

До 90-річчя від дня народження
академіка В.М. Глушкова

УДК 004.45;004.2

О.А. ЛЕТИЧЕВСЬКИЙ

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова Національної академії наук України
просп. Академіка Глушкова, 40, Київ, 03680, Україна

В.М. ГЛУШКОВ І СУЧАСНА ІНФОРМАТИКА від теорії автоматів до когнітивних архітектур

У статті розглянуто творчий науковий шлях видатного вченого ХХ ст., піонера в галузі інформатики й кібернетики академіка Віктора Михайловича Глушкова, відомого своїми науковими досягненнями світового значення в галузі математики, інформатики, кібернетики, обчислювальної техніки і програмування, створення ним потужних наукових шкіл за цими напрямками. Основну увагу приділено математичним роботам і архітектурним ідеям В.М. Глушкова, пов'язаним з інтелектуалізацією комп'ютерів та втіленням однієї з найяскравіших його мрій — створенням комп'ютерної моделі людського розуму.

В. Глушков: Придет такое время, когда будет возможен переход человеческого интеллекта и чувств, эмоций полностью в память электронной машины.

М. Стельмах: Виктор Михайлович, а вы сами хотели бы обрести бессмертие с помощью компьютера?

В. Глушков: Да, конечно да!

Кінофільм «Я — КИБЕРНЕТИК»

В ті часи, коли В.М. Глушков розпочав свій шлях у комп'ютерній науці, в нашій країні ще не було ні інформатики (у сучасному розумінні), ні комп'ютерної науки, ні навіть кібернетики (якщо не рахувати вкрай негативного ставлення до неї деяких філософів). Однак була вже обчислювальна техніка. У 1951 р. в Радянському Союзі під керівництвом академіка С.О. Лебедева було створено комп'ютер «МЭСМ». Це був перший у континентальній Європі комп'ютер з нейманівською архітектурою, і сталося це в Україні, в місті Києві,

біля руїн Пантелеймонівської церкви у Феофанії. МЭСМ працювала до 1956 р. За цей час на комп'ютері було проведено чимало важливих експериментів, розв'язано декілька задач, важливих для промисловості. На ньому працювали майбутні зірки радянської комп'ютерної науки О.А. Ляпунов, М.Р. Шура-Бура, К.Л. Ющенко.

Цього ж року до Києва приїхав молодий, але вже відомий алгебраїст, доктор фізико-математичних наук Віктор Михайлович Глушков. Він очолив лабораторію обчислювальної математики та обчислювальної техніки, в якій і було створено МЭСМ. На той час Сергій Олексійович Лебедев уже перебував

у Москві, керував там Інститутом точної механіки та обчислювальної техніки, де розробляли нові проекти обчислювальних машин.

На чолі невеликого колективу творців першої обчислювальної машини В.М. Глушков розпочав свою грандіозну роботу зі створення нової науки та її застосувань. Швидко освоївши все, що було зроблено на той час у теорії та практиці обчислювальних машин, він на багато років уперед спланував свою діяльність у цій галузі. Віктор Михайлович до кінця свого життя неухильно йшов за цим планом, гнучко пристосовуючись до обставин, які постійно змінювалися, і дотримуючись одного зі своїх головних принципів — єдності далеких і близьких цілей. Далекою метою було завоювання лідерства в новій галузі науково-технічної діяльності, великі перспективи якої В.М. Глушков побачив із самого початку, та розкриття за допомогою комп'ютерів найбільшої таємниці природи — таємниці людського розуму.

Першим завданням стало створення потужного творчого колективу, з яким можна було б просуватися вперед. Одночасно потрібно було завоювати підтримку суспільства та розуміння проблем, які виникають у зв'язку з необхідністю розвитку обчислювальної техніки та її застосувань.

Активна пропаганда основ комп'ютерної науки, підготовка кадрів у Київському університеті та Політехнічному інституті, правильний вибір тематики фундаментальних досліджень, швидке встановлення дружніх і наукових контактів, плідна взаємодія із суміжними галузями науки. Результатом усіх цих зусиль стало те, що невелика лабораторія вже через рік перетворилася на Обчислювальний центр АН УРСР, а ще через короткий час — на Інститут кібернетики, один із найбільших науково-технічних центрів у Радянському Союзі, широко відомий у світовій комп'ютерній спільноті.

В.М. Глушков та його наукова школа зробили вагомий внесок у світову комп'ютерну науку, ці здобутки широко застосовують у сучасній інформатиці. Парадигми та ідеї, висунуті В.М. Глушковым, детально про-

аналізовано в монографії Ю.В. Капітонової, О.А. Летичевського «Парадигмы и идеи академика В.М. Глушкова», виданій до 80-річчя з дня його народження. Минуло 10 років. Комп'ютерні технології нестримно розвивалися. Безпаперова інформатика, про яку Віктор Михайлович писав у своїй останній книзі (В.М. Глушков «Основы безбумажной информатики», 1981), стає буденною реальністю. Здійснюються мрії, до яких прагнув у своїх дослідженнях і технічних розробках В.М. Глушков.

Наукові інтереси Віктора Михайловича охоплювали майже всі сфери інформатики, але найголовнішими були такі напрями:

- математичні основи інформатики;
- архітектура комп'ютерів та їх внутрішній інтелект;
- застосування комп'ютерних технологій до вирішення завдань народного господарства.

Його задуми завжди випереджали свій час. Однак він жив і працював у середовищі, де діяли досить великі обмеження. Відставання Радянського Союзу в технології виготовлення електронних схем та рівняння на західні комп'ютерні архітектури призвели до того, що всім його блискучим задумам у галузі комп'ютерної техніки не судилося бути втіленими до кінця. Проект ЗДАС (Загальнодержавна автоматизована система управління економікою), завдяки якому в Радянському Союзі ще в 70-ті роки ХХ ст. міг з'явитися Інтернет, а соціалістична система господарювання могла б тривати ще багато років, потребував таких неймовірних зусиль і зіткнувся з таким жорстким опором, який не в змозі були подолати ані Глушков, ані його численні прихильники.

І все ж таки було створено машини серії МИР, перші персональні комп'ютери 60-х років, у 80-ті роки за ідеями В.М. Глушкова було побудовано макроконвеєр — першу багатопроцесорну систему з розподіленою пам'яттю та універсальною системою зв'язку (прообраз сучасних багатопроцесорних кластерних систем), було реалізовано багато інших оригінальних комп'ютерних проєктів. Ідеї В.М. Глушкова з автоматизованого

управління економікою розповсюджувалися в Радянському Союзі і соціалістичних країнах, чому неабиякою мірою сприяли ентузіасти та прихильники цих ідей, які й нині не втратили свого значення та активно обговорюються спеціалістами.

Через усі ці обставини найбільш завершеними виявилися роботи В.М. Глушкова, пов'язані з математичними основами інформатики. Його праці з теорії автоматів, дискретних перетворювачів, паралельних обчислень лягли в основу сучасної інформатики, їх використовують під час створення нових комп'ютерних технологій, продовжують розвивати у нових сучасних проектах, у тому числі в Інституті кібернетики ім. В.М. Глушкова та Кібернетичному центрі Національної академії наук України.

Про академіка В.М. Глушкова та його творчість написано багато статей, книг та спогадів. У цьому нарисі ми намагалися більш докладно розглянути його математичні роботи й архітектурні ідеї, пов'язані з інтелектуалізацією комп'ютерів та втіленням однієї з найяскравіших і найдалекоглядніших мрій Віктора Михайловича — створенням комп'ютерної моделі людського розуму. Актуальність розгляду його діяльності саме в такому аспекті зумовлена тим, що останнім часом значно активізувалися дослідження, спрямовані на моделювання людського мозку. Інтерес до цієї проблеми стимулюється успіхами нейробіології, які дають змогу досить точно вивчати поведінку окремої нервової клітини, так само, як і поведінку ансамблів нейронів. Оголошено про низку амбіційних проектів, що ставлять за мету повну реконструкцію людського мозку в електронному вигляді. Як приклад можна навести проект Blue Brain, який започаткувала фірма ІВМ, європейський проект Human Brain Project (НВР) та багато інших. Російський бізнесмен Дмитро Іцков запропонував проект «Аватар», метою якого є перенесення особистості людини на альтернативні носії. Згідно з цим проектом, до 2020 р. буде створено штучну копію людського тіла, яка керуватиметься думкою за



Віктор Михайлович Глушков

допомогою нейроінтерфейсу; після 2025 р. буде можливим пересаджувати електронну копію мозку людини після її смерті; після 2035 р. — пересаджувати свідомість людини, а у 2045 р. тіло з людським мозком матиме вигляд голограми. Наскільки цей проект виявиться реалістичним, покаже час, але достовірним є той факт, що на сьогодні ми знаємо набагато більше, ніж 30 років тому, за часів Глушкова, і маємо змогу серйозно обговорювати такі проблеми.

1956 рік був визначальним для комп'ютерної науки. Цього року вийшов друком збірник статей «Автомати» за редакцією К. Шеннона та Дж. Маккарті. У найкоротший термін його було перекладено російською мовою. У цьому збірнику опубліковано перші роботи з теорії автоматів, яка тільки народжувалася. В.М. Глушков, одразу ж відчувши фундаментальне значення цієї теорії для розгортання досліджень у комп'ютерній науці, негайно взяв її на озброєння. Цього ж року сформувалася Дортмундська група — Дж. МакКарті (John McCarthy), М. Мінський (Marvin Lee Minsky), А. Ньюел (Allen Newell)

і Г. Саймон (Herbert A. Simon), яка визначила штучний інтелект як науку і впродовж багатьох років на Заході була «законодавцем мод» у цьому напрямі.

Шлях, який обрав В.М. Глушков, дещо відрізнявся від західного. Свої погляди на нову для Радянського Союзу науку (тоді вона була ще просто «обчислювальна математика та техніка») він висловив у статті «О некоторых задачах вычислительной техники и связанных с ними задачах математики» (Украинский математический журнал, 1957, № 4). Ця стаття визначила не лише близькі, а й далекі цілі комп'ютерної науки й стала основою для подальших досліджень в Україні. У ній вперше з'являється ідея співвіднесення комп'ютера та людського мозку, яка згодом втілювалася в ідею «мозкоподібних архітектур». Зіставляючи машину і мозок, Глушков пише:

«Не подлежит сомнению, например, что в мозгу нет ничего похожего на арифметическое устройство последовательного, а тем более параллельного действия. Говоря не вполне точно, машина сводит логические операции к арифметическим, тогда как в мозгу это происходит как раз наоборот. Поэтому, намного превосходя человека в скорости выполнения арифметических операций, машина не имеет столь же значительного превосходства над ним в скорости выполнения операций логического характера. В свете всего сказанного становится ясным огромное практическое значение глубокого проникновения в закономерности работы мозга».

У цій же статті було сформульовано основну проблему, яку потрібно вирішити для того, щоб наблизитися до розв'язання задач штучного інтелекту. Це — пошук нових принципів побудови архітектур обчислювальних машин. Над цією проблемою, яка згодом дістала назву «інтелектуалізація комп'ютерів», Віктор Михайлович працював усе своє життя і зробив тут чимало цікавих відкриттів.

Першою спробою вирішення інтелектуальних задач була перевірка в 1958 р. на машині «Урал-1» тотожностей у лівих алгебрах, доведених у дисертації А.І. Ширшова, опонентом якої був В.М. Глушков. Це були перші експерименти в комп'ютерній алгебрі,

яка тільки-но розпочала свій розвиток. Другим цікавим експериментом, проведеним у той самий час, була програма навчання машини розпізнаванню осмисленості простих речень російської мови.

Основні праці з теорії автоматів В.М. Глушков написав у 1959–1960 рр. Він рухався одночасно у двох напрямках. Перший був орієнтований на математиків. У ньому теорія абстрактних автоматів розглядалася як математична теорія, що використовує абстрактно-алгебраїчні побудови. Було винайдено оригінальні алгоритми аналізу та синтезу скінченних автоматів (в основу алгоритму синтезу покладено поняття, яке пізніше дістало назву «автомат Глушкова»). Встановлено зв'язки з відомими математичними проблемами (мала проблема Бернсайда та ін.), започатковано основи теорії групових та напівгрупових автоматів тощо. Другий напрям було орієнтовано на прикладних математиків та інженерів — створювачів цифрової апаратури. У 1962 р. вийшла монографія В.М. Глушкова «Синтез цифровых автоматов», яка відіграла визначну роль у розповсюдженні формалізованих методів проектування серед інженерів та підвищенні їхньої математичної культури. На цій книзі було виховано кілька поколінь фахівців у галузі комп'ютерної техніки. У 1964 р. за роботи з теорії автоматів Віктора Михайловича Глушкова було удостоєно Ленінської премії.

Важливу роль у становленні теорії автоматів відіграв тематичний семінар за цією проблематикою, який почав функціонувати з 1959 р. і продовжує свою діяльність понині. Основними учасниками семінару були Ю.В. Капітонова, О.А. Летичевський, В.Г. Боднарчук, В.Н. Редько, П.І. Андон та інші учні В.М. Глушкова. Згодом кожен з них створив власний науковий напрям, продовжуючи розвивати й збагачувати автоматно-алгебраїчні методи як у теоретичних, так і в прикладних галузях інформатики, у тому числі й у програмуванні.

Одразу відчувши фундаментальну роль теорії автоматів у розвитку всієї кібернетики, В.М. Глушков почав шукати найрізнома-

нітніші сфери її застосування, крім найбільш очевидних — проектування комп'ютерів та математика. І передусім його зацікавили проблеми штучного інтелекту. Наприкінці 50-х — на початку 60-х років найактуальнішими були дослідження з вивчення самоорганізації та самовдосконалення. На шляху вирішення саме цих завдань Віктор Михайлович бачив можливість розкрити багато таємниць процесу мислення, якнайглибше проникнути в структуру та закономірності роботи мозку. Він застосовує теоретико-автоматний підхід для побудови основних понять математичної теорії самоорганізації, долучається до розроблення проблеми розпізнавання та абсолютно нової на той час теорії перцептронів, організовує наукову групу з вивчення проблем розпізнавання образів.

У 1961 р. у Києві відбувся симпозіум «Принципи побудови самонавчальних систем», на якому було представлено роботи молодого кібернетичної школи В.М. Глушкова. Симпозіум привернув увагу відомих фахівців-кібернетиків з усієї країни, і саме з цього часу майбутній Інститут кібернетики української Академії наук почав утверджувати своє лідерство в галузі кібернетики та обчислювальної техніки.

У 1962 р. було видано невелику книжку В.М. Глушкова «Введение в теорию самосовершенствующихся систем», в якій він надав досить повний огляд результатів тогочасних досліджень у цій галузі. Невдовзі цей матеріал увійшов до монографії «Введение в кибернетику» (1964), де було окреслено новий погляд на кібернетику як науку про перетворення та перетворювачі інформації. Цей погляд значно розширював вінерівське визначення кібернетики і містив сучасні уявлення про комп'ютерну науку та інформатику. Впродовж багатьох років цю монографію вважали найкращим у світовій науковій літературі введенням до кібернетики.

Поряд з вирішенням теоретичних проблем уже на найраніших стадіях розвитку теорії автоматів колектив молодих учених під керівництвом В.М. Глушкова почав працювати над її застосуванням. Усі основні алго-

ритми технології розроблення електронних схем на основі теорії скінченних автоматів були реалізовані на машині «Київ» і стали основою Малої системи автоматизації синтезу цифрових автоматів. Наступним етапом застосування теорії автоматів повинна була стати мала обчислювальна машина МИР (*машина для инженерных расчетов*).

Проект першої машини, що заклала основу майбутньої серії малих обчислювальних машин МИР, був унікальним за своєю суттю. У ньому поєднувалися кілька ідей, висунутих його геніальним творцем В.М. Глушковым. Перша ідея полягала в тому, щоб синтезувати як цифровий автомат електронний калькулятор, який уміє не лише виконувати арифметичні дії, а й обчислювати інтеграли, розв'язувати (чисельно) диференціальні рівняння тощо. Після того, як стало зрозуміло, що треба створювати машину з достатньо розвиненою вхідною мовою, першу ідею було доповнено ідеєю апаратної інтерпретації мови високого рівня, вже випробуваною в попередньому проекті машини «Україна». При цьому розуміння апаратурою мови високого рівня розглядалося як шлях до підвищення внутрішнього інтелекту обчислювальної машини.

Вхідна мова перших машин серії МИР була орієнтована на чисельні методи розв'язання науково-технічних задач. Тому вона включала звичайні засоби імперативного програмування, типові для таких мов, як Алгол або Фортран, але водночас допускала використання в арифметичних виразах скінченних та нескінченних сум і добутків, а також виразів з інтегралами. Допускалися також рекурсивні функціональні визначення. Оскільки мова апаратно інтерпретувалася, то можна було застосовувати числа з довільною розрядністю, якою можна було керувати. Передбачався також інтерактивний режим роботи із застосуванням телевізійного монітора, що було новим для техніки того часу, зручні засоби візуалізації результатів обчислень у вигляді таблиць і графіків.

Мені (автору статті) пощастило бути причетним до багатьох прикладних проектів, які

виконували в Інституті кібернетики, тому я добре пам'ятаю, як усе це відбувалося. Проект машини МИР-1 вирізнявся величезним творчим напруженням і якнайтіснішою взаємодією фахівців різного профілю. Пам'ятаю, як народжувалася вхідна мова машини МИР-1. У колективі я був «самым язукатым» і тому найбільше працював над розробленням мовних засобів різного рівня. Після інтенсивних мозкових штурмів, що надихалися безмежною науковою фантазією Віктора Михайловича, приймали чергові рішення щодо структури мови, потім перевіряли їх на прикладах конкретних завдань. Спочатку мова розвивалася в напрямі алгебраїчних специфікацій обчислювальних схем. Юрій Володимирович Благовіщенський пропонував усе нові й нові обчислювальні методи, а Алла Дородніцина записувала відповідні визначення в мові. І щоразу чогось не вистачало. Наприклад, допустимі схеми рекурсивних визначень дозволяли записати просту ітерацію для розв'язання систем лінійних рівнянь, але як бути із зейделівською? Я, як теоретик, черпав ідеї з відомої в той час книги Р. Петера «Рекурсивні функції» і незабаром усі стандартні типи рекурсій (поворотна, зворотна та ін.) було включено в мову. І все ж труднощі залишалися. Переломний момент настав тоді, коли академік А.О. Дородніцин порадив включити в мову оператор переходу, тобто зробити крок у напрямку до традиційних мов типу Фортран або Алгол. Ми весь час цього остерігалися, намагаючись залишатися на рівні математичних визначень, адже ми розробляли машину з високим рівнем інтелекту. Однак після того, як мова була збагачена потужними математичними засобами, зробити невеликий крок назад виявилось зовсім не страшно. Цей крок було зроблено, і мова набула завершеного і досконалого вигляду. Вийшла оригінальна мова програмування високого рівня, яка органічно поєднувала парадигму формульного обчислювача, функціональну і процедурну парадигми.

Наступним етапом було збагачення вхідної мови можливістю працювати не лише з

числами, а й з математичними виразами та формулами. Мова АНАЛІТИК, створена наприкінці 60-х років, була однією з перших мов комп'ютерної алгебри. Крім розвиненого апарату маніпулювання символічною інформацією, у ній вперше було застосовано перетворення алгебраїчних виразів за допомогою систем переписуючих правил в семантично складній алгебрі, що містила фактично всі основні функції математичного аналізу аж до символічного інтегрування аналітичних виразів.

Мова АНАЛІТИК була відомою в зарубіжному науковому співтоваристві й мала вплив на подальший розвиток засобів комп'ютерної алгебри. У 1968 р. колектив створювачів машин серії МИР було нагороджено Державною премією СРСР.

Незважаючи на те, що теоретико-автоматні методи використовували під час проектування внутрішнього математичного забезпечення машини МИР, початкову ідею В.М. Глушкова про представлення всього проекту як композиції невеликого числа скінченних автоматів та застосування до них формальних методів синтезу цілком реалізувати не вдалося. Річ у тому, що методи синтезу скінченних автоматів побудовано на алгоритмах, які потребують окремого розгляду кожного стану і кожного вхідного символу автомата. Разом з тим, якщо у складі пристрою є кілька регістрів, то кількість станів буде експонентою від розрядності, помноженої на кількість регістрів. Тому для алгоритмічної підтримки розроблення таких пристроїв потрібно було знайти інший підхід, що формалізував би блочний та алгоритмічний етапи проектування комп'ютерів.

Такий підхід В.М. Глушков запропонував у 1965 р. у роботах «Теория автоматов и вопросы проектирования структур вычислительных машин» та «Теория автоматов и формальные преобразования микропрограмм». У першій з них було запропоновано модель комп'ютера, складену з двох взаємодіючих автоматів – керуючого та операційного. При цьому операційний автомат визначався як сукупність скінченних або нескінченних ре-

гістрів разом із заданими на них періодично-визначеними перетвореннями, тобто перетвореннями, що визначаються періодично повторюваними схемами та зв'язками між розрядами регістрів. Локальний характер перетворення та його періодичність щодо розрядів робить це визначення наближеним до конструкцій, які застосовують на практиці. Використання нової моделі дозволило сформулювати та знайти рішення нових задач, які не могли бути розв'язані за допомогою теорії скінченних автоматів.

Друга робота поклала початок новому напрямку в теоретичній кібернетичі — теорії формальних перетворень програм та мікропрограм на основі алгебри алгоритмів. Розглянута В.М. Глушковым композиція двох взаємодіючих автоматів є окремим випадком загального поняття дискретного перетворювача, яке було в подальшому досліджено у працях Віктора Михайловича та його учнів. Ці роботи розвивалися у двох напрямках: перший — дослідження абстрактно-алгебраїчних задач, таких як розпізнавання еквівалентності, оптимізація за часом роботи, вивчення напівгрупових співвідношень тощо; другий напрям — розроблення прикладних систем автоматизації проектування комп'ютерів, мов для опису алгоритмів функціонування пристроїв, методів та алгоритмів.

У 70-х роках було створено систему ПРОЕКТ автоматизації проектування комп'ютерів спільно з їх математичним (програмним) забезпеченням. Теоретичну основу цієї розробки становили теорія дискретних перетворювачів та алгебра алгоритмів. У 1965 р. В.М. Глушков називав її мікропрограмною алгеброю, використовують також термін «система алгоритмічних алгебр», САА. Алгебра алгоритмів являє собою двохосновну алгебру, що складається з алгебри операторів та алгебри умов. Оператори — це часткові перетворення множини станів даних (зазвичай станів пам'яті програми або станів мікропрограмного операційного пристрою в моделі обчислювальної системи Глушкова). Умови — це часткові одномісні

предикати, також визначені на множині станів даних. На алгебрі умов визначено пропозиційні зв'язки, що діють так, як у алгебрі Кліні (найслабше визначені диз'юнкція та кон'юнкція, з тим, щоб зберегти монотонність). Внутрішня операція алгебри операторів — напівгрупове множення, а дві зовнішні операції алгебри операторів, що пов'язують її з алгеброю умов, — це умовний вибір та умовна ітерація. Нарешті, справжнім відкриттям був винахід операції множення оператора на умову: Pa істинне, якщо a буде істинне після завершення оператора P (зауважимо, що темпоральна логіка, до якої належить ця операція, перебувала тоді в самому зародку). Наявність такої операції дала можливість довести теорему аналізу: *будь-яка програма з переходами може бути представлена в регулярному вигляді*, тобто як оператор алгебри алгоритмів з тим самим інформаційним середовищем та породжуючими операторами й умовами.

Значний внесок у розвиток алгебри алгоритмів та її застосувань до автоматизації й проектування програмних систем на основі формальних перетворень зробили К.Л. Ющенко та Г.О. Цейтлін. Написану ними разом з В.М. Глушковым монографію «Алгебра. Языки. Программирование» було багато разів перевидано і перекладено за кордоном.

У 1970 р. в журналі «Кібернетика» було опубліковано статтю В.М. Глушкова «Некоторые вопросы теории автоматов и искусственного интеллекта». У цій роботі вперше теорія автоматів поєднувалася з проблематикою штучного інтелекту. І об'єднавчою ідеєю виступила ідея розвитку формальних математичних мов, яких потребують нові прикладні галузі, що поступово відкривалися з розвитком кібернетики та обчислювальної техніки.

Ось як виглядало обговорення цієї ідеї. В.М. Глушков починає з проблем поєднання теорії та практики і пропонує свій погляд на те, як довільна прикладна, емпірична наука перетворюється на дедуктивну (математичну). Перший етап — створення формальної

мови для опису понять і процесів, які вивчає певна наука. Мова має найповніше відповідати колу понять цієї науки. Віктор Михайлович наводить приклад:

«Хотя, например, в принципе язык алгоритмов Поста и машин Тьюринга достаточен для описания произвольных вычислительных процедур, никому не придет в голову использовать эти языки для программирования на ЭЦМ. Для этих целей созданы и создаются специальные языки (АЛГОЛ, ФОРТРАН и др.). <...> Однако для превращения эмпирической науки в дедуктивную недостаточно одного лишь формального языка. Необходимо иметь алгебру языка, позволяющую производить эквивалентные преобразования выражений в этом языке».

Отже, другий етап полягає у створенні алгебри. Для алгоритмічних мов — це, звичайно, алгебра алгоритмів Глушкова, яку було запропоновано для формалізації алгоритмічного етапу проектування електронних схем і яка згодом перетворилася на алгебру імперативних мов програмування. Третій етап перетворення емпіричної науки на дедуктивну — це постановка та вирішення задач оптимізації.

«Критерии оптимизации могут быть не только точными количественными, но и качественными, условными. Например, в анализе выражение функции через квадратуры считается обычно более хорошим, чем представление ее дифференциальным уравнением с теми или иными начальными условиями».

Сучасні мови програмування В.М. Глушков розглядає як розвиток звичайної математичної символіки.

«Не трудно понять, что развитие общих алгоритмических языков и алгебры таких языков приведет к тому, что выражения в этих языках (сегодняшние программы для ЭЦМ) станут такими же привычными, понятными и удобными, какими сегодня являются аналитические выражения. При этом фактически исчезнет разница между аналитическими и общими алгоритмическими методами, что приведет к коренному изменению облика самой математики. <...> Подобное изменение лица математики будет иметь колоссальное значение для развития всех наук, в том числе и тех,

которые сегодня почти не пользуются математикой».

Великий кібернетик не помилявся. Комп'ютерна техніка сьогодні стала повсюдною, всюдисущою (ubiquitous). Хоча комп'ютерні пристрої, якими ми користуємось у повсякденному житті, не потребують глибоких комп'ютерних знань, алгоритмічне мислення стає зрозумілим широкому колу непрофесіоналів (тим більше, що інформатику тепер викладають уже в молодших класах середніх шкіл). Що ж до професіоналів, то нині професія програміста є однією з найпопулярніших, а застосування формальних методів, основи яких було закладено в роботах В.М. Глушкова, вже давно стало невід'ємною складовою сучасних комп'ютерних технологій.

Переходячи до проблем штучного інтелекту, В.М. Глушков зупиняється на двох проблемах: розпізнавання смислу речень російської мови (про роботи в цьому напрямі ми вже згадували вище) та автоматичне доведення теорем математики. Автоматичне доведення теорем він розглядав як найкращу задачу для моделювання розумової діяльності людини. На той час в Інституті кібернетики у відділі, яким керував В.М. Глушков, уже розпочали дослідження з автоматичних доведень і одержали перші результати. Більшість відомих підходів до побудови алгоритмів пошуку доведень ставлять за мету побудову універсального алгоритму, який був би придатний для доведення всіх теорем будь-яких аксіоматичних теорій (першого порядку), виражених у класичній логічній мові.

В.М. Глушков виступив з критикою такого підходу. По-перше, будувати універсальний алгоритм для вирішення всіх задач одразу нелогічно. По-друге, пошук доведення складних теорем має здійснюватися у тісній співпраці людини й комп'ютера, для чого потрібно розробити **мову прикладної математичної логіки**, наближену до натуральної професійної мови математика. В.М. Глушков окреслив основні характеристики такої мови та запропонував внести до неї деякі риси сучасних алгоритмічних мов. Наприклад, опе-

ратор присвоєння $G :=$ група пропонується тлумачити як припущення «нехай G є група». Далі пропонується розробити спеціальний **алгоритм очевидності**, який перевірятиме істинність тверджень формальної мови без глибокого перебору, притаманного універсальним алгоритмам.

Тепер система взаємодії математика з комп'ютером може виглядати так. Математик пише текст у формальній мові. Цей текст містить означення, припущення, теореми, леми тощо. Інтерактивна система аналізує текст, написаний математиком, і перевіряє його коректність за допомогою алгоритму очевидності. Якщо певний крок у доведенні не є очевидним для алгоритму очевидності, система пропонує пояснити цей крок більш детальним доведенням. Якщо ж у доведенні є помилка, знайдена алгоритмом очевидності, система пропонує виправити її. У такий спосіб система допомагає створити коректний вивірений математичний текст. Система з часом повинна вдосконалюватися, покращуючи свій алгоритм очевидності. На деякому етапі можлива ситуація, коли очевидне для машини вже не буде очевидним для математика. Тоді системі можна буде дати більш складні завдання. Для пошуку доведення складних теорем користувач системи має можливість програмувати стратегії пошуку доведень або спростування гіпотез.

Знову повертаємось до формальних алгоритмічних мов, орієнтованих на сферу математичної діяльності. Ця мова може бути інтегрованою до мови практичної математичної логіки. Підсумовуючи статтю, В.М. Глушков пише:

«Непрерывное совершенствование алгоритма очевидности приведет рано или поздно к тому, что все теоремы, которые нам известны сегодня, станут очевидными с точки зрения машины. В этот период роль математика будет состоять преимущественно в определении новых понятий и в формулировке принципиально новых предложений, а искусство доказывать новую, машинно не очевидную теорему будет состоять прежде всего в умении сформулировать ряд промежуточных теорем и лемм, каждая из которых будет очевидна для машины».

Програму робіт у галузі автоматичного доведення теорем протягом наступних років здійснювали учні та послідовники Віктора Михайловича, продовжується вона й понині. Повний огляд робіт, виконаних за програмою «Алгоритм очевидності», опубліковано в 4-му ювілейному номері журналу «Кібернетика та системний аналіз» за цей рік.

Світова кібернетична спільнота поступово приходять до тих самих ідей, які були сформульовані В.М. Глушковым. Так, у 1973 р. розпочався проект Mizar, в якому було розроблено аналог алгоритму очевидності. З 1990 р. видається журнал «Формалізована математика», усі статті якого перевіряються системою Mizar. Серед систем автоматичного доведення теорем більшість є інтерактивними у тому розумінні, що мають засоби налаштування на бажані стратегії пошуку доведень. Універсальні системи поступаються місцем системам типу SMT (*Satisfiability Modulo Theory*) зі спеціалізованими алгоритмами для тих чи інших розвинутих теорій. Останніми роками системи автоматичного доведення (прувери) починають активно застосовувати в системах проектування софтверу для верифікації програмних систем та їх специфікацій.

Наприкінці 70-х — на початку 80-х років за ідеями В.М. Глушкова розпочали роботи зі створення нових архітектур багатопроекторних суперкомп'ютерів. Спочатку це була ідея рекурсивного комп'ютера, пов'язана з переглядом принципів фон Неймана (доповідь В.М. Глушкова зі співавторами на Всесвітньому конгресі IFIP у Стокгольмі в 1974 р.), згодом вона трансформувалася до більш практичної ідеї макроконвеєрної обчислювальної системи. Цю ідею було реалізовано у 80-х роках під керівництвом В.С. Михалевича, вже після смерті В.М. Глушкова. Було створено промислові зразки макроконвеєрної ЕОМ ЕС 2701, першої багатопроекторної обчислювальної системи з розподіленою пам'яттю та високою ефективністю розпаралелювання процесів розв'язання задач, розв'язано велику кількість науково-технічних, економічних, оптимізаційних задач

з рекордними на той час показниками ефективності та продуктивності. Швидкість 500 Мфлопс, одержана на макроконвеєрному комплексі, була для суперкомп'ютерів того часу рекордною.

Успіх проекту зумовлений тим, що для його виконання було зібрано потужний колектив фахівців різних профілів (інженери, системні математики, програмісти, спеціалісти з різних прикладних галузей). Багато учасників вже мали досвід співпраці під час створення машини МИР. У проекті макроконвеєра потрібно було винайти нові методи й технології розпаралелювання задач на системі з новою архітектурою, що містила значну кількість процесорів і дозволяла працювати з великими об'ємами розподілених даних. Значною мірою цьому сприяло плідне співробітництво системних і прикладних математиків. Істотний вплив на розроблення теоретичних засад макроконвеєрного програмування мали також нові схеми організації обчислень при розв'язанні задач дискретної оптимізації.

Помітним кроком у розвитку технології паралельного програмування стало створення системного математичного забезпечення макроконвеєрного обчислювального комплексу, який включав мову паралельного програмування МАЯК та операційну систему для багатопроцесорної системи з розподіленою пам'яттю.

Теоретичну основу розроблення становили автоматно-алгебраїчні методи та моделі розподілених обчислень, завдяки яким було створено нові методи розпаралелювання алгоритмів і програм, основи нової передової технології розв'язання задач. Апарат періодично-визначених перетворень виявився адекватним для моделювання обчислювальних систем не лише на рівні апаратури та мікропрограм, а й на рівні специфікації перетворень структур даних у багатопроцесорних системах. Розроблена з цією метою алгебра структур даних стала основним засобом проектування ефективних програм для багатопроцесорних комп'ютерів з розподіленою багаторівневою пам'яттю.

Конкретними результатами застосування цієї теорії були розроблення методології синтезу класів ефективних паралельних програм безпосередньо з функціональних специфікацій алгебри структур даних, побудова теорії макроконвеєрних обчислень функцій над структурами даних, а також створення теорії та алгебри алгоритмів для динамічного розпаралелювання послідовних програм. Подальший розвиток технології макроконвеєрних обчислень уже на сучасній суперкомп'ютерній техніці в Інституті кібернетики ім. В.М. Глушкова дозволив Інституту стати лідером у галузі технології високопродуктивних обчислень.

Підсумком досліджень 70–80-х років у галузі розроблення автоматно-алгебраїчних моделей та їх застосувань до вирішення актуальних проблем програмування і обчислювальної техніки стала монографія Ю.В. Капітонової та О.А. Летичевського «Математическая теория вычислительных систем», видана в 1988 р. За основну модель обчислювальної системи в цій монографії було взято поняття дискретної динамічної системи, тобто системи з нерозміченими переходами. Було показано, як шляхом деталізації та збагачення цієї моделі можна визначити основні поняття та одержати результати абстрактної і структурної теорії автоматів, теорії схем програм, моделі багатопроцесорних систем та основні конструкції побудови паралельних програм — як переходити від специфікації систем до їх реалізації, як виконувати еквівалентні перетворення обчислювальних систем тощо.

Подальший розвиток автоматно-алгебраїчних моделей пов'язаний з такими прикладними галузями, як алгебраїчне програмування, комп'ютерна алгебра, верифікація софтверних систем, когнітивні архітектури. Наприкінці 80-х років в Інституті кібернетики (вже імені В.М. Глушкова) було розроблено систему алгебраїчного програмування APS з вхідною мовою APLAN (мова алгебраїчного програмування). Відтоді на основі цієї системи було виконано багато експериментальних робіт, досліджень у комп'ю-

терній алгебрі, штучному інтелекті, моделей паралельних обчислень, а також розроблено прикладні системи.

У 90-х роках відбулися важливі зрушення в теоретичних основах обчислень. Центр уваги перемістився від функціональних моделей до моделей взаємодії в розподілених паралельних системах. Нове життя знайшли створені раніше алгебри та числення типу CCS, CSP, алгебра процесів, почали з'являтися нові моделі, в тому числі орієнтовані на такі сфери, як біологія, наприклад біологічна інформатика (мобільні амбієнти). В середині 90-х років виникла модель взаємодії агентів та середовищ (Д. Гільберт, О. Летишевський). Вона була відгуком на актуальну в той час ідею зсуву парадигм від обчислень до взаємодії і мала на меті також уніфікацію різноманітних підходів у теорії паралельних взаємодіючих процесів.

В основу моделі покладено поняття функції занурення та перетворення поведінки середовища, що виконується як результат рекурсивного занурення агентів у середовища різних рівнів. Функція занурення визначає композицію середовища і агента, результатом якої є нове середовище, готове для занурення інших агентів. Агенти й середовища розглядають як об'єкти різних типів, поведінка яких подається за допомогою транзитивних систем, стани яких розглядають з точністю до бісимуляційної еквівалентності. Середовище обмежує поведінку агента і може навіть його трансформувати, тому поведінка агента в середовищі істотно відрізняється від його поведінки, визначеної незалежно від середовища. Ця обставина зумовлює нову еквівалентність агентів, більш слабку порівняно з бісимуляційною: два агенти називають еквівалентними щодо заданого середовища, якщо вони визначають одне й те саме перетворення поведінки середовища. Єдиним обмеженням, що накладається на функцію занурення, необхідним для конструктивності, є неперервність (у придатній топології). Завдяки цьому обмеженню для визначення функцій занурення можна використовувати системи перепису-

вання (алгебраїчне програмування), числення, рекурсивні визначення.

Одним із основних прикладів середовища може бути комп'ютер, якщо його розглядати як середовище для програмних агентів. Занурення програми в комп'ютер змінює його поведінку і перетворює його на інше середовище. Перша програма (чи система програм), яка занурюється в комп'ютер, — це зазвичай операційна система (Windows, Unix і т.п.). Вона розширює можливості взаємодії комп'ютера з програмними агентами і зовнішнім середовищем користувача, яке надає програмні агенти для занурення в комп'ютер. Проста програма старого типу, яка отримує дані, відпрацьовує певний алгоритм і успішно завершує свою роботу, змінює поведінку середовища незначною мірою і лише на короткий час. Інша справа — пакети прикладних програм, постійно готові до отримання запитів (інший тип агентів, що занурюються в обчислювальне середовище) разом з даними для розв'язання задач відповідного класу. Це вже інший тип агентів, що занурюються в обчислювальне середовище. Занурення таких пакетів чи інтерактивних програм, що взаємодіють із зовнішнім середовищем, істотно змінює поведінку початкового середовища.

Іншим вражаючим прикладом складного середовища є Інтернет. Агенти в цьому середовищі не тільки взаємодіють між собою, але й мають властивість мобільності, можливість переміщуватися в просторі, створюваному середовищем. У телекомунікаційному середовищі, що підтримує мобільний зв'язок, переміщення агентів (мобільних телефонів) здійснюється фізично, а в Інтернеті — віртуально. Агенти і середовища можуть бути побудовані ієрархічно.

Інсерційне програмування — це розроблення програм, побудованих на базі моделі взаємодії агентів і середовищ. Важливою ознакою інсерційного програмування є недетермінованість поведінки агентів і середовищ, притаманна реальним системам, які моделюють за допомогою інсерційних програм. Тому реалізація систем інсерційного

програмування в загальному випадку потребує застосування моделюючих програм (симуляторів) замість інтерпретаторів, а також встановлення цілей для отримання конкретних результатів.

У системі інсерційного програмування, розробленій в Інституті кібернетики на базі системи алгебраїчного програмування APS, для подання агентів використовують мову дій. Основні конструкції цієї мови зводяться до кількох простих конструкцій, які містять, зокрема, послідовну й паралельну композиції поведінок агентів. До цього додається можливість рекурсивних визначень з використанням систем переписування, а також усі можливості базової мови програмування (в даному випадку — мови АПЛАН).

Інсерційне програмування охоплює розроблення не лише програмних агентів для визначеного, заздалегідь заданого середовища, а й самого середовища.

Подальший розвиток моделі взаємодії в поєднанні з методами алгебраїчного програмування сприяв створенню нових технологічних підходів у галузі розроблення софтверу — **інсерційного моделювання**. Теоретичні основи цього підходу було розроблено на початку 2000-х років.

Ідея моделювання в комп'ютерній інженерії набула особливо великого значення в останні роки. Від моделі до продукту — принцип, який усе ширше застосовують у софтверній індустрії. Інсерційне моделювання знайшло застосування у створенні системи VRS-верифікації програмних систем, розробленої для фірми «Моторола» за участю спеціалістів Інституту кібернетики.

У складі VRS є засоби статичного аналізу специфікацій, які оцінюють їх несуперечливість і повноту, а також засоби динамічного аналізу, що забезпечують генерацію та оброблення символічних і конкретних трас за правилами функціонування моделей системи. У системі VRS можна також генерувати тести для перевірки систем за їх вимогами та специфікаціями. Систему успішно застосовують для верифікації телекомунікаційних систем на різних рівнях керування, вбудованих сис-

тем та систем реального часу. Символьна верифікація і моделювання підтримуються дедуктивними засобами, що використовують технологію автоматичного доведення теорем.

Інсерційне моделювання є частиною загальної теорії взаємодії в інформаційних системах. Ідейним прототипом інсерційного моделювання слід вважати модель взаємодіючих керуючого й операційного автоматів, а також її розвиток у теорії дискретних перетворювачів 70-х років. У цих моделях система подається у вигляді композиції двох автоматів — керуючого та інформаційного. Керуючий автомат відіграє роль агента, а інформаційний — роль середовища, в яке занурено цей агент. Інсерційне моделювання можна розглядати як далекосяжне узагальнення поняття дискретного перетворювача. З інформаційним середовищем, яке було представлено операційним автоматом у моделі Глушкова, тепер взаємодіє не один керуючий автомат, а декілька автоматів-агентів, представлених більш загальним поняттям розміченої транзиційної системи. Агенти взаємодіють між собою та активним середовищем, також представленим транзиційною системою. Моделі макроконверсних паралельних обчислень, запропоновані В.М. Глушковым та досліджені у 80-х роках у контексті макроконверсної обчислювальної системи, ще більше наблизилися до сучасної моделі взаємодії агентів і середовищ. У цих моделях процеси, відповідні паралельно працюючим процесорам, можна розглядати як агенти, що взаємодіють у середовищі розподілених структур даних.

Подальші застосування інсерційного моделювання охоплюють когнітивні архітектури, які нині успішно розвиваються у зв'язку з побудовою моделі людського розуму. Когнітивні архітектури, або інтелектуальні агенти, — це напрям у розробленні штучного інтелекту, якому останніми роками приділяють значну увагу. Його метою є побудова моделі людського розуму, яка має такі самі універсальні можливості, як і людський розум. На відміну від спеціалізованих систем штучного інтелекту, здатних ефективно вирішувати специфічні класи завдань,

когнітивні архітектури повинні адаптуватися до різних нових, часто несподіваних ситуацій, що виникають під час взаємодії із зовнішнім середовищем, навчатися, ставити цілі, вдосконалювати свою поведінку тощо.

Чому саме інсерційне моделювання придатне для побудови когнітивної архітектури? Щоб пояснити це, розглянемо основні принципи інсерційного моделювання у неформальному викладі.

1. Світ є ієрархія середовищ і агентів, занурених у ці середовища.

2. Агенти і середовища є сутності, що еволюціонують у часі і мають спостережувану поведінку.

3. Занурення агента в середовище змінює поведінку цього середовища і породжує нове середовище, готове до занурення в нього нових агентів.

4. Середовище, відіграючи роль агента, може бути занурене в середовище вищого рівня (багаторівневі середовища).

5. Агенти можуть занурюватися в середовище із середовища вищого рівня, а також породжуватися внутрішніми агентами, вже зануреними в середовище раніше.

6. Агенти і середовища можуть моделювати інші агенти і середовища на різних рівнях абстракції.

Усі ці принципи спираються на точні математичні визначення і дозволяють обрати невелику кількість базових конструкцій для побудови когнітивної архітектури, як-от: рекурсивні визначення та локальні описи середовища для визначення поведінки агентів, а також інсерційні машини для моделювання середовищ за їхніми описами. Використання досить багатої логічної мови для опису властивостей станів дає можливість визначати різні рівні абстракції. Огляд основних робіт та останніх результатів у галузі інсерційного моделювання можна знайти в тематичному випуску журналу «Управляющие системы и машины» № 6, 2012.

Віктор Михайлович Глушков мріяв про мозкоподібні рекурсивні архітектури, але

для реалізації їх тоді не було ані придатної технічної бази, ані алгоритмічної основи. На нинішньому етапі, розвиваючи його ідеї і користуючись сучасними технічними можливостями, ми впритул наближаємося до вирішення основної кібернетичної проблеми — моделювання людського розуму.

Стаття надійшла 01.07.2013 р.

А.А. Летичевский

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова
Национальной академии наук Украины
просп. Академика Глушкова, 40, Киев, 03680, Украина

В.М. ГЛУШКОВ

И СОВРЕМЕННАЯ ИНФОРМАТИКА

от теории автоматов к когнитивным архитектурам

В статье рассмотрены творческий научный путь выдающегося ученого XX в., пионера в области информатики и кибернетики академика Виктора Михайловича Глушкова, известного своими научными достижениями мирового значения в области математики, информатики, кибернетики, вычислительной техники и программирования, создание им мощных научных школ по этим направлениям. Основное внимание уделяется математическим работам и архитектурным идеям В.М. Глушкова, связанным с интеллектуализацией компьютеров и воплощением самой яркой его мечты — созданием компьютерной модели человеческого разума.

А.А. Letichevskiy

Glushkov Institute of Cybernetics
of National Academy of Sciences of Ukraine
40 Glushkova Ave., Kyiv, 03680, Ukraine

V.M. GLUSHKOV AND MODERN INFORMATICS
from Automata Theory to Cognitive Architectures

Creative scientific way of outstanding scientist of the twentieth century academician Victor Mykhailovich Glushkov is considered in the paper. A pioneer in the field of informatics and cybernetics, academician Glushkov is known for his scientific achievements of the world level in the field of mathematics, computer science, cybernetics, computer engineering and programming, creating strong scientific schools for these areas. The main attention is paid to the mathematical works and architectural ideas of V.M. Glushkov, related to the intellectualization of computers and the implementation of one of his brightest dreams — creating a computer model of the human mind.