

ХИМИЧЕСКИЕ
ЯЗЫКИ
НЕРВНЫХ
СИСТЕМ

ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ РАЗВИТИЯ ИМ. Н. К. КОЛЬЦОВА РАН
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИМ. В. А. ТРАПЕЗНИКОВА РАН

Д. А. Сахаров, О. П. Кузнецов, В. Е. Дьяконова,
Л. Ю. Жиликова, Д. Д. Воронцов

Химические языки нервных систем



Издательский Дом ЯСК
Москва 2024

УДК 612, 51-76
ББК 28.07
С 22

Книга издана при поддержке
АО «Биомедицинские клеточные продукты»

Рецензенты:
академик РАН, доктор биол. наук *П. М. Балабан*
доктор физ.-мат. наук *В. Г. Редько*

**Сахаров Д. А., Кузнецов О. П., Дьяконова В. Е.,
Жилякова Л. Ю., Воронцов Д. Д.**

С 22 Химические языки нервных систем. — М.: Издательский Дом ЯСК,
2024. — 216 с.

ISBN 978-5-907498-57-0

В книге, написанной коллективом нейробиологов из Института биологии развития РАН и группой математиков из Института проблем управления РАН, излагается гетерохимическая концепция работы нервной системы. Согласно этой концепции, распространенное представление о мозге как о рефлекторной «проводочной сети» не соответствует действительности. Решающую роль в его работе играют эндогенно активные нейроны и ансамбли, способные генерировать поведение даже в отсутствие внешних стимулов, а язык общения между нейронами и отделами нервной системы является химическим. Этот язык основан на разнообразии сигнальных молекул — нейротрансмиттеров и нейрогормонов, которые действуют не только в синаптических щелях, но и во всем межклеточном пространстве. В книге рассказывается об эволюции языка нейротрансмиттеров, о клеточных механизмах генерации поведения, нейромодуляции, роли трансмисмиттеров в выборе поведения и адаптации к внешним переменам.

Для математической формализации этой концепции понадобились принципиально новые подходы, которым посвящена вторая часть книги. В ней дается обзор математических моделей нейронов и нейронных сетей и подробно описывается оригинальная дискретная модель химических взаимодействий между нейронами. Приводятся разнообразные примеры моделирования реальных нервных систем с помощью этой модели.

Книга рассчитана на широкий круг читателей: не только на специалистов-нейробиологов, но и на студентов биологических специализаций, а также на исследователей в других областях, активно интересующихся нейробиологией.

УДК 612, 51-76
ББК 28.07

© Д. А. Сахаров, О. П. Кузнецов, В. Е. Дьяконова,
Л. Ю. Жилякова, Д. Д. Воронцов, тексты, 2024
© Издательский Дом ЯСК, оригинал-макет, 2024

ISBN 978-5-907498-57-0

Оглавление

Предисловие	11
Введение	13
Часть 1. Гетерохимический мозг	15
Глава 1. Парадигмы нейробиологии.....	15
1.1. Струйная парадигма	15
1.2. Электрическая парадигма («проволочный мозг»)	17
1.2.1. Немного истории	17
1.2.2. Нейроны и синапсы — строение и функционирование ...	20
1.2.3. Коннекционизм, коннектом и аномалии электрической парадигмы	29
1.3. Гетерохимическая парадигма — еще немного истории	33
Глава 2. Принципы химической коммуникации	38
Глава 3. Почему нейроны разные? Для чего нейроны разные?	
Гетерохимические принципы клеточного самоуправления	
и эволюция нервных систем	58
3.1. От ансамбля клеток и нейронов к поведению.....	61
3.2. Эволюция химического языка	63
3.2.1. Как глутамат стал нейротрансмиттером?.....	64
3.2.2. Почему мозг млекопитающих использует глутамат в качестве основного возбуждающего нейротрансмиттера?	69
Глава 4. Эндогенность или рефлекторность? Центральные	
генераторы паттерна.....	72
4.1. Мозг активен или реактивен?	72
4.2. Методологические трудности изучения эндогенно активного мозга	78

4.3. Но что же, если не стимул — реакция? Центральные генераторы паттерна	79
4.4. Управление и переключение ЦГП. Есть ли командный нейрон?	81
4.5. Гетерохимизм, мультитрансмиттерная модуляция, самоорганизация ЦГП	83
4.6. ЦГП — в основе и коленного рефлекса, и мысли?	89
Глава 5. Нейротрансмиттеры и выбор поведения	90
5.1. Трансмиттер-зависимое поведение	91
5.2. Консервативна ли поведенческая функция нейротрансмиттера в эволюции?	94
5.3. Антагонистичные пары нейротрансмиттеров: баланс антагонистов определяет выбор поведения?	100
5.4. Контекст-зависимый выбор поведения и нейротрансмиттеры	105
5.5. А как же гены?	110
 Часть 2. Математическое моделирование межнейронной гетерохимической коммуникации	113
Глава 6. Модели нейронов и их взаимодействий	113
6.1. Обзор электрических моделей нейронов и их взаимодействий	113
6.1.1. Непрерывные модели	114
6.1.2. Дискретные модели	118
6.2. Сравнительный анализ моделей. Некоторые принципы математического моделирования в нейробиологии	126
6.3. О моделировании гетерохимических взаимодействий в нейронных сетях	130
Глава 7. Модель мультитрансмиттерных взаимодействий и ее эволюция	135
7.1. Описание объекта моделирования	135
7.2. Этапы эволюции модели	137
7.2.1. Модель с цветными фишками	138
7.2.2. Конечно-автоматная модель	141
7.2.3. Асинхронная модель — общая характеристика	142

Глава 8. Асинхронная модель мультитрансмиттерных взаимодействий нейронов	145
8.1. Формальное описание базовой модели	145
8.1.1. Входы нейронов	145
8.1.2. Выходы нейронов	146
8.1.3. Внеклеточное пространство (ВКП)	147
8.1.4. Мембранный потенциал нейронов	148
8.1.5. Типы активности нейронов	149
8.1.6. Анализ параметров	153
8.1.7. Динамика системы и ее вычисление	155
8.1.8. Схема алгоритма функционирования нейронной системы	158
8.2. Расширения базовой модели	159
8.2.1. Синаптические связи, матричное представление, вычислительная сложность	159
8.2.2. Посттормозная отдача (ребаунд)	161
8.2.3. Нейромодуляция и изменение активности ансамбля	163
8.3. О биологической адекватности параметров базовой модели	166
Глава 9. Примеры моделирования ансамблей	168
9.1. Моделирование ритмической активности ансамблей	168
9.1.1. Ансамбль из трех нейронов с двумя трансмиттерами	168
9.1.2. Полуцентровые осцилляторы	170
9.2. Примеры функциональной перестройки сетей	173
9.2.1. Объект моделирования	173
9.2.2. Переключение походки с помощью нейромодуляции	175
9.3. Как пользоваться моделью	179
Заключение	181
Благодарности	187
Предметный указатель	189
Литература	193

Для нервной системы химические явления играют по меньшей мере такую же роль, что и электрические.

А. Тьюринг.

Вычислительные машины и разум. 1950

