



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30, № 3
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2022;30(3)

Персоналии

DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-373-382

К 75-летию Владимира Григорьевича Яхно

И. В. Нуйдель

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

E-mail: nuidel@awp.nnov.ru

*Поступила в редакцию 16.11.2021, принята к публикации 10.04.2022,
опубликована 31.05.2022*

Для цитирования: Нуйдель И. В. К 75-летию Владимира Григорьевича Яхно // Известия вузов. ПНД. 2022. Т. 30, № 3. С. 373–382. DOI: 10.18500/0869-6632-2022-30-3-373-382

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Поздравляем!

Уже много лет доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией автоволновых процессов ИПФ РАН Владимир Григорьевич Яхно является членом редакционной коллегии журнала «Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика». В нынешнем 2022 году Владимир Григорьевич отметил свое семидесятипятилетие. Бодрости, активности и энергии, оптимистического настроения и упорства в отстаивании научной тематики ему не занимать. Мы, его ученики и коллеги, сердечно поздравляем его с днем рождения и желаем здоровья, исполнения личных и творческих планов!

Владимир Григорьевич отличается удивительной способностью предвидеть направление научных исследований, которые на уровне идеи могут вызывать определенный скепсис у кого угодно, но только не у Яхно, но в будущем это направление оказывается пионерским и чрезвычайно актуальным. Например, однородные распределенные нейроноподобные системы, исследование коллективной активности



в которых под руководством В. Г. Яхно было начато в восьмидесятые годы, осуществляют по сути операции свертки сигнала с пространственным распределением весов в «рецептивных полях» и нелинейные преобразования, лежащие в основе клеточных нейронных сетей (CNN). А сейчас CNN входят в состав технологий глубокого обучения и систем распознавания. Разработка биологоправдоподобных (нейроморфных) систем распознавания — это одна из ведущих тематик в группе автоволновых процессов.

Владимир Григорьевич является неисправимым оптимистом, считающим, что саморазвитие в научном исследовании и просто в жизни — есть главное. «Жизнь прекрасна!» — на этой ноте заканчиваются все наши семинары и дискуссии.

Редколлегия журнала попросила меня подготовить статью к юбилею Владимира Григорьевича. Она написана в форме интервью.

— Владимир Григорьевич, когда и где Вы родились? Скажите несколько слов о Вашей семье.

— Родился я в городе Токмаке в Киргизии 1 января 1947 года. В 1949 году мы переехали в город Арзамас Горьковской области. Мама Евгения Николаевна и папа Григорий Семенович работали учителями, мама потом работала директором школы, а затем заведующей РОНО. Последнее место работы отца — декан физико-математического факультета, заведующий кафедрой астрономии в Арзамасском педагогическом институте. Он был очень творческим человеком: прекрасно пел, декламировал стихи, нарисованные им картины украшают наши дома. В семье четверо детей: старший брат Николай 1942 года рождения и две сестры младше меня Валентина и Ирина.

— Кто и что оказало влияние на ваш выбор профессии?

— 1963 год. Николай учился уже в университете на радиофизическом факультете Горьковского госуниверситета (ГГУ). Николай стимулировал меня пойти учиться в ГГУ. Он посоветовал мне уйти в школу рабочей молодежи после 9 класса, поработать год и пойти в университет, сэкономив целый год (в школе в 60-е годы обучались 11 лет). Школу рабочей молодежи я окончил и в 1964 году поступил на радиофизический факультет ГГУ. Этот факультет не вызывал у меня никаких отторжений, интересно было. В 1969 году я его окончил.

Из детства запомнилось мне одно из описаний, что мотивацией для А. Эйнштейна было его представление, как он «летит» за светом. И у меня после чтения научно-популярных статей возникали мысли, о том, что хорошо бы знать, как устроены живые системы, вещество на ядерном уровне и механизмы влияния электромагнитных полей. Но мне казалось нескромным упоминать о стимулирующих образах, как у великих. Сейчас же я понимаю, что такие образы внутренней мотивации, ведущие людей по жизни, наверняка, даются всем. Просто не все о них говорят.

— Какими задачами Вы занимались, будучи студентом?

— Когда учился на радиофизическом факультете, не до исследований было, все силы отнимала учеба, хотя на последних курсах занимался интересной тематикой. Курсовую делал под руководством Льва Ароновича Островского. Надо было рассчитать профили пограничного слоя, который формируется при выбросе плазменной струи из сопла. Затем была поставлена задача об аналитическом описании возможного механизма колебаний звезд. Рассматривалась упрощенная модель взаимодействия излучения в слое с частично ионизированным газом. Автоколебания могут возникать, когда поглощение излучения увеличивается при сжатии (под действием гравитации) и поток излучения высвечивается из переизлучающей среды при расширении слоя. Тема моего диплома была «О колебаниях излучающего газа в гравитационном поле».

На последних курсах радиофизического факультета с интересом слушал лекции Михаила Адольфовича Миллера, ходил на его занятия. В конце 60-х он рассказывал нам на занятиях об открытии эффекта самофокусировки при распространении мощного электромагнитного излучения в нелинейной среде. Тогда я впервые услышал про базовые модели, решения которых использовались для объяснения эффекта распада плоской волны на нити света с повышенной энергией.

После окончания университета был принят на работу в НИРФИ. Занимался под руководством Льва Ароновича поиском самомодуляционных нелинейных процессов в воде и ряде других нелинейных сред. Очень благодарен Льву Ароновичу. Он многому меня научил.

— Кто повлиял на Ваш выбор тематики, начиная с разработки математических моделей в биофизике, до описания когнитивных процессов и разработки симуляторов живых систем?

— В 1972 году прочитал книгу Что такое математическая биофизика? (Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернавский Д. С., [1]). Потом она была расширена и переиздана теми же авторами: Математическое моделирование в биофизике (М.: Наука, 1975) [2] и Математическая биофизика (М.: Наука, 1984) [3].

Эти книги оказали сильное воздействие на меня, в них делался упор на базовые модели типа «реакция–диффузия». Когда я уже имел представление, что с помощью базовых моделей можно получить широкий спектр динамических режимов, мне стало интересно, какие базовые модели можно предложить для описания различных процессов и явлений в неравновесных системах, к которым относятся биологические системы.

Тогда проходили школы по нелинейным колебаниям, и меня привлекали к их организации. Была возможность встречаться с участниками этих школ. В частности, встречи с Валентином Израилевичем Кринским из Пушинского Института биофизики АН СССР вдохновили меня на анализ решений нелинейных распределенных систем с помощью базовых моделей типа «реакция–диффузия». В. И. Кринский еще в середине 60-х годов на аксиоматических моделях показывал, что в возбудимых средах могут реализоваться разнообразные пространственно-временные процессы. Как описывать динамические процессы в распределенных сильно релаксационных средах? Тогда мне это было непонятно. Встреча с В. И. Кринским помогла мне, опираясь на результаты Я. Б. Зельдовича, Г. И. Баренблатта, Д. А. Франка-Каменецкого и других, найти пути продвижения в этом направлении. Результаты были опубликованы, например, в статьях Формирование импульсов в возбудимой среде (Островский Л. А., Яхно В. Г., [4]) и Спиральные волны возбуждения в сердечной мышце (Кринский В. И., Яхно В. Г., [5]).

В 1977 году я защитил в ИБФ АН СССР диссертацию «Автоволновые процессы в возбудимых средах». Лев Аронович у меня был руководителем. Термин «автоволновые процессы» уже стал общепринятым. После защиты я теснее познакомился с Юрием Михайловичем Романовским, который совместно с Рэмом Хохловым ввел понятие «автоволновые процессы».

Юрий Михайлович Романовский организовал нас с В. А. Васильевым, и мы втроем сначала написали обзор Автоволновые процессы в распределенных кинетических системах в УФН (Васильев В. А., Романовский Ю. М., Яхно В. Г., [6]), а потом по этому обзору написали книгу *Autowave processes in kinetic systems. Spatial and temporal self-organization in physics, chemistry, biology, and medicine*, [7]. Русский сокращенный вариант вышел в виде книги Автоволновые процессы (Васильев В. А., Романовский Ю. М., Яхно В. Г., [8]).

В 1977 году Мария Тихоновна Грехова пригласила меня работать в ее отделе «Радиофизические методы в медицине». Работа под ее началом оказала огромное влияние на мое развитие как исследователя. Нам была предоставлена свобода в выборе тематик и проведения исследо-

ваний, самостоятельность в принятии решений и ответственность за них, конечно. Ее доверие и страховка позволили молодым еще сотрудникам, В. А. Антонцу, А. Д. Мансфельду и мне, организовать в ИПФ АН СССР публикации сборников работ по интересующим нас тематикам. В автоволновой области интересов были выпущены два сборника: «Автоволновые процессы в системах с диффузией» [9] и «Коллективная динамика возбуждений и структурообразование в биологических тканях» [10].

В СССР тогда был всплеск интереса к таким неравновесным системам, а также техническим и биологическим возбудимым средам, в которых существуют структуры коллективной активности, отражающие функциональные состояния живой системы. Например, распространение волны в сердечной мышце, активность нейронных ансамблей в тканях мозга. То время было очень богатое для моих научных контактов. Например, на Первом биофизическом съезде в 1980 г. я встретился с Галиной Дмитриевной Кузнецовой из Института высшей нервной деятельности. О некоторых результатах ее работ по пространственно-временной активности тканей мозга я знал до этого. Она проводила измерения медленных волн в коре головного мозга, и они проявляли необычное для известных тогда автоволн поведение. Было очень интересно разобраться в причинах этого.

Контакт с Галиной Дмитриевной стимулировал меня на поиск другой базовой модели с нелокальными пространственными связями, чтобы объяснить эффекты, которые она наблюдала в эксперименте для волн распространяющейся депрессии в нейрофизиологии. В нашей команде мы пытались формализовать описание результатов ее экспериментов для малых эпилептиформных припадков (абсансов). Использовали базовые модели, которые включали пути прохождения сигналов по сенсорным входам, таламусу, коре и ретикулярным ядрам таламуса. На элементах этой модели мы получили результаты в начале 90-х годов. Основной мой интерес был связан с тем, чтобы сопоставлять решения базовых моделей с тем валом экспериментальных фактов, которые были мне доступны, а также результаты, обсуждавшиеся на конференциях по самоорганизации в Пущино. Тематика по пространственно-временной активности в неравновесных средах оказалась очень широкой и интересной для изучения разнообразия возможных автоволновых процессов.

— Тогда уже сложилась Ваше научное направление — разработка базовых моделей описания живых систем?

— Важно было найти такие базовые модели, с помощью которых можно было бы описать целый спектр динамических процессов в неравновесных средах.

Была разработана модель однородных нейроноподобных систем. Нейроноподобные системы представляют собой слои из взаимодействующих активных элементов (нейронных ансамблей) с пространственно распределенными активирующими и угнетающими (тормозными) воздействиями. Особенности вывода уравнений для усредненной активности нейроноподобных элементов с классическим типом связей впервые приведены в работе Распространение областей повышенной импульсной активности в нейронной сети (Кудряшов А. В., Яхно В. Г., [11]).

Известно существование однородных участков в нервной системе головного мозга. Таким образом, например, организованы периферические отделы анализаторных систем. Представления об однородности могут быть с успехом распространены на стабильные по функциональной организации участки нервной системы, предназначенные для параллельной обработки потока сенсорной информации. При создании однородной модели эти структуры представляются состоящими из плоских слоев, образованных одинаковыми по своим свойствам элементами, которые связаны определенным образом с соседями. Изучение решений этих моделей проводилось вместе с В. Н. Толковым, С. О. Кузнецовым и И. В. Нуйдель.

Первые простейшие идеи, как организовать параллельную обработку сигналов, были выполнены на таких базовых моделях нейроноподобной среды. Стало понятно, что за счет изменений

внутренних параметров модели можно осуществить весь необходимый спектр преобразований входного сигнала. Через эти модели была объяснена бывшая для меня загадкой проблема, как из одинаковых элементов можно построить столь разнообразные системы, которые выполняют множество требуемых операций для распознавания сигналов, приспособления к целям системы, состояниям внешней среды.

— *Какие свои работы, проекты Вы хотели бы особо отметить?*

— В конце 1980-х – начале 1990-х менялись общество и страна, в которой мы жили, вернее выживали, но было интересно. Под влиянием В. А. Антонца мы стали думать, какие наши знания можно реализовать в возможных технических устройствах, как это можно делать. Например, можно ли распознавать человека по форме руки. Версии таких устройств были реализованы, и демонстрация их работоспособности проводилась нами всем заинтересованным лицам.

Тогда к нам приезжал и Р. Хехт-Нильсен, один из пионеров нейрокомпьютерных разработок, и другие американские партнеры, которым мы рассказывали о наших подходах и демонстрационных реализациях. В итоге мы были приглашены в США, где представляли нашу распознающую систему. После было предложено разработать версии аналогичных систем в рамках проекта с BNL (Brookhaven National Laboratory). Это позволило заниматься разработками систем распознавания, ориентированных на коммерческое использование, с 2001 по 2008 год. Энтузиазм был большой. Перспективность нейроподобного подхода (широкий спектр возможных преобразований и настроечных перестроек) была подтверждена, но в «железе» удалось реализовать лишь только элементы этого подхода. Примерно за год у нас сформировался большой коллектив, около двадцати сотрудников. Сделали систему распознавания музыкальных сигналов, отладили систему распознавания дактоотпечатков, систему распознавания руки, систему распознавания лица. Эти алгоритмы были объединены при создании интегральной системы: решения по потокам сигналов разных модальностей объединяются для принятия системой более точного решения, чем по какой-либо одной из модальностей.

Фактически к 2008 году мы сделали такую систему и передали ее в BNL. Далее нам следовало самим коммерциализировать разработку или передавать права на нее заинтересованным лицам. Модификация коммерческой разработки и продвижение ее на рынок относится к разряду весьма специфичной деятельности. Оценив свои ресурсы, участники разработки не стали интенсифицировать усилия в этом направлении, запатентовав результаты.

Более приоритетной представлялась дальнейшая модификация разработанных моделей распознающих систем. Например, тех, с помощью которых можно было бы объяснить разные психологические реакции поведения живых систем. Надо сказать, что одним из мотивирующих факторов, для меня, во всяком случае, было то, что к концу 90-х годов было много фактов, свидетельствующих о том, что одним из важных признаков живой системы является ее способность предсказывать входной сигнал и предварительно настраиваться на него. Это значит, что в технической системе должна быть возможность не только кодирования сигнала, но и восстановления имитации входного образа. Возникает множество режимов настройки, повышающих точность распознавания, улучшающих процедуру восприятия этих сигналов. В азарте мы запатентовали эти идеи.

Видно, что развитие таких модельных реализаций можно превратить в систему, в которой возможно переключение между «более простыми» моделями. Такой путь вполне реалистичен при разработке версий симуляторов живых систем. Качественно было понятно, как управлять модельной системой и настраивать соответствующие технические реализации на множество возможных режимов, которые наблюдаются в биологической системе. Такой подход принято называть модельным.

Мне кажется важным выделить, по крайней мере, три типа модельных нейросетей:

- нейросети, настраиваемые на большом объеме данных;
- базовые нейроноподобные модели, когда параметры можно настроить на основе опыта разработчика (его знаниях о выборе конкретных решений для сопоставления с экспериментом);
- базовые модели с использованием функций приспособленности, когда более точное сопоставление можно делать при рассмотрении новых гипотез, связанных с мотивациями и целевыми функциями систем.

Если реализована модель типа ветвящихся структур, аналогом которой являются модели глубокого нейронного обучения (Deep Learning Model), то будут точно распознаваться сигналы, на которые обучена система. Но проблемой остается большой объем данных для обучения. В нашей команде Александр Тельных увлекся и разработал очень интересные версии таких систем.

В подходе на основе базовых моделей ситуация другая. Базовые модели строятся на основе экспериментальных данных, которым обучается разработчик-исследователь в течение своей профессиональной деятельности. Он сам выбирает модель, которая соответствует объекту изучения, основываясь на своем личном опыте. Он выбирает те динамические режимы, которые соответствуют физическим условиям и его представлениям о здравом смысле. При этом формируется еще и язык описания таких систем. Такой подход широко распространен при описании физических объектов. Самое трудное при описании живых систем заключается в том, что большинство параметров изучаемой системы либо просто недоступно нашим измерениям, либо об этих параметрах нам (пока?) ничего не известно. Вот тут-то на первый план и выступают соображения здравого смысла, что фактически тесно связано с опытом разработчика. Именно на этот факт обращал внимание слушателей Дмитрий Сергеевич Чернавский на наших конференциях «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях»: «...самое важное в нашей работе — разработка новых адекватных базовых моделей...».

Дополнительным подспорьем при изучении живых объектов могут служить гипотезы о мотивациях и целях изучаемых живых объектов. Разработчик вводит дополнительные уравнения и условия, соответствующие его представлениям о целях и мотивациях изучаемой системы, и меняя параметры созданной им (разработчиком) функции приспособленности, добивается наилучших совпадений полученных решений базовой модели с данными даже единичного эксперимента (об этом я узнал из работ Олега Анатольевича Кузенкова). Получается, что введение функции приспособленности позволяет активировать знания разработчика для объяснения данных даже единичного эксперимента с помощью выбора подходящей базовой модели.

— Почему вы все-таки делаете такой упор на разработку базовых моделей при описании живых систем?

— Лаборатория автоволновых процессов была организована в 1999 году. Это удачное название. Все, чем наша команда занималась до этого и делает до сих пор, полностью подпадает под это определение. Автоволновые процессы это коллективная динамика активных элементов, в которых внутренняя сложность механизмов управления определяющими переменными (энергетическими ресурсами, обработкой воспринимаемых ими сигналов и т. п.) может быть произвольной. Вижу обширнейшие области исследований в этом направлении. Адекватные модели коллективной динамики когнитивных элементов могут описывать и социальные процессы, и многие естественно-научные процессы. На их основе можно строить технические системы, которые будут настраиваться на выбранные ими целевые функции, учитывать состояние окружающей среды. Однако для осмысленных действий желательно иметь инструментарий из упрощенных моделей. Фактически на их основе создается язык описания сложных систем. Именно такой язык делает понятным путь решения сложных задач. С его помощью формируются образы, отражающие качественные особенности поведения элементов действительности. Формализованное описание

можно строить, получая ответы на вопросы, как должен работать один элемент, и как он обучается в зависимости от внешнего сигнала и своего окружения, как изменяется характер обучения, если учитывать взаимодействие между когнитивными агентами. Агенты по-разному обучены, имеют разные целевые функции, разное энергетическое обеспечение, что, естественно, приводит к большому разнообразию. При этом целевым функциям и состояниям окружающей среды отводится роль ограничителей разнообразия и выбора лишь «предпочтительного» режима поведения. Если мы хотим адекватно отражать реальную действительность, мы должны учитывать эти факторы, которые влияют на коллективную динамику элементов.

Например, в 1995 году мне повезло быть на Окинаве на конференции, включавшей тематику по разработке электронных устройств на новых принципах. Там, Роберт Хехт-Нильсен в своем докладе рассказал о режимах прерывания информационных потоков в мозговых структурах. Он использовал ту же самую схему «сенсорный сигнал–таламус–кора–ретикулярные ядра таламуса», которая обсуждалась с Г. Д. Кузнецовой для моделирования абсансов. При этом Р. Хехт-Нильсен рассматривал режимы стробирования сенсорных сигналов при нормальном режиме обработки информации. Такое расширение наших знаний о возможностях базовой модели таламокортикальных модулей из распределенных нейроноподобных сред позволило в совместной работе с И. Нуйдель, П. Хурлаповым, А. Ивановым, М. Соколовым провести расчеты режимов выделения искомым признаков (линии заданных направлений, объекты заданных размеров и т. п.) в режимах стробирования (то есть продемонстрировать существование нормальных режимов функционирования), а при сдвигах значений параметров системы увидеть появление патологических режимов самовозбуждения. По моим понятиям, это — вполне наглядная версия симулятора элемента живой системы. Эти работы в нашей команде проводились с середины 90-х годов, и на протяжении 2000-х годов. Отмечу, что продолжение демонстрационных расчетов для таких модулей из распределенных подсистем остаются актуальными и сейчас.

— *Как возникла идея конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях»?*

— Мы разрабатывали работающие прототипы систем распознавания, но в заинтересованном нижегородском сообществе продолжали обсуждать идеи Петра Кузьмича Анохина, результаты выдающихся нейрофизиологов и наших земляков Александра Васильевича Зевеке и Виталия Ивановича Щербакова. Вольно или невольно с помощью базовых моделей когнитивных систем строили гипотезы о природе сознательного, бессознательного и интуитивного. Происходило осознание процесса, как с помощью моделей получать динамические режимы, соответствующие конкретным нейрофизиологическим либо психологическим экспериментальным данным.

Этот интерес означает и продвижение к разработкам симуляторов живых систем. В меру наших сил мы участвовали в конференциях по когнитивной науке (Казань (2004), Санкт-Петербург (2006), Москва (2008), и т. д.), которые проводятся раз в два года Межрегиональной ассоциацией когнитивных исследований (МАКИ). Тогда у меня, С. А. Полевой, С. Б. Парина, В. А. Антонца, И. В. Нуйдель сложилось впечатление, что мы вполне можем предлагать схемы систем, симулирующих процессы в живых системах. Мы обсуждали реальность выполнения работ по формализованному описанию режимов функционирования живых систем. Мы понимали необходимость организации более широких обсуждений с 2007 года.

В 2009 г. подготовили и провели первую конференцию «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях» в Нижнем Новгороде. Мы проводим эти конференции по нечетным годам, начиная с 2009 года, и считаем их сопутствующими конференциям по когнитивной науке, проходящим в четные годы. Огромная благодарность дирекции ИПФ РАН, которая всячески помогает нам в этом деле. В прошлом 2021 году в Нижнем, в ИПФ РАН прошла седьмая по счету конференция. Мне кажется, проведение этих конференций помогает, с одной стороны,



лучше осознать возможности нижегородских разработчиков, а с другой стороны, общение с лучшими российскими исследователями, несомненно, всем приносит пользу. Видна необходимость функционирования такой площадки для практического тестирования общего научного языка при взаимопонимании между специалистами пока еще из разных узких областей науки. Плодотворность таких интереснейших встреч и обсуждений подтверждается результатами обмена мнениями с коллегами и участниками конференций.

— Какие у Вас планы на будущее?

— Живые системы, исходя из моего понимания, формулируют свои планы на основе неудач своего прошлого опыта (для меня это — отсутствие внятного ответа в выбранной области исследований) и рассмотрения возможностей получения новых знаний в этих областях. Меня радует, что многие ранее непонятные для меня природные процессы сейчас имеют свои версии описаний. Однако, как все знают, чем больше знаешь, тем обширнее границы непознанного. Сказать в этом интервью кратко о возможных направлениях исследований, обсуждаемых в нашей команде, будет выглядеть скромно. Однако о них можно прочитать, в частности, в статьях [12–14].

Особо отмечу, что мучившая меня многие десятилетия проблема о механизмах «активации» воды нашла весьма разумное объяснение в серии работ под руководством Татьяны Анатольевны Яхно. Оказалось, что водные растворы и при нормальных условиях представляют собой дисперсную систему, а процессы агрегации — дезагрегации дисперсной фазы отражаются в похожих изменениях физических параметров раствора при разных внешних воздействиях. Правда, осталась проблема преодоления стереотипов у ряда «классически» воспитанных исследователей.

Искренне благодарю Вас за интервью! Чем больше живешь, тем больше интересных задач. Как учат нас мудрые люди, любая живая система имеет семилетние этапы развития. Но с возрастом энергия кончается, и система начинает вести себя более спокойно. Как пишет Ошо (Багван Шри Раджниш), на этапе после 70-ти лет люди (усредненно) уходят от суеты, вызванной социальными процессами. Они уже накопили свой опыт жизни, понимают преимущества детского восприятия жизненных событий и готовятся к переходу в другую фазу существования. Как протекает эта фаза развития живых систем, я с интересом сейчас и наблюдаю.

Список литературы

1. Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернавский Д. С. Что такое математическая биофизика? М.: Просвещение, 1971. 136 с.
2. Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернавский Д. С. Математическое моделирование в биофизике. М.: Наука, 1975. 344 с.
3. Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернавский Д. С. Математическая биофизика. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 304 с.
4. Островский Л. А., Яхно В. Г. Формирование импульсов в возбудимой среде // Биофизика. 1975. Т. 20, № 3. С. 489–493.
5. Кринский В. И., Яхно В. Г. Спиральные волны возбуждения в сердечной мышце // В кн.: Нелинейные волны / Отв. ред. М. И. Рабинович. Горький: ИПФ АН СССР, 1980. С. 200–214.
6. Васильев В. А., Романовский Ю. М., Яхно В. Г. Автоволновые процессы в распределенных кинетических системах // УФН. 1979. Т. 128, № 4. С. 625–666. DOI: 10.3367/UFNr.0128.197908c.0625.
7. Vasiliev V. A., Romanovskii Y. M., Chernavskii D. S., Yakhno V. G. Autowave Processes in Kinetic Systems: Spatial and Temporal Self-Organisation in Physics, Chemistry, Biology, and Medicine. Dordrecht: Springer, 1987. 262 p. DOI: 10.1007/978-94-009-3751-2.
8. Васильев В. А., Романовский Ю. М., Яхно В. Г. Автоволновые процессы. М.: Наука, 1987. 240 с.
9. Автоволновые процессы в системах с диффузией / Под ред. М. Т. Греховой. Горький: ИПФ АН СССР, 1981. 288 с.
10. Коллективная динамика возбуждений и структурообразование в биологических тканях / Под ред. В. Г. Яхно. Горький: ИПФ АН СССР, 1988. 225 с.
11. Кудряшов А. В., Яхно В. Г. Распространение областей повышенной импульсной активности в нейронной сети // Динамика биологических систем. 1978. Т. 2. С. 45–59.
12. Яхно В. Г., Макаренко Н. Г. Поможет ли нам создание «Цифрового двойника человека» лучше понимать друг друга? // В кн.: Подходы к моделированию мышления / Под ред. В. Г. Редько. Глава 6. М.: ЛЕНАНД, 2014. С. 169–202.
13. Yakhno V. G., Parin S. B., Polevaya S. A., Nuidel I. V., Shemagina O. V. Who says formalized models are appropriate for describing living systems? // In: Kryzhanovsky B., Dunin-Barkowski W., Redko V., Tiumentsev Y. (eds) Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research IV. NEUROINFORMATICS 2020. Vol. 925 of Studies in Computational Intelligence. Cham: Springer, 2021. P. 10–33. DOI: 10.1007/978-3-030-60577-3_2.
14. Alexandrova N. S., Antonets V. A., Kuzenkov O. A., Nuidel I. V., Shemagina O. V., Yakhno V. G. Bilingualism as an unstable state // In: Velichkovsky B. M., Balaban P. M., Ushakov V. L. (eds) Advances in Cognitive Research, Artificial Intelligence and Neuroinformatics. Vol. 1358 of Intercognsci 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer, 2021. P. 359–367. DOI: 10.1007/978-3-030-71637-0_41.

References

1. Romanovskii YM, Stepanova NV, Chernavskii DS. What is Mathematical Biophysics? Moscow: Prosveshchenie; 1971. 136 p. (in Russian).
2. Romanovskii YM, Stepanova NV, Chernavskii DS. Mathematical Modeling in Biophysics. Moscow: Nauka; 1975. 344 p. (in Russian).
3. Romanovskii YM, Stepanova NV, Chernavskii DS. Mathematical Biophysics. Moscow: Nauka, Glavnaya Redaktsiya Fiziko-Matematicheskoy Literatury; 1984. 304 p. (in Russian).

4. Ostrovskii LA, Yakhno VG. Formation of impulses in an excitable medium. *Biophysics*. 1975;20(3): 489–493 (in Russian).
5. Krinskii VI, Yakhno VG. Spiral waves of excitation in the heart muscle. In: Rabinovich MI, editor. *Nonlinear Waves*. Gorky: Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of the USSR; 1980. P. 200–214 (in Russian).
6. Vasil'ev VA, Romanovskii YM, Yakhno VG. Autowave processes in distributed kinetic systems. *Sov. Phys. Usp.* 1979;22(8):615–639. DOI: 10.1070/PU1979v022n08ABEH005591.
7. Vasiliev VA, Romanovskii YM, Chernavskii DC, Yakhno VG. *Autowave Processes in Kinetic Systems: Spatial and Temporal Self-Organisation in Physics, Chemistry, Biology, and Medicine*. Dordrecht: Springer; 1987. 262 p. DOI: 10.1007/978-94-009-3751-2.
8. Vasiliev VA, Romanovskii YM, Yakhno VG. *Autowave Processes*. Moscow: Nauka; 1987. 240 p. (in Russian).
9. Grekhova MT, editor. *Autowave Processes in Systems With Diffusion*. Gorky: Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of the USSR; 1981. 288 p. (in Russian).
10. Yakhno VG, editor. *Collective Dynamics of Excitations and Structure Formation in Biological Tissues*. Gorky: Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of the USSR; 1988. 225 p. (in Russian).
11. Kudryashov AV, Yakhno VG. Propagation of areas of increased impulse activity in a neural network. *Dynamics of Biological Systems*. 1978;2:45–59 (in Russian).
12. Yakhno VG, Makarenko NG. Will the creation of the «digital human twin» help us better understand each other? In: Red'ko VG, editor. *Approaches to the Modeling of Thinking*. Chapter 6. Moscow: LENAND; 2014. P. 169–202 (in Russian).
13. Yakhno VG, Parin SB, Polevaya SA, Nuidel IV, Shemagina OV. Who says formalized models are appropriate for describing living systems? In: Kryzhanovsky B, Dunin-Barkowski W, Redko V, Tiumentsev Y, editors. *Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research IV. NEUROINFORMATICS 2020*. Vol. 925 of *Studies in Computational Intelligence*. Cham: Springer; 2021. P. 10–33. DOI: 10.1007/978-3-030-60577-3_2.
14. Alexandrova NS, Antonets VA, Kuzenkov OA, Nuidel IV, Shemagina OV, Yakhno VG. Bilingualism as an unstable state. In: Velichkovsky BM, Balaban PM, Ushakov VL, editors. *Advances in Cognitive Research, Artificial Intelligence and Neuroinformatics*. Vol. 1358 of *Intercognsci 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham: Springer; 2021. P. 359–367. DOI: 10.1007/978-3-030-71637-0_41.