерминированными машинами. Оказалось, что такие возможности существуют или не существуют в зависимости от того, является ли невычислимым или вычислимым числом вероятность, характеризующая случайное поведение машины. Другой важнейшей работой Шеннона была его статья «Надежные схемы из ненадежных реле», в которой он, развивая идеи Дж. фон Неймана о построении надежных функциональных схем из ненадежных элементов, показал, что применительно к релейно-контактным схемам эти идеи можно продвинуть дальше. В частности, выясняется, что к отдельным реле не нужно предъявлять требования некоторой минимально необходимой надежности (как это было в случае функциональных элементов), чтобы из них можно было строить высоконадежные релейные схемы. Кроме того, требуемое для построения высоконадежной релейной схемы число дополнительных реле оказалось на несколько порядков меньше, чем число дополнительных элементов для построения высоконадежной функциональной схемы. Еще одна важная работа Шеннона – «Вычислительные устройства и автоматы», где рассматриваются проблемы неарифметического применения компьютеров, в частности, связанные со сходством и различием между компьютером и мозгом и возможностями создания «искусственного интеллекта», под которым Шеннон понимает создание логических, играющих, обучаемых и т.д. машин. Весьма существенной была и его работа «Упрощенный вывод линейной теории сглаживания и предсказания по методу наименьших квадратов», в которой он дал простое и доступное для инженеров изложение знаменитой теории предсказания и сглаживания Винера-Колмогорова для более простой, но практически достаточно содержательной постановки этой задачи.

Кроме указанных работ, Шеннон также выполнил интересные исследования по математической теории дифференциального анализатора Буша, по проблемам построения универсальных Машин Тьюринга, по задачам о максимальном потоке в сети и о раскраске ребер графа, по построению играющих машин, в частности, машин, играющих в шахматы, и составлению программ для игры в шахматы на компьютере, по построению машин для проектирования переключе-

чательных схем. Ряд его статей – «Бандвагон», «Вклад фон Неймана в теорию автоматов» и др. – посвящены исторической и философской темам.

Хотя перечисленные в этом разделе работы Шеннона и вызывали интерес, ни в одной из них ему не удалось подняться до того уровня, которого он достиг в прежние годы своими революционными исследованиями по символическому анализу переключательных схем и по теории информации.

11. Шеннон как ученый и человек

Стиль научной работы К. Шеннона характеризуется его стремлением к максимальному обобщению проблемы и ее приведению к простейшей форме. Как студента и коллегу друзья описывают его как очень застенчивого, независимого и невероятно способного. Когда же он перешел к профессиональным исследованиям в промышленности и науке, он, по отзывам жены, коллег и руководителей, стал человеком бескомпромиссным, нацеленным на математические теории и легко переходящим от предмета к предмету, но только после того, как удовлетворился подведенной под предмет изучения теоретической базой. Типичный пример его стиля работы – создание «Математической теории связи», где Шеннон полностью абстрагировался от сложности реальной системы связи, представив ее как систему из простых блоков, которые можно изучать раздельно. Однако этот подход чувствуется во всех его работах. В своей монографии [33] С. Колдуэл, руководитель Шеннона по магистерской диссертации, описывает ее как «создавшую возможность поддержки искусства проектирования методами, основанными на науке, что увеличило производительность проектирования схем». Это характеристика манеры мышления Шеннона, стремившегося в целях обобщения и упрощения решаемой проблемы ввести математическую структуру в любую область исследования. Этот же факт побудил Х.Х. Гольдштейна написать: «Это одна из наиболее важных магистерских диссертаций, когда-либо написанных, веха, которая превратила проектирование схем из искусства в науку» [34].

Манера работы Шеннона и способ его общения с другими хорошо характеризуют его как человека и мотивацию его работы. Известно, что в качестве сотрудника и советника (руководителя) он предпочитал работать в одиночку, насколько это возможно, так как для него это был лучший способ сосредоточиться на проблеме. Многие, работавшие с ним, отмечают его ограниченное общение с ними, однако глубокое, нередко изменявшее их перспективу. Т.е. он влиял на область их работы. Он и сам переходил из области в область, выполняя в каждой небольшую, но часто революционную работу. Смена интересов проявлялась и в его непрофессиональной деятельности. В своей работе Шеннон интересовался только проверкой своих фундаментальных, концептуальных идей. Это проявлялось в его отношении к студентам и коллегам, просившим у него совета. Он редко искал сотрудничества с другими и еще реже – применения или признания своих результатов, постоянно демонстрируя свой интерес лишь к чистой теории. Лучший способ изучения этой стороны личности Шеннона – отойти от его работ и посмотреть на него как на реального человека, которым он был, поговорив с людьми, которые его знали.

Сотрудничал Шеннон с коллегами необычно. По словам его жены Бетти «Он был просто одиночка и любил работать один» и еще «Он не сворачивал со своего пути ради сотрудничества с другими» [35]. Ей вторит Фано «Он был не из тех, кто станет слушать других, над чем ему работать» [2]. Его рабочие привычки «не были образцом для подражания – он спал, когда хотел спать и часто проводил часы за кухонным столом, обдумывая идеи», – вспоминает жена Шеннона. Шеннон был так сосредоточен на фундаментальных теориях, что печатать его результаты под диктовку он просил жену. Как выпускница математического факультета, миссис Шеннон могла иногда разрабатывать более простые математические фрагменты в его работе. Примечательно, что Шеннон старался оставаться побольше дома, где он принимал много посетителей, чаще других доктора М. Мински [1]. Переезд в собственный дом изменил жизнь Шеннона [1].

Когда в 1950-е годы Шеннон пришел в качестве профессора в МТИ, его репутация была так велика и он был настолько востребован, что его окружение совершенно изменилось. «Он был фактически “лев”» – говорит Мур и еще «Он был светило, и это привело в будущем департамент электротехники МТИ в лоно теории информации» [1]. Шеннон оказался в МТИ в среде, которая не была склонна к тонкому исследовательскому мышлению. «Чтобы создавать новые идеи, Вы должны ограничить поступление новой информации, ибо есть времена, когда Вы все в себя всасываете, как пылесос, и другие времена, когда Вы от всего закрываетесь и просто думаете», – говорит Мур [1]. До своего поступления в МТИ Шеннон уже принял этот последовательный подход, однако, чтобы придерживаться его в стенах МТИ, «от человека требовалась почти нечеловеческая дисциплина» [1]. Это обстоятельство помогает понять, почему наиболее революционные работы Шеннона появились в самом начале его научной карьеры.

Будучи профессором МТИ, Шеннон очень мало консультировал студентов. Его основные контакты со студентами происходили на семинарах по теории информации, которые он вел. «Его беседы и лекции были великолепны. Однако он не любил читать лекции и вообще не испытывал никакой тяги к чтению постоянных курсов в МТИ», – говорит Фано [2]. Он редко искал себе учеников среди студентов, как свидетельствуют его бывшие подопечные. Так, В. Сазерленд, один из его докторантов, вспоминает, что пришел сам к Шеннону, поскольку был знаком с ним со времен его визита в Мичиганскую высшую школу, а старший брат Сазерленда уже был аспирантом Шеннона [36]. У другого своего ученика – Мура, Шеннон стал руководителем по магистерской диссертации по той причине, что у них были общие интересы в математике и логике. Но Мур исследовал роль математической логики, дедукции и пропозиционального исчисления в теоретической информатике. Для К. Шеннона эта область была малоинтересна, поэтому он прекратил руководство Муром, как только тот защитил магистерскую диссертацию.

Стиль научного руководства Шеннона соответствовал его поведению в других областях. Так, Сазерленд говорит, что для контактов по своей работе ему приходилось посещать Шеннона в его доме в Винчестере. В то же время

Мур общался с Шенноном без всяких ограничений. А вот Г. Эрнст описывает свое взаимодействие с Шенноном – руководителем как «отношения на расстоянии вытянутой руки» [37]. Хотя, по словам Эрнста, и Шеннон, и доктор Мински были вовлечены в специфику исследований Эрнста, связанных с созданием механической руки, и вдохновлены приближением компьютеров к человеку. Впрочем, Шеннон никогда не заставлял Эрнста ездить к нему домой в Винчестер, как Сазерленда, поскольку через день в течение года он бывал на работе в МТИ. Несмотря на эту разницу, оба аспиранта Шеннона подтверждают, что он был независимым и замкнутым человеком. Важно отметить отличие между физической неконтактностью с внешним миром и недостаточной способностью взаимодействовать с ним. Недостаток взаимодействия, о котором рассказывают студенты Шеннона, дополняется рассказами о его огромном интересе к улучшению человеческого опыта. Шеннон был весьма озабочен фундаментальными идеями, которые формируют наше понимание мира. Исследование и развитие этих идей было возможно только путем интенсивных индивидуальных размышлений. Однако Шеннон никогда не переставал подчеркивать связь его идей с внешним миром, всегда описывая ее доступно для аспирантов. Эрнст вспоминает момент, когда Шеннон вдруг вмешался в интервью для радио, когда Эрнст был не в состоянии отвечать интервьюеру. Шеннон был способен без подготовки дать интервью и объяснить свои исследования широкой публике. Его работа и его рабочий стиль проистекали из его интереса к развитию математических теорий, относящихся к человеческому опыту.

У К.Э. Шеннона было много интересов, совершенно не связанных с его профессиональной деятельностью. Изучая хобби Шеннона и его весьма необычные интересы, открываешь его особый стиль и мотивацию. Бетти Шеннон описывает своего мужа как обладателя «раздвоенной личности», поскольку он интересовался как механическими предметами (понять, как они работают!), так и высокотеоретическими основами науки и техники [35]. Согласно Весту, Шеннон проявил интерес к технике еще в детстве, когда отец принес ему «конструктор» для игр и учебы [11]. Этот интерес к постройке новых приспособлений со временем не уменьшался. Миссис Шеннон вспоминала, что в их доме в Винчестере (штат Массачусетс) «Он даже построил несколько машин». Особенно она запомнила стул-подъемник, который перевозил людей вдоль дорожки к озеру. Он всегда искал «вызова какого-нибудь сорта», – продолжает миссис Шеннон. «Мы совсем не придерживались формальностей – если нам что-то было интересно, мы делали это». Семья много путешествовала по стране, посещая множество национальных парков, используя для этого «Фольксваген», при необходимости превращавшийся в домик.

К. Шеннон обладал большим чувством юмора и любил делать различные «штучки», – вспоминает Фано. Типичный пример этих «штучек» виден в его «закрывающей машине»: когда кнопка нажимается, ящик открывается, и механическая рука медленно движется по направлению к кнопке, снова нажимает ее, чтобы закрыть ящик. Шеннон был известен и как талантливый жонглер. Вест вспоминает свой визит в его дом в Винчестере и жонглирующие машины, созданные там Шенноном. Эти машины демонстрировали разносторонность

Шеннона и его страсть к подключению математической теории к познанию каждого явления в мире. В связи с этим Вест заметил, что 50% членов Американской ассоциации жонглеров – математики.

По воспоминаниям Эрнста, К. Шеннон потратил много времени, пытаясь построить теорию работы на фондовом рынке. Он установил, что арбитраж – единственный правильный путь для этого бизнеса. «Даже в своей работе по фондовому рынку Шеннон работал независимо от других», – вспоминает Эрнст [37]. Сазерленд говорит, что, приезжая к Шеннону домой, он часто находил его занятым одним из его многочисленным хобби. Так, он не однажды заставлял его играть на гобое [36]. Доктор Сазерленд познакомился с Шенноном, когда тот выступал в Мичиганской высшей школе, демонстрируя свой проект «Мышь в лабиринте». Хотя невозможно проследить связь между исследованиями Шеннона и его хобби, Миссис Шеннон говорит, что «связью было его чувство юмора». Это чувство юмора, широко известное, было еще одним примером его способности видеть мир с неожиданной стороны. Фактически, интенсивный интерес и творческие способности Шеннона видны в его домашних проектах, очень похожих по стилю и многообразию на его ранние «революционные» исследования.

12. Приложения работ Шеннона

Сам Шеннон всегда говорил, что не интересуется тем, полезны его исследования или нет. В интервью одному журналу в 1984 г. он сказал: «Я очень редко интересуюсь применениями. Меня больше интересует, хороша ли проблема, красиво ли она поставлена» [38]. В том же интервью, когда его спросили об особенностях взаимных помех, он ответил: «Вы приписываете моему мышлению больше практических целей, чем есть в действительности. Мой ум бродит кругом, и я день и ночь занят разными вещами. Как писатель-фантаст, я думаю: а что, если мне это понравится, интересна ли эта проблема. Меня не интересует, занимается ли кто-либо ею или нет. Я просто люблю решать проблемы и работаю над этим все время» [38].

«Шеннон не был захвачен эйфорией, связанной с рождением цифровой эры и персональными компьютерами», – говорит его жена. В семье были компьютеры, но потом Шеннон заболел болезнью Альцгеймера, и его интерес к технологиям пропал. Когда его спрашивали о современном состоянии технологий «Он был абсолютно поражен возможностями компьютеров», – говорит миссис Шеннон [35]. По ее словам, было нечто странное в концепции ее мужа относительно влияния на мир его научных исследований. Мы же – все те, кто являемся свидетелями огромного влияния исследований Шеннона по логическому моделированию схем, по теории информации и др. на современный мир, должны с еще большим удивлением констатировать, что это влияние шло без усилий со стороны самого Шеннона. В то время как другие исследователи прилагали огромные усилия к продвижению своих научных работ в технику и не достигали в этом успеха.

13. Награды и признания

Шеннон мало интересовался наградами и признанием, которые он получал. И популярность, которой он достиг ко времени возвращения в МТИ в 1956 г., не была тем, чего он искал и добивался. «Он был очень скромный парень», – говорит его жена [35]. Миссис Шеннон напоминает, что признание, конечно, значило нечто для Шеннона, но просто он не был человеком, делающим из этого особый пункт. По словам жены «Он получил много наград, но никогда не думал и не говорил об этом» [35]. И это при том, что среди его наград и титулов были весьма престижные: премия им. Альфреда Нобеля как автору выдающейся статьи в области техники (1939 г.); титул «Доннеровского профессора» и грант в 2,5 млн. долларов от фонда Доннера, позволивший ему занимать должности полного профессора одновременно на факультетах электротехники и математики МТИ (1960 г.); Медаль Почета IEEE и Национальная научная медаль от Президента США (1966 г.); Премия Американской ассоциации содействия Техниону (Израильскому технологическому институту) в размере 35 тыс. долларов, с формулировкой «за фундаментальный вклад в современную науку связи в виде революционной математической теории информации, имеющей первостепенное значение во всех дисциплинах, включая проблемы смысла, связь, язык и связанные с ними понятия» (1972 г.); членство в Национальной академии наук США; Премия Киото в фундаментальных науках (1985 г.) и другие. К концу его жизни «его высокое положение начало распространяться понемногу и на семью, но я не видела повсюду статуй Клода», – говорит миссис Шеннон, – «Мы не думали об этом. Для нас он был просто папа в нашем доме» [35].

Исследования Шеннона дали миру необычайно сильный толчок. Однако, несмотря на это, его личная известность была весьма низкой. И это было совершенно естественно для его стиля работы: он был невероятно предан своим математическим теориям и не хотел думать о популяризации и продвижении своих идей, практическом применении и мировом признании.

14. Заключение

Изучая работы Шеннона, мы знакомимся не только с его творчеством, но и с природой технических революций. Влияние работ Шеннона по теории переключательных схем и теории информации широко освещено и признано. Однако, рассматривая каждую из этих, да и других работ Шеннона (включая и не получившие признания), мы обнаруживаем в них намного более глубокие качества, чем кажется сначала. «Когда он работал над теорией, он думал о вещах, которые математически прекрасны» [35]. Двойное образование – в математике и технике – позволяло ему уникальным образом видеть мир и находить концептуальные обоснования для каждого получаемого результата. Он всегда демонстрировал большую степень общности, рассматривал технику просто как сферу приложения науки и вместо того, чтобы начинать с технической проблемы, искал ее базовое научное ядро. Смысл вклада Шеннона в научное сообщество и мир заключался в его особом стиле работы и склонности к абстракции при решении даже прикладных проблем.

Есть много факторов, определивших влияние Шеннона на мир. Прежде всего, это высокий уровень технологий, определявших прогресс общества в его время. Причина, по которой работы Шеннона имели большое влияние в одних областях и не имели его в других, частично связана с уровнем предшествующих работ в соответствующих областях и необходимостью, способностью, интересом к движению вперед в это время, демонстрировавшейся в его работах. Так, Шеннон подготовил фундаментальный инновационный скачок, представив в новой форме схемы и информацию, однако именно окружавшее его общество в то время оказалось способным революционизировать соответствующую область. Предвидение революции является результатом деятельности многих инноваторов. Отличным примером в нашем случае является Ванневар Буш, который открыл талант Шеннона и руководил им способами, которые обеспечили его влияние на мир. Другим ключевым элементом для технической революции является готовность лидеров, таких, как Буш, допустить изменения, и рядовых членов некоторой области способствовать этим изменениям. Работы Шеннона усилиями многих его коллег были поддержаны в социальном и технологическом плане. И если бы Шеннон жил в другое время, очень возможно, что он – «отец цифровой эры» – стал бы «отцом» какой-то другой эры.

Наиболее горячий поклонник Шеннона в СССР А.Н. Колмогоров, противопоставляя его нелюбимому им Н. Винеру, сказал в 1963 г., что Шеннону был свойствен «скромный и деловой подход» к научным достижениям, своим и чужим [39]. Скромным его считала и жена [35]. На наш взгляд, К.Э. Шеннон не был скромным или нескромным, обыкновенным или странным и т.д. – он был просто гений. И, как нередко бывает у гениев, лучше других понимал достоинства и значение своих работ, был в них уверен, и потому не нуждался в их выпячивании, чтобы получить общественное признание. Такое поведение часто принимают за скромность.

Приложение 1.

Основные труды К.Э. Шеннона

1. Шеннон К. Э. Символический анализ релейных и переключательных схем // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

2. Шеннон К. Э. Число двухполюсных параллельно-последовательных сетей // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

3. Шеннон К.Э. Синтез двухполюсных переключательных схем // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

4. Шеннон К.Э. Надежные схемы из ненадежных реле // Шеннон Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и

Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

5. Шеннон К. Э. Вычислительные устройства и автоматы // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

6. Шеннон К. Э. Машина для игры в шахматы // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

7. Шеннон К. Э. Составление программы для игры в шахматы на вычислительной машине // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

8. Шеннон К. Э. Играющие машины // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

9. Шеннон К. Э. Сообщение о машине, решающей лабиринтную задачу // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

10. Шеннон К. Э. Вклад фон Неймана в теорию автоматов // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

11. Шеннон К. Э. Математическая теория связи // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

12. Шеннон К. Э. Теория связи в секретных системах // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

13. Шеннон К. Э. Современные достижения теории связи // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

14. Оливер Б, Пирс Дж., Шеннон К. Э. Принципы кодово-импульсной модуляции // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

15. Шеннон К. Э. Связь при наличии шума // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

16. Шеннон К. Э. Некоторые задачи теории информации // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

17. Шеннон К. Э. Пропускная способность канала с шумом при нулевой ошибке // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

18. Шеннон К. Э. Геометрический подход к теории пропускной способности каналов связи // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

19. Шеннон К. Э. Каналы с дополнительной информацией на передатчике // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

20. Шеннон К. Э. Некоторые результаты теории кодирования для канала с шумами // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

21. Шеннон К. Э. Замечание о частичном упорядочивании каналов связи // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

22. Шеннон К. Э. Вероятность ошибки для оптимальных кодов в гауссовом канале // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

23. Шеннон К. Э. Теоремы кодирования для дискретного источника при заданном критерии точности // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

24. Шеннон К. Э. Двусторонние каналы связи // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

25. Шеннон К. Э. Бандвагон // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

26. Шеннон К. Э. Предсказание и энтропия печатного английского текста // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

27. Боде Х., Шеннон К. Э. Упрощенный вывод линейной теории сглаживания и предсказание по методу наименьших квадратов // Работы по

теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

28. Шеннон К. Э. Математическая теория дифференциального анализатора // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

29. Элиас П., Файнштейн А., Шеннон К. Э. О максимальном потоке через сеть // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

30. Шеннон К. Э. Теорема о раскраске ребер графа // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

31. Шеннон К. Э. Универсальная машина Тьюринга с двумя внутренними состояниями // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

32. Де Леу К, Мур Э. Ф., Шеннон К. Э., Шапиро Н. Вычислимость на вероятностных машинах // Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под ред. Добрушина Р.Л. и Лупанова О.Б. Предисловие Колмогорова А.Н. – М.: Изд-во иностр. литер., 1963.

33. Shannon C. E. An Algebra for Theoretical Genetics. MIT Ph.D. thesis. Department of Mathematics. MIT. Massachusetts. 1940.

34. Shannon C. E. Analogue of the Vernam System for Continuous Time Series. Memorandum of Bell Laboratories // Claude Elwood Shannon. Collected Papers. IEEE Press. New-York. 1993.

35. Shannon C. E. Communication Theory of Secrecy Systems. Bell Systems Technical Journal. July and Oct. 1948 // Claude Elwood Shannon. Collected Papers. IEEE Press. New-York. 1993.

36. Shannon C. E. Creative Thinking // Claude Elwood Shannon. Miscellaneous Writing. Mathematical Sciences Research Center. ATT. 1993.

37. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication. Bell Systems Technical Journal. July and Oct. 1948 // Claude Elwood Shannon. Collected Papers. IEEE Press. New-York. 1993.

38. Shannon C. E. A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits. MIT Department of Electrical Engineering. M.S. thesis. 1938.

39. Shannon C. E. Weaver Warren. The Mathematical Theory of Communication. Urbana. The University of Illinois Press. 1949.

Литература

1. More Trenchard. Interview on 28.11.2001 with Chiu E., Lin J., McFerron B.
2. Fano Robert. Interview on 01.11.2001 with Chiu E., Lin J., McFerron B.

3. Waldrop M., Mitchell «Claude Shannon: Reluctant Father of the Digital Age». 2001 (<http://www.technologyreview.com/magazine/jul01/waldrop.asp>).
4. Aspray William. Information: A Survey // *Annals of the History of Computing*. Vol. 7. 1985.
5. Shannon Claude E. Creative Thinking / Shannon C.E. Miscellaneous Writings. Mathematical Sciences Research Center. ATT. 1993.
6. Massachusetts Institute of Technology. Graduation Exercises. Class of 1940. 1940.
7. Povarov G. N. The First Russian Logic Machines. 2001 // www.taswegian.com/TwoHeaded/Part15.htm
8. Эрнфест П. Рецензия на книгу: Л. Кутюра. Алгебра логики. Одесса. Изд-во Mathesis // *Журн. рус. физ.-хим. об-ва. Физ. отд.* Т. 42. 1910. Отд. 2. Вып. 10. С. 582–587.
9. Owens Larry. The Text and Context of an Early Computer: Vannevar Bush and the Differential Analyzer. Princeton. 1984.
10. Symposium of Vannevar Bush at MIT. 2001 (<http://www.histech.rwth-aachen.de/www/quellen/bush/photos.htm>).
11. Vest Charles M. Interview on 29.11.2001 with Chiu E., Lin J., McFerron B.
12. Correspondence from Shannon to Bush. 13.12.1939 // Vannevar Bush Collection Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
13. Correspondence from Bush to E.B. Wilson. 15.12.1938 // Vannevar Bush Collection Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
14. Correspondence from Bush to E.B. Wilson. 18.12.1938 // Vannevar Bush Collection Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
15. Correspondence from Bush to B. Burks. 05.01.1939 // Vannevar Bush Collection Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
16. Hogben L. A. Matrix Notation for Mendelian Populations // *Properties of the Royal Society of Edinburg*. Vol. 53. 1933.
17. Kaiser Chris. Interview on 29.11.2001 with Chiu E., Lin J., McFerron B.
18. Kimura Motoo. Haldane's Contributions to the Mathematical Theories of Evolution and Populations Genetics // *Haldane and Modern Biology*. Ed. Dronamraju K.R. Johns Hopkins Press. 1968.
19. Correspondence from Burks to Bush. 10.01.1939 // Burks Barbara. Correspondences to Vannevar Bush. January 1939. Vannevar Bush Collection. Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
20. Correspondence from Bush to Shannon. 27.01.1939 // Bush Vannevar. Correspondence to Claude Shannon. Dec. 1938 through July 1940. Library of Congress. V. Bush Collection. Washington. USA.
21. Correspondence from Shannon to Bush 16.02.1939 // Correspondences to Vannevar Bush Dec. 1938 through July 1940. Vannevar Bush Collection. Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
22. Correspondence from Shannon to Bush. 18.12.1939 // Correspondences to Vannevar Bush Dec. 1938 through July 1940. Vannevar Bush Collection. Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.

23. Sloane N.J.A. and Wyner A. D. Notes to Parts C, An Algebra for Theoretical Genetics // Claude Elwood Shannon. Collected Papers. IEEE Press, Network. 1993.
24. Correspondence from Shannon to Bush. 08.03.1940 // Correspondences to Vannevar Bush Dec. 1938 through July 1940. Vannevar Bush Collection. Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
25. Correspondence from Shannon to Bush. 15.03.1940 // Correspondences to Vannevar Bush Dec. 1938 through July 1940. Vannevar Bush Collection. Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
26. Correspondence from Bush to Shannon. 27.01.1939 // Bush Vannevar. Correspondence to Claude Shannon. Dec. 1938 through July 1940. Library of Congress. V. Bush Collection. Washington. USA.
27. Correspondence from Bush to Burks. 27.01.1939 // Vannevar Bush Collection Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
28. Correspondence from Burks to Bush. 30.01.1939 // Burks Barbara. Correspondences to Vannevar Bush. January 1939. Vannevar Bush Collection. Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
29. Correspondence from Lowell J. Reed to Halbert Dunn. 09.04.1940 // Vannevar Bush Collection Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
30. Correspondence from Halbert Dunn to Bush. 19.04.1940 // Vannevar Bush Collection Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
31. Correspondence from Burks to Bush. 20.01.1939 // Burks Barbara. Correspondences to Vannevar Bush. January 1939. Vannevar Bush Collection. Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
32. Khan David. The Godebreakers. MacMillan. New-York. 1967.
33. Caldwell S.H. Switching Circuits and Logical Design. J. Wiley and Sons Inc. New-York. 1958.
34. AT&T Research Claude Shannon Biography. 2001 // www.research.att.com/~njas/doc/ces5.html.
35. Shannon Elizabeth (Betti). Interview on 29.11.2001 with Chiu E., Lin J., McFerron B.
36. Sutherland W. Interview on 27.11.2001 with Chiu E., Lin J., McFerron B.
37. Henry Ernst. Interview on 27.11.2001 with Chiu E., Lin J., McFerron B.
38. Price Robert. Interview on 1984 with IEEE Communication Journal.
39. Колмогоров А. Н. Предисловие // К. Шеннон. Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. под. ред. Добрушина Р. Л. и Лупанова О. Б. Предисловие Колмогорова А. Н. – М.: ИИЛ, 1963.
40. Левин В. И. К.Э. Шеннон и современная наука // Вестник Тамбовского гос. технического университета. 2008. Т. 14. № 3.
41. Левин В. И. Клод Эльвуд Шеннон – ученый и человек // Проблема конструктивности научного и философского знания. 2009. № 3.

References

1. More Trenchard. Interview on 28.11.2001 with Chiu E., Lin J., McFerron B.

2. Fano Robert. Interview on 01.11.2001 with Chiu E., Lin J., McFerron B.
3. Waldrop M., Mitchell «Claude Shannon: Reluctant Father of the Digital Age». 2001 (<http://www.technologyreview.com/magazine/jul01/waldrop.asp>).
4. Aspray William. Information: A Survey. *Annals of the History of Computing*, 1985, Vol. 7.
5. Shannon Claude E. Creative Thinking. Shannon C.E. Miscellaneous Writings. Mathematical Sciences Research Center. ATT. 1993.
6. Massachusetts Institute of Technology. Graduation Exercises. Class of 1940. 1940.
7. Povarov G. N. The First Russian Logic Machines. 2001. Available at: www.taswegian.com/TwoHeaded/Part15.htm
8. Erenfest P. *Recenziya na knigu: L. Kutyura. Algebra logiki. Odessa. Izd-vo Mathesis* [Report on Book: L. Kutyura. Logical Algebra. Odessa. Mathesis Publishing House]. *Zhurn. rus. fiz.-him. ob-va. Fiz. otd*, 1910, Vol. 42. Issue 10, pp. 582-587.
9. Owens Larry. The Text and Context of an Early Computer: Vannevar Bush and the Differential Analyzer. Princeton. 1984.
10. Symposium of Vannevar Bush at MIT. 2001. Available at: <http://www.histech.rwth-aachen.de/www/quellen/bush/photos.htm>.
11. Vest Charles M. Interview on 29.11.2001 with Chiu E., Lin J., McFerron B.
12. Correspondence from Shannon to Bush. 13.12.1939. Vannevar Bush Collection Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
13. Correspondence from Bush to E.B. Wilson. 15.12.1938. Vannevar Bush Collection Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
14. Correspondence from Bush to E.B. Wilson. 18.12.1938. Vannevar Bush Collection Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
15. Correspondence from Bush to B. Burks. 05.01.1939. Vannevar Bush Collection Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
16. Hogben L.A. Matrix Notation for Mendelian Populations. *Properties of the Royal Society of Edinburg*, 1933, Vol. 53.
17. Kaiser Chris. Interview on 29.11.2001 with Chiu E., Lin J., McFerron B.
18. Kimura Motoo. *Haldane's Contributions to the Mathematical Theories of Evolution and Populations Genetics. Haldane and Modern Biology*. Ed. Dronamraju K.R. Johns Hopkins Press. 1968.
19. Correspondence from Burks to Bush. 10.01.1939. Burks Barbara. Correspondences to Vannevar Bush. January 1939. Vannevar Bush Collection. Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
20. Correspondence from Bush to Shannon. 27.01.1939. Bush Vannevar. Correspondence to Claude Shannon. Dec. 1938 through July 1940. Library of Congress. V. Bush Collection. Washington. USA.
21. Correspondence from Shannon to Bush 16.02.1939. Correspondences to Vannevar Bush Dec. 1938 through July 1940. Vannevar Bush Collection. Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.

22. Correspondence from Shannon to Bush. 18.12.1939. Correspondences to Vannevar Bush Dec. 1938 through July 1940. Vannevar Bush Collection. Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
23. Sloane N.J.A. and Wyner A.D. Notes to Parts C, An Algebra for Theoretical Genetics. Claude Elwood Shannon. Collected Papers. IEEE Press, Network. 1993.
24. Correspondence from Shannon to Bush. 08.03.1940. Correspondences to Vannevar Bush Dec. 1938 through July 1940. Vannevar Bush Collection. Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
25. Correspondence from Shannon to Bush. 15.03.1940. Correspondences to Vannevar Bush Dec. 1938 through July 1940. Vannevar Bush Collection. Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
26. Correspondence from Bush to Shannon. 27.01.1939. Bush Vannevar. Correspondence to Claude Shannon. Dec. 1938 through July 1940. Library of Congress. V. Bush Collection. Washington. USA.
27. Correspondence from Bush to Burks. 27.01.1939. Vannevar Bush Collection Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
28. Correspondence from Burks to Bush. 30.01.1939. Burks Barbara. Correspondences to Vannevar Bush. January 1939. Vannevar Bush Collection. Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
29. Correspondence from Lowell J. Reed to Halbert Dunn. 09.04.1940. Vannevar Bush Collection Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
30. Correspondence from Halbert Dunn to Bush. 19.04.1940. Vannevar Bush Collection Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
31. Correspondence from Burks to Bush. 20.01.1939. Burks Barbara. Correspondences to Vannevar Bush. January 1939. Vannevar Bush Collection. Manuscript Division. Library of Congress. Washington. USA.
32. Khan David. The Godebreakers. MacMillan. New-York. 1967.
33. Caldwell S.H. Switching Circuits and Logical Design. J. Wiley and Sons Inc. New-York. 1958.
34. AT&T Research Claude Shannon Biography. 2001. Available at: www.research.att.com/~njas/doc/ces5.html.
35. Shannon Elizabeth (Betti). Interview on 29.11.2001 with Chiu E., Lin J., McFerron B.
36. Sutherland William. Interview on 27.11.2001 with Chiu E., Lin J., McFerron B.
37. Henry Ernst. Interview on 27.11.2001 with Chiu E., Lin J., McFerron B.
38. Price Robert. Interview on 1984 with IEEE Communication Journal.
39. Kolmogorov A.N. *Predislovie* [Foreword]. K. Shannon. Raboty po teorii informacii i kibernetike. Per. s angl. pod. red. Dobrushina R.L. i Lupanova O.B. Predislovie Kolmogorova A.N. Moscow: Izdatelstvo inostrannoy literatury, 1963.
40. Levin V. I. K.E. Shannon i sovremennaya nauka [C.E. Shannon and Modern Science]. Vestnik Tambovskogo gos. tehničeskogo universiteta, 2008, Vol. 14, no. 3.

41 Levin V.I. *Klod Elvud Shannon – ucheniy i chelovek* [Claude Elwood Shannon – Scientist and Person]. Problema konstruktivnosti nauchnogo i filosofskogo znaniya, 2009, no. 3.

Статья поступила: 7 декабря 2018 г.

Информация об авторе

Левин Виталий Ильич – доктор технических наук, профессор, PhD, Full Professor. Заслуженный деятель науки РФ. Пензенский государственный технологический университет. Область научных интересов: логика; математическое моделирование в технике, экономике, социологии, истории; принятие решений; оптимизация; теория автоматов; теория надежности; распознавание; история науки; проблемы образования. E-mail: vilevin@mail.ru

Адрес: 440039, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11.

UDC 519.711

Claude Elwood Shannon and 80th Anniversary of Discovery of Logical Theory of Discrete Computing and Control Devices

V. I. Levin

Relevance. In 2018, 80 years have passed since the discovery of the logical theory of discrete computing and control devices. This discovery, made by three outstanding scientists – A. Nakashima (Japan), K.E. Shannon (USA) and V.I. Shestakov (USSR), was of great importance for the whole of science. It opened the way for a new scientific discipline – cybernetics, making its theoretical base. Therefore, the development of the fundamental results of these discoverers remains an urgent task. **The purpose** of the article is to give a detailed review of the version of the logical theory of discrete devices and the version of the mathematical theory of communication proposed by K.E. Shannon, including the history of their discoveries, methodology, results and applications in various fields of science and technology. **Method.** To achieve this goal such methods are used: 1) study of the works of the scientist from primary sources and the scientific and historical literature, 2) study of the biography of the scientist according to the memoirs of contemporaries and scientific and biographical literature, 3) comparison of the works of the scientist with the works of other scientists in this field. **Result.** It has been established that K.E. Shannon was one of the first who showed the possibility of mathematical modeling of discrete computing and control devices using Boolean algebra of logic. This allowed the development of formalized methods for analyzing, synthesizing and designing such devices, which allow creating devices of great complexity. **Novelty.** It has been established that K.E. Shannon is one of the authors of the discovery, according to which the Boolean algebra of logic is an adequate mathematical apparatus for representing schemes of discrete devices. This discovery was published by him in June 1938. It allowed further development of constructive methods for analyzing, synthesizing and designing circuits for discrete computing and control devices. The scientist was also one of the first to propose a method for studying non-parallel-sequential (i.e., bridge) circuits and a method for decomposing complex circuits into subcircuits in order to overcome the “curse of dimension”. He is also the first discoverer of mathematical communication theory and information theory.

Keywords: logical theory, discrete devices, Boolean algebra, entropy, information, noise, communication system.

Information about Author

Vitaly Ilich Levin – Doctor of Technical Sciences, Full Professor. Honoured Scientist of Russia. Penza State Technological University. Field of Research: logic; mathematical modeling in technics, economics, sociology, history; decision making, optimization, recognition, automata theory, reliability theory, history of science, problems of education. E-mail: vilevin@mail.ru

Address: Russia, 440039, Penza, pr. Baydukova / Gagarin st., 1a/11.