

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АРХИВ

УДК 519.7

MSC 01A75, 93-03

Машинное обучение и искусственный интеллект в работах В. А. Якубовича

А. Л. Фрадков

Институт проблем машиноведения РАН,
Российская Федерация, 199178, Санкт-Петербург, Большой пр. В. О., 61
Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Для цитирования: *Фрадков А. Л.* Машинное обучение и искусственный интеллект в работах В. А. Якубовича // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2021. Т. 8 (66). Вып. 4. С. 620–624. <https://doi.org/10.21638/spbu01.2021.407>

Данная заметка предваряет первую часть повторной публикации статьи В. А. Якубовича «Машины, обучающиеся распознаванию образов», впервые опубликованной издательством Ленинградского университета в сборнике «Методы вычислений» в 1963 году.

Ключевые слова: история математики, машинное обучение, искусственный интеллект.

Одной из первых задач, выявившей реальную потребность в построении искусственных систем с интеллектуальными возможностями, была задача о распознавании образов, зародившаяся в середине XX в. в США. Первым ответом на этот вызов был так называемый персептрон, предложенный в 1957 г. американским ученым Ф. Розенблаттом. Ключевым элементом персептрона являлся алгоритм настройки параметров (весов) функционального преобразователя, осуществляющего классификацию входных сигналов. Заявленный как кибернетическая модель мозга, персептрон стал родоначальником современных искусственных нейронных сетей.

В 1963 г. основатель кафедры теоретической кибернетики ЛГУ (ныне — СПбГУ) и один из основоположников современной кибернетики Владимир Андреевич Якубович опубликовал статью [1] в сборнике «Методы вычислений», издававшемся в издательстве Ленинградского университета, где впервые дал строгие математические постановки и результаты по обучению машин распознаванию образов. По сути, это была первая математическая работа в области машинного обучения в СССР

и России, опередившая публикации московских математиков В. Н. Вапника и А. Я. Червоненкиса, считающихся одними из основателей теории машинного обучения в СССР и в мире [2]. Парадоксально, но названия статей В. Н. Вапника 1973 г. [3] и В. А. Якубовича 1963 г. совпадают! В дальнейшем В. А. Якубович опубликовал еще несколько статей на эту тему [4–6], а потом предложил использовать алгоритмы обучения (настройки, адаптации) в качестве алгоритмов адаптации регуляторов для управления априорно неизвестными динамическими системами. Этот подход был развит в научной школе В. А. Якубовича и привел к появлению в 1960-х гг. первой математической теории адаптивных систем управления [7, 8]. Применение этой теории приводит к построению регуляторов, параметры которых не рассчитываются заранее по известным конструктору данным объекта управления, а подстраиваются по мере накопления информации о реакции объекта на подаваемые на его вход управляющие воздействия. На основе новой теории был решен целый ряд прикладных задач [9–11].

В дальнейшем теория обучающихся и адаптивных систем была распространена на многочисленные задачи обучения и адаптации автоматических систем и стала важной частью научной области искусственного интеллекта в его современном понимании. К ее достоинствам можно отнести еще и то, что разработанные в ее рамках алгоритмы, помимо эффективности, обладают простотой и удобством технической реализации. В настоящее время распознающие системы широко применяются (от идентификации человека по фотографии его зрачка до автоматического распознавания печатных и рукописных текстов). Искусственные нейронные сети активно используются для решения сложных задач в различных отраслях техники — там, где строгое математическое описание либо весьма громоздко, либо вообще отсутствует. Машинное обучение на основе искусственных нейронных сетей стало основой для новой волны приложений систем искусственного интеллекта во многих областях науки и техники, экономики, медицины и др. Адаптивные системы используются при управлении летательными аппаратами, технологическими процессами, робототехническими системами и др. Один из первых в стране и в мире адаптивных роботов был построен на кафедре теоретической кибернетики ЛГУ под руководством В. А. Якубовича еще в 1974 году.

Статья В. А. Якубовича 1963 г. предвосхитила развитие целого направления в области интеллектуальных систем, которое в последние годы приобрело большую значимость и популярность. Но она имеет не только историческую ценность. Автор излагает не только новый для тех лет математический формализм, но и поясня-

МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

ВЫПУСК II



ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛЕНИНГРАДСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
1963

ет приемы формализации: почему в каких-то случаях рассматривается гильбертово пространство, а в каких-то — евклидово, почему важно свойство выпуклости множеств, представляющих понятия и т. д. Эти приемы поучительны и полезны и для современных исследователей, а полученные в статье математические результаты сегодня малоизвестны и заслуживают введения в математический оборот. Своеобразный авторский стиль классика науки также интересен и поучителен. Наконец, в статье обсуждаются вопросы распознавания не только зрительных и слуховых образов, которым уделялось большое внимание в исследованиях прошедших лет, но и обонятельных образов — области, где до сих пор математических работ очень мало, а на практике уровень систем искусственного интеллекта еще далек от уровня служебных собак.

Сказанное объясняет важность повторной публикации в разделе «Математический архив» статьи В. А. Якубовича, впервые опубликованной в 1963 г. Важно отметить также, что теория адаптивных и интеллектуальных систем, основы которой заложены в статье, представляемой вниманию читателей «Вестника», успешно развивается на кафедре теоретической кибернетики СПбГУ, где в течение многих лет публикуются статьи, монографии, учебные пособия [12–21].

В этом выпуске журнала публикуется первая часть статьи В. А. Якубовича. Вторая часть будет опубликована в следующем выпуске. Сохранены рисунки оригинала.

Литература

1. Якубович В. А. Машины, обучающиеся распознаванию образов. В: *Методы вычислений*. Вып. 11, 95–131. Ленинград, Изд-во Ленингр. ун-та (1963).
2. Chervonenkis A. Ya. Early history of support vector machines. В: *Empirical Inference: Festschrift in Honor of Vladimir N. Vapnik*, 13–20 (2013).
3. Вапник В. Н. Машины, обучающиеся распознаванию образов. В: *Алгоритмы обучения распознаванию образов*, 5–28. Москва, Сов. Радио (1973).
4. Якубович В. А. Некоторые общие теоретические принципы построения обучаемых опознающих систем. В: *Вычислительная техника и вопросы программирования*, 3–71. Ленинград, Изд-во Ленингр. ун-та (1965).
5. Якубович В. А. Рекуррентные конечно сходящиеся алгоритмы решения систем неравенств. *ДАН СССР* **166** (6), 1308–1312 (1966).
6. Якубович В. А. О некоторых общих принципах построения обучаемых опознающих систем. В: *Самообучающиеся автоматические системы*. Москва, Наука (1966).
7. Якубович В. А. К теории адаптивных систем. *ДАН СССР*, (3), 518–522 (1968).
8. Якубович В. А. Адаптивные системы с многошаговыми целевыми условиями. *ДАН СССР* **183** (2), 303–306 (1968).
9. Козинец Б. Н., Ланцман Р. М., Якубович В. А. Криминалистическая экспертиза близких почерков при помощи электронно-вычислительных машин. *ДАН СССР* **167** (8), 1008–1011 (1966).
10. Гелиг А. Х., Якубович В. А. Применение обучаемой опознающей системы для выделения сигнала из шума. В: *Вычислительная техника и вопросы кибернетики*. № 5, 95–100. Ленинград, Изд-во Ленингр. ун-та (1968).
11. Якубович В. А. Об одной задаче самообучения целесообразному поведению. *Автоматика и телемеханика*, (8), 119–139 (1969).
12. Фомин В. Н., Якубович В. А. Обучаемые опознающие системы и рекуррентные конечносходящиеся алгоритмы. В: *Алгоритмы обучения распознаванию образов*, 29–42. Москва, Сов. Радио (1973).
13. Фомин В. Н. *Математическая теория обучаемых опознающих систем*. Ленинград, Изд-во Ленингр. ун-та (1976).
14. Гусев С. В., Тимофеев А. В., Якубович В. А. Адаптация в робототехнических системах с искусственным интеллектом. *VII Всесоюзное совещание по проблемам управления. Тезисы докладов*, Минск, 279–282 (1977).

15. Беленков Б. А., Гусев С. В., Зотов Ю. К., Ружанский В. И., Тимофеев А. В., Фролов Р. Б., Якубович В. А. Адаптивная система управления автономным подвижным роботом. *Известия АН СССР. Техническая кибернетика*, (6), 52–63 (1978).
16. Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. А. *Адаптивное управление динамическими объектами*. Москва, Наука (1981).
17. Гелиг А. Х. *Динамика импульсных систем и нейронных сетей*. Ленинград, Изд-во Ленингр. ун-та (1982).
18. Бондарко В. А. Адаптивные субоптимальные системы с переменной размерностью вектора подстраиваемых параметров. *Автоматика и телемеханика*, (11), 38–59 (2006).
19. Гелиг А. Х., Матвеев А. С. *Введение в математическую теорию обучаемых распознающих систем и нейронных сетей*. Санкт-Петербург, Изд-во С.-Петерб. ун-та (2014).
20. Plotnikov S. A., Semenov D. M., Lipkovich M., Fradkov A. L. Artificial intelligence based neurofeedback. *Cybernetics and Physics* **8**, iss. 4, 287–291 (2019).
21. Fradkov A. L. Early History of Machine Learning. *IFAC-PapersOnLine* **53**, iss. 2, 1385–1390 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1888>

Статья поступила в редакцию 19 марта 2019 г.;
после доработки 17 января 2021 г.;
рекомендована в печать 17 июня 2021 г.

Контактная информация:

Фрадков Александр Львович — д-р техн. наук, проф.; fradkov@mail.ru

Machine learning and artificial intelligence in the works of V. A. Yakubovich

A. L. Fradkov

Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences,
61, Bolshoy pr. V. O., St. Petersburg, 199178, Russian Federation
St. Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

For citation: Fradkov A. L. Machine learning and artificial intelligence in the works of V. A. Yakubovich. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*, 2021, vol. 8 (66), issue 4, pp. 620–624. <https://doi.org/10.21638/spbu01.2021.407> (In Russian)

This note precedes the first part of the re-publication of the article by V. A. Yakubovich “Machines learning pattern recognition”, first published by the Leningrad University Publishing House in the collected works “Methods of Computation” in 1963.

Keywords: history of mathematics, machine learning, artificial intelligence.

References

1. Yakubovich V. A. Machines learning pattern recognition. In: *Methods of computation*. Iss. 11, 95–131. Leningrad, Leningrad Univ. Press (1963). (In Russian)
2. Chervonenkis A. Ya. Early history of support vector machines. In: *Empirical Inference: Festschrift in Honor of Vladimir N. Vapnik*, 13–20 (2013).
3. Vapnik V. N. Machines learning pattern recognition. In: *Pattern recognition learning algorithms*, 5–28. Moscow, Sovetskoe Radio Publ. (1973). (In Russian)
4. Yakubovich V. A. Some general theoretical principles of the construction of trainable identification systems. In: *Computer engineering and programming issues*, 3–71. Leningrad, Leningrad Univ. Press (1965). (In Russian)
5. Yakubovich V. A. Recurrent finitely convergent algorithms for solving systems of inequalities. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* **166** (6), 1308–1312 (1966). (In Russian)
6. Yakubovich V. A. On some general principles of construction of learning identification systems. In: *Self-learning automatic systems*. Moscow, Nauka Publ. (1966). (In Russian)

7. Yakubovich V. A. Theory of adaptive systems. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, (3), 518–522 (1968). (In Russian)
8. Yakubovich V. A. Adaptive systems with multistep goal conditions. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* **183** (2), 303–306 (1968). (In Russian)
9. Kozinets B. N., Lantsman R. M., Yakubovich V. A. Forensic examination of close handwritings using electronic computers. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* **167** (8), 1008–1011 (1966). (In Russian)
10. Gelig A. Kh., Yakubovich V. A. Application of a trained recognition system to isolate a signal from noise. In: *Computer engineering and cybernetics issues*. No. 5, 95–100. Leningrad, Leningrad Univ. Press (1968). (In Russian)
11. Yakubovich V. A. On certain problem of self-learning expedient behaviour. *Avtomatika i Telemekhanika*, (8), 119–139 (1969). (In Russian) [Engl. transl.: *Automation and Remote Control* **30** (8), 1292–1310 (1969)].
12. Fomin V. N., Yakubovich V. A. Trainable recognition systems and recurrent finite-converging algorithms. In: *Pattern recognition learning algorithms*, 29–42. Moscow, Sovetskoe Radio Publ. (1973). (In Russian)
13. Fomin V. N. *Mathematical theory of learning recognition systems*. Leningrad, Leningrad Univ. Press (1976). (In Russian)
14. Gusev S. V., Timofeev A. V., Yakubovich V. A. Adaptation in robotic systems with artificial intelligence. *VII All-Union Meeting on Control Problems. Abstracts of reports*, Minsk, 279–282 (1977). (In Russian)
15. Belenkov B. A., Gusev S. V., Zotov Yu. K., Ruzhanskii V. I., Timofeev A. V., Frolov R. B., Yakubovich V. A. Adaptive control system for an autonomous mobile robot. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Teoriya i sistemy upravleniya*, (6), 52–63 (1978). (In Russian)
16. Fomin V. N., Fradkov A. L., Yakubovich V. A. *Adaptive control of dynamic objects*. Moscow, Nauka Publ. (1981).
17. Gelig A. Kh. *Dynamics of impulse systems and neural networks*. Leningrad, Leningrad Univ. Press (1982).
18. Bondarko V. A. Adaptive suboptimal systems with a variable dimension of the vector of adjustable parameters. *Avtomatika i Telemekhanika*, (11), 38–59 (2006). (In Russian) [Engl. transl.: *Automation and Remote Control* **67**, 1732–1751 (2006). <https://doi.org/10.1134/S0005117906110026>].
19. Gelig A. Kh., Matveev A. S. *Introduction to the mathematical theory of trainable recognition systems and neural networks*. St. Petersburg, St. Petersburg Univ. Press (2014). (In Russian)
20. Plotnikov S. A., Semenov D. M., Lipkovich M., Fradkov A. L. Artificial intelligence based neurofeedback. *Cybernetics and Physics* **8**, iss. 4, 287–291 (2019).
21. Fradkov A. L. Early History of Machine Learning. *IFAC-PapersOnLine* **53**, iss. 2, 1385–1390 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1888>

Received: March 19, 2019

Revised: January 17, 2021

Accepted: June 17, 2021

Author's information:

Aleksandr L. Fradkov — fradkov@mail.ru