

УДК 611.81 + 004.81 + 159.942

НИЗКОУРОВНЕВАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ НОРАДРЕНАЛИНОВОЙ ПОДСИСТЕМЫ НЕЙРОННОЙ ИМПУЛЬСНОЙ СЕТИ

Ю.С. Сафандеева¹, М.О. Таланов²

Казанский (Приволжский) федеральный университет

¹ julia.safandeeva@gmail.com; ²max.talanov@gmail.com

Аннотация

На основе модели «Куба эмоций» Лёвхейма [1] и нейронных сетей предложено воспроизвести базовые эмоциональные состояния, описанные Сильвенном Томкинсом [2]. Рассмотрено влияние на параметры вычислительной системы нейромодулятора норадреналина с учетом его роли и функции в головном мозге. Описаны реализация низкоуровневой модели норадреналиновой подсистемы и её моделирование во фреймворке «Nest Initiative».

Ключевые слова: NEST, NeuCogAR, куб Лёвхейма, норадреналин

МОДЕЛЬ КУБА ЭМОЦИЙ ЛЁВХЕЙМА

Эмоции – важный механизм внутренней регуляции психической деятельности и поведения, они позволяют человеку давать оценку всему, что происходит вокруг и внутри него, и отвечают за удовлетворения актуальных потребностей индивидуума. Эмоции участвуют в поддержании постоянства организма, сообщая об опасностях, которые угрожают жизни организма, в том числе болезнях. Человек принимает решения в соответствии с внутренним эмоциональным состоянием и накопленным опытом [3]. Искусственный интеллект не обладает вышеуказанными способностями.

Создание когнитивных архитектур дает возможность вычислительным системам анализировать, принимать решения, обучаться, воспроизводить эмоции, познавать окружающий мир.

Основой проведенного исследования является модель куба эмоций Лёвхейма [4], позволяющая связать между собой психологию и нейробиологию. Куб

эмоций использует восемь базовых аффектов, которые описаны Сильвенем Томкинсом, и три моноаминовых нейромедиатора (дофамин, серотонин, норадреналин), отвечающие за процессы в головном мозге и воспроизводство базовых эмоций.

На рис. 1 показано, что куб эмоций имеет восемь вершин, которые обозначают конкретные эмоции, и три оси, которые соответствуют нейромедиаторам. Все три нейромедиатора имеют низкое значение в точке начала координат, которая обозначает состояние стыда и унижения. Высокое содержание всех трех нейромодуляторов, напротив, говорит о состоянии возбуждения и интереса.

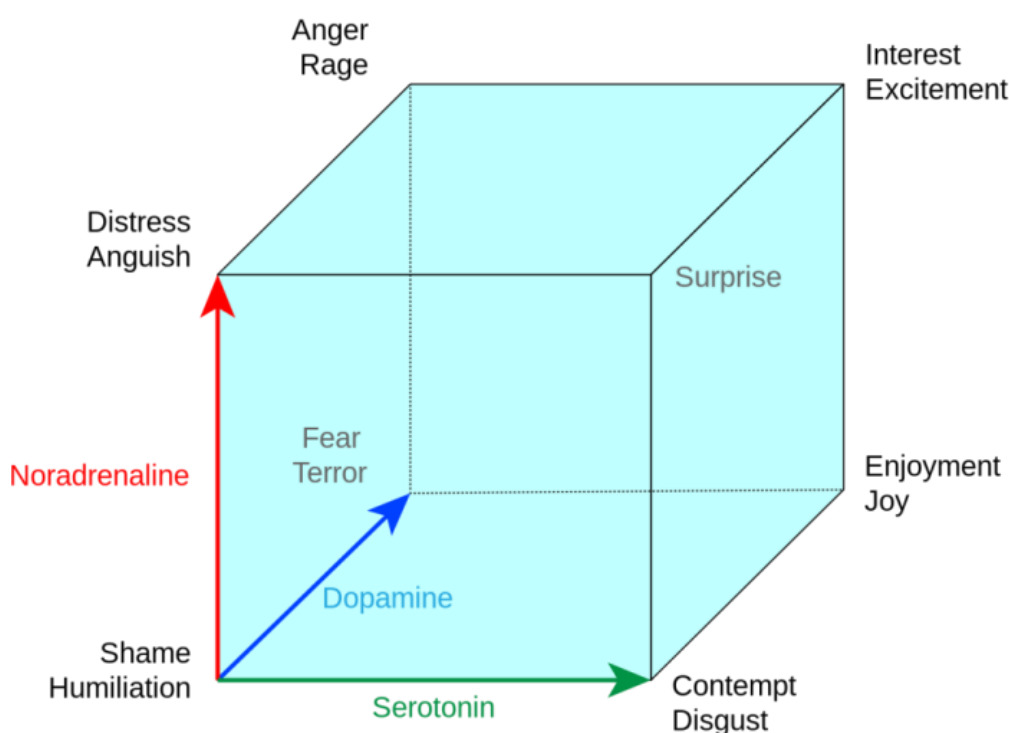


Рис. 1. Куб эмоций Лёвхейма

Данную модель можно отобразить на вычислительных процессах внутри вычислительных систем. В частности, важно понимать, как Лёвхейм определяет зависимость эмоционального состояния от содержания норадреналина в организме. Высокий уровень содержания норадреналина соответствует грани куба, где определены такие эмоции, как тоска, гнев, удивление и возбуждение.

Так как данное исследование не учитывает взаимодействия других нейромедиаторов с норадреналином, модель подсистемы норадреналина позволяет

воспроизвести эмоциональное состояние тоски. Именно это состояние определяет низкое содержание дофамина и серотонина и высокое содержание норадреналина.

НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

Искусственная нейронная сеть имитирует структуру и свойства организации нервной системы живых организмов. Работа искусственной нейронной сети аналогична работе биологической нейронной сети.

Биологической нейронная сеть работает следующим образом. Нервная система и мозг человека состоят из нейронов, соединенных между собой нервными волокнами. Нейрон – это нервная клетка, являющаяся основным строительным блоком для нервной системы. Нейроны специализируются на передаче информации по всему телу. Нервные волокна обладают способностью передавать электрические импульсы между нейронами. Передача реакций на внешнее воздействие от органов чувств к мозгу, управления действиями и мыслительные процессы реализуются в живом организме как передача между нейронами электрических импульсов [5].

Нейрон состоит из тела клетки, дендритов и аксона, каждая часть со своими взаимосвязанными функциями. Дендриты принимают импульсы, единственный аксон передает импульс и контактирует с дендритами других нейронов через специальные образования – синапсы, которые влияют на силу импульса [6].

Нервный импульс (спайк) – процесс распространения возбуждения по аксону от тела клетки до окончания аксона; это основная единица информации, передаваемая по волокну. Сигналы суммируются в теле клетки: если суммарный сигнал в течение некоторого короткого промежутка времени является достаточно большим, то клетка возбуждается, формируя собственный импульс и передавая его через аксон следующим клеткам. Можно считать, что при прохождении синапса сила импульса изменяется в определенное число раз, которое называется весом синапса. Веса синапсов могут изменяться со временем, соответственно, изменяется и поведение данного нейрона [6]. Строение нейрона изображено на рис. 2.

Искусственная нейронная сеть – это набор искусственных нейронов, соединенных между собой синаптическими соединениями. Она получает на вход набор

входных сигналов, обрабатывает их и в процессе изменения своего состояния во времени формирует совокупность выходных сигналов, причем это преобразование задается весами нейронной сети [7].

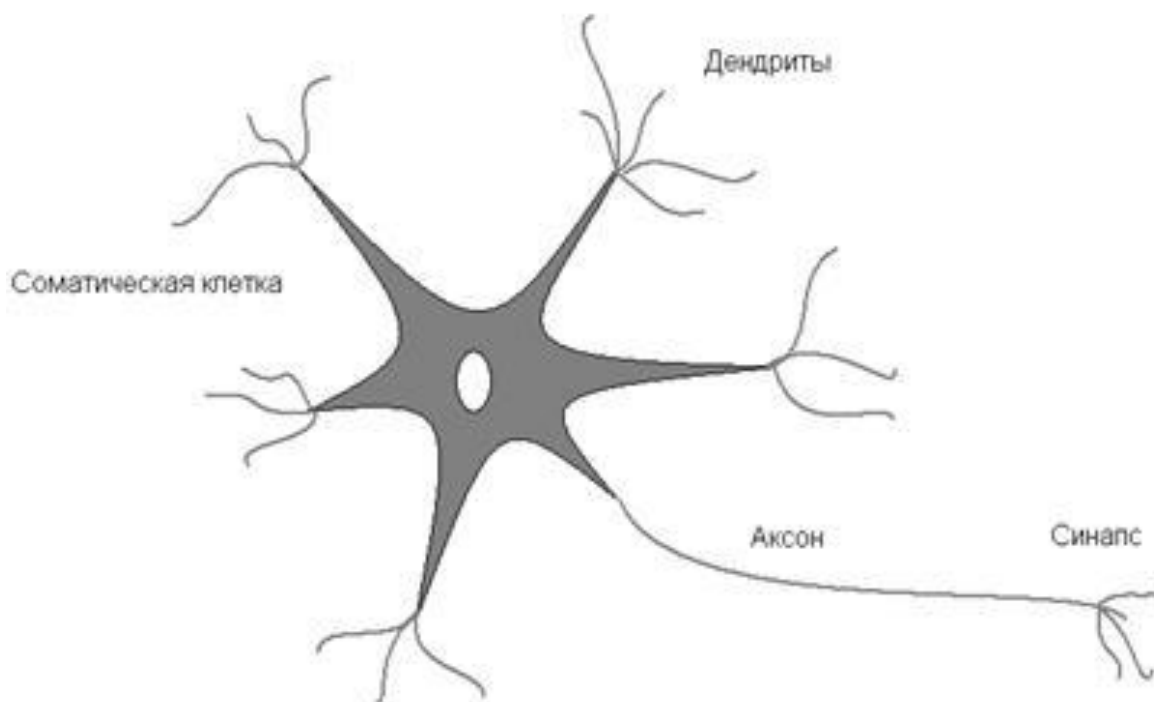


Рис. 2. Строение нейрона

Существует множество моделей нейронных сетей. Наиболее близка к реальной биологической нейронной сети модель импульсной нейронной сети. Как и биологические нейроны, она обменивается импульсами пренебрежимо малой длины и, как биологические нейронные сети, не составляет каких-то строго упорядоченных структур. Самое главное, нейронные сети велики: как и нейронов в мозгу, их очень много [8].

Модели нейронной сети опираются только на систему весов, память в системе отсутствует, в отличие от биологической сети. Также нейроны биологической сети обмениваются импульсами, а модели нейронной сети – действительными числами.

В модели импульсной нейронной сети количество и веса связей каждого нейрона выбираются на основе данных нейрофизиологических исследований.

Нейронные сети дают возможность лучше понять организацию нервной системы человека и животных [8].

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О НОРАДРЕНАЛИНЕ

Норадреналин является нейромедиатором нейронов и гормоном мозгового вещества надпочечников, так называемым гормоном стресса [9].

Нейрон – это единица нервной системы, представляющая собой клетку, которая обрабатывает и передает информацию посредством электрических и химических сигналов. В среднем человеческий мозг имеет примерно 86 миллиардов нейронов [9].

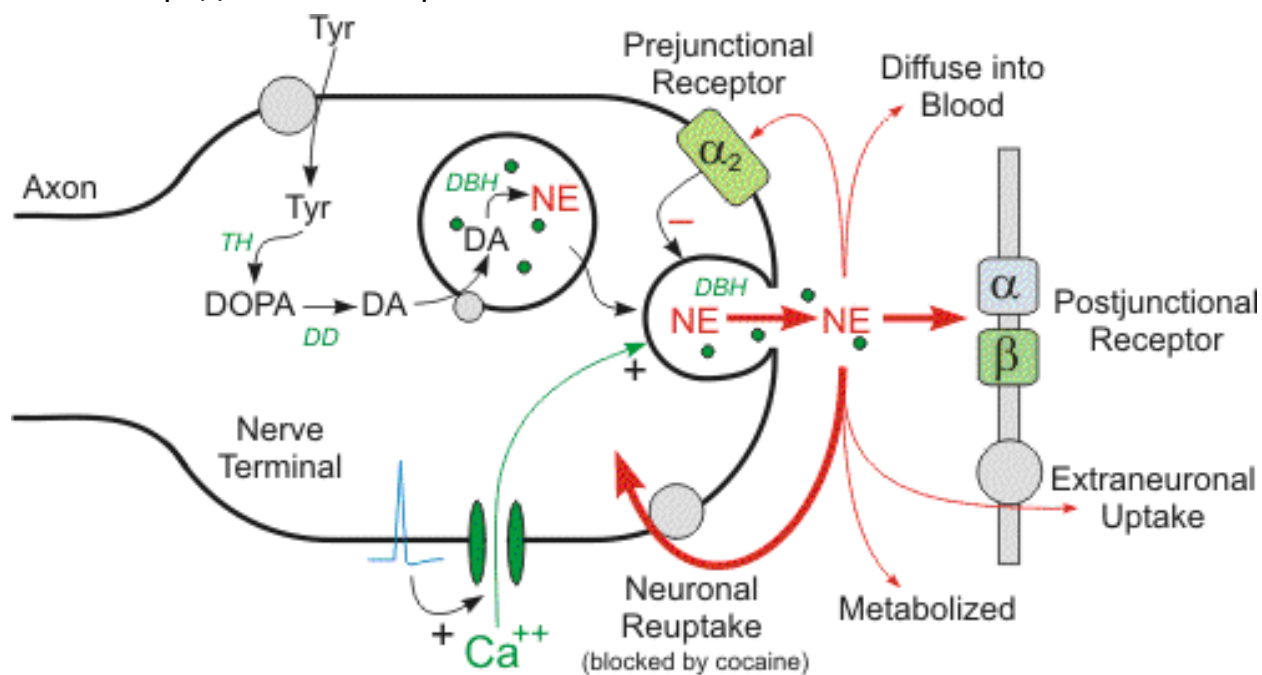
Нейромедиаторы – это биологические активные химические вещества, участвующие в нейрофизиологии мозга, обеспечивающие передачу информации от нейрона к нейрону. Функция норадреналина, как нейромедиатора, состоит, прежде всего, в передаче электрических импульсов между нейронами [10].

Одно и то же химическое вещество может быть нейромедиатором и гормоном. Высвобождение и механизм действия нейромедиатора в синапсах отличаются от механизма гормонов. Высшие животные имеют две регуляторные системы, которые помогают приспосабливаться к внутренним и внешним изменениям организма. Первая – нервная, которая быстро передает сигналы в виде импульсов через сеть нейронов и нервных клеток. Вторая – эндокринная, она осуществляет химическую регуляцию с помощью гормонов. Названные системы взаимодействуют друг с другом. Определенные гормоны исполняют функцию посредников между нервной системой и органами, отвечающими на воздействие. Гормоны вырабатываются эндокринными железами и избирательно воздействуют на органы. Нейромедиаторы в свою очередь синтезируются нервными клетками.

Норадреналин входит в состав группы моноаминов, содержащей группу катехоламинов, в которую входят дофамин, норадреналин, адреналин. Также к моноаминам относится серотонин [9].

Синтез норадреналина из аминокислоты тирозина происходит во всех частях постганглионарного нейрона. Основная часть медиатора синтезируется в периферических отделах аксона и хранится в гранулах синаптических пузырьков и далее выделяется в синапс.

Синапс – это щель шириной 10–50 нм между двумя нейронами или нейроном и другой клеткой. Первая клетка называется пресинаптической, вторая – постсинаптической. Нейромедиатор образуется и выделяется в синапс пресинаптическим нейроном. Наглядное изображение синапса под воздействием норадреналина представлено на рис.3.



Tyr = tyrosine; TH = tyrosine hydroxylase; DD = DOPA decarboxylase; DA = dopamine; DBH = dopamine β-hydroxylase; NE = norepinephrine

Рис. 3. Синапс под воздействием норадреналина

Освобождение медиатора в синаптическую щель происходит квантами под влиянием импульса возбуждения. Процесс высвобождения норадреналина протекает с помощью кальция (Ca), далее норадреналин связывается с адренергическими рецепторами [11].

Норадренергические нейроны находятся среди ядер варолиева моста и продолговатого мозга. Варолиев мост является частью заднего мозга и входит в состав ствола мозга. В нем располагаются ядра черепно-мозговых нервов, ретикулярной формации, ядра самого моста. Продолговатый мозг представляет собой продолжение спинного мозга, он соединяет головной мозг со спинным.

Наивысшая концентрация норадреналина, по сравнению с другими исследу-

дованными ядрами, находится в голубом пятне: 9000 – 10000 нейронов в головном мозге человека. Голубое пятно расположено в стволе мозга на уровне моста.

Нейроны норадреналина включены в клеточные группы от А1 до А7.

Группы А1 и А2 состоят из нейронов, окружающих латеральное ретикулярное ядро и дорсальное моторное ядро блуждающего нерва. Латеральное ретикулярное ядро относится к ядрам ретикулярной формации, находится латеральнее и ниже нижней оливы. Блуждающий нерв относится к черепным нервам и является смешанным. С ним соединены 4 ядра: дорсальное ядро блуждающего нерва, двойное ядро, ядро одиночного пути, спинномозговое ядро тройничного нерва. Дорсальное моторное ядро блуждающего нерва содержится в продолговатом мозге. К группе А1 относятся клетки от перекреста пирамид до передних отделов нижней оливы. Группа А2 имеет наибольшую плотность в промежуточном ядре, а также включает небольшую группу вблизи ядра одиночного пути.

Группы А5 – А7 представляют собой совокупность клеток, находящихся от ростральных отделов моста между верхней оливой и ядром лицевого нерва до вентролатеральных отделов центрального серого вещества среднего мозга. Группа А6 соответствует центру голубого пятна [12]. Расположение норадреналин-содержащих ядер А1 – А7 в мозге крысы показано на рис. 4.

Функция норадреналина характеризуется ответом «бей или беги» на опасность или сильный стресс.

«Бей или беги» – это состояние, при котором организм мобилизуется для устранения угрозы [13]. При этом повышается артериальное давление, расширяются зрачки, повышается частота сердечных сокращений. Это помогает быстро принимать решения в чрезвычайной ситуации. После того, как опасность миновала, и стрессовая ситуация прошла, концентрация норадреналина быстро уменьшается.

Однако норадреналин – это еще гормон счастья и облегчения. Он синтезируется, когда мы смотрим на красивые пейзажи, слушаем шум прибоя или музыку. Благодаря воздействию норадреналина человека посещают гениальные идеи. Низкое содержание норадреналина может повергнуть человека в депрессию. Повышенное его содержание, в свою очередь, приводит к эмоционально неустойчивому состоянию [14].

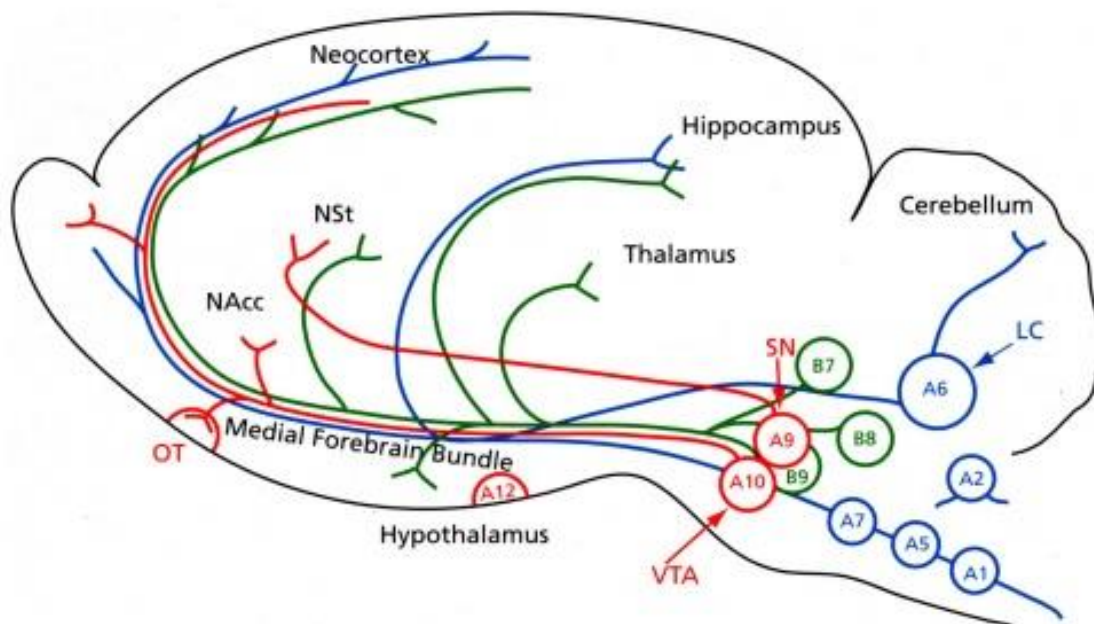


Рис. 4. Расположение норадреналин-содержащих ядер в мозге крысы

СХЕМА ПУТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НОРАДРЕНАЛИНА В ГОЛОВНОМ МОЗГЕ МЛЕКОПИТАЮЩЕГО

На рис. 5 изображена схема пути распространения норадреналина в головном мозге. Стрелки, обозначенные зеленым цветом, соответствуют норадреналиновой связи. Норадреналин является только возбуждающим нейромедиатором. Глутамат также является возбуждающим, и его связь обозначена желтым цветом.

Связь синего цвета принадлежит гамма-аминомасляной кислоте (ГАМК), которая оказывает тормозящее воздействие на нейроны. Красный цвет обозначает связь ацетилхолина, он может оказывать возбуждающее и тормозящее воздействие, как и дофамин и серотонин, связи которых обозначены розовым и серым цветами соответственно.

Норадреналин вырабатывается в голубом пятне и ядре одиночного пути и впоследствии расходится по различным отделам головного мозга [15]. Существуют два основных пути: дорсальный и вентральный.

Вентральный путь начинается в ядре одиночного пути и выходит в следующие зоны мозга [15]: латерально-спинное ядро покрышки; слой ядра бороздки на терминале; двигательная кора; миндалевидное тело; таламус; паравентрикулярное ядро.

Дорсальный путь начинается в голубом пятне и распространяется по следующим зонам головного мозга [15]: вентральная область покрышки; ядра paragigantocellular; perirhinal кора; ядра шва; стриатум; двигательная кора.

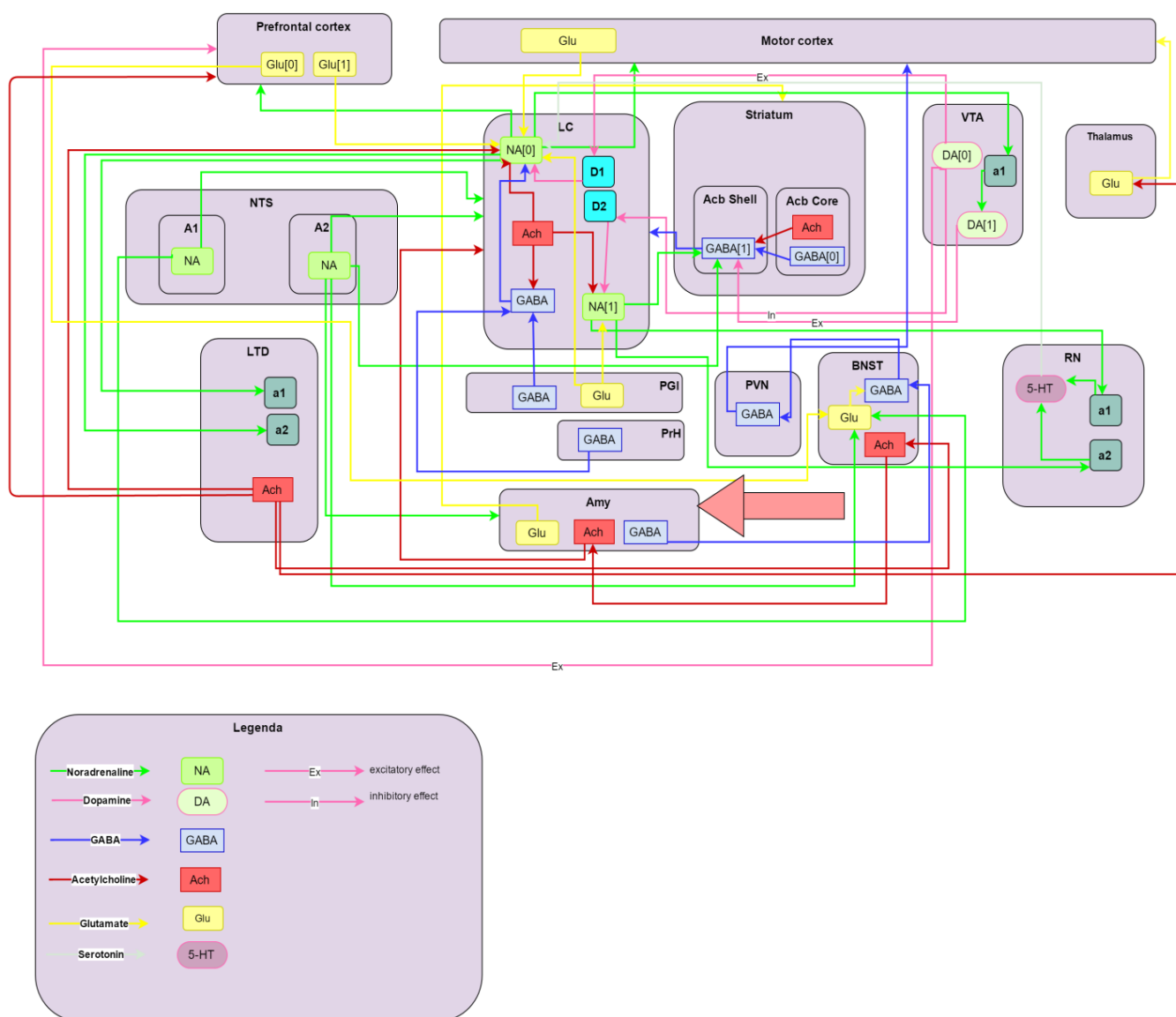


Рис. 5. Высокоуровневая архитектура норадреналиновой подсистемы нейронной импульсной сети мозга. LC – голубоватое пятно, VTA – вентральная область покрышки, NTS – ядро одиночного пути, PGI – ядра paragigantocellular, PrH – perirhinal кора, LTD – латерально-спинное ядро покрышки, RN – ядра шва, BNST – слой ядра бороздки на терминале, Striatum – стриатум, Prefrontal cortex – префронтальная кора, Motor cortex – двигательная кора, Amy – миндалевидное тело, Thalamus – таламус, PVN – паравентрикулярное ядро

МОДЕЛИРОВАНИЕ НОРАДРЕНАЛИНОВОЙ ПОДСИСТЕМЫ

Для моделирования сети биологических нейронов используется симулятор спайковых сетей NEST Initiative, выпущенный под названием SYNOD в 1994 году, впоследствии улучшенный и переименованный в NEST. Сейчас он имеет поддержку мирового сообщества и открыто распространяется под лицензией GNU в исходных кодах. Причиной такого выбора стала возможность с его помощью проводить моделирование больших спайковых сетей на суперкомпьютерах с поддержкой PI и OpenMP [16].

NEST подходит для моделей, сосредоточенных на динамике, размерах и структуре, а не на морфологических и биопсихических свойствах нейронов, таких, как модели обработки информации, например, в визуальной или слуховой коре млекопитающих; импульсной синхронизации сети; обучения и пластичности сенсорных процессов. В открытом доступе сейчас предоставлено более 50 моделей нейронных сетей.

Контролирует симуляционное ядро NEST пользовательский интерфейс PyNEST – пакет для языка Python. Он прост в использовании и хорошо взаимодействует с Python и его библиотеками. В связи с этим для реализации искусственной нейронной подсистемы на основе модели норадреналиновой подсистемы были сгенерированы файлы на языке программирования Python.

Высокоуровневая архитектура норадреналиновой системы представлена в виде xml-файла. На его основе генерируются файлы на языке программирования Python. Они содержат следующие исходные данные: зоны головного мозга, участвующие в пути распространения норадреналина; нейромедиаторы, участвующие в пути распространения норадреналина; связи между нейронами различных отделов мозга; количество нейронов в зонах головного мозга крысы; веса синаптических связей нейронов различных отделов мозга.

Моделирование норадреналиновой подсистемы происходит с помощью фреймворка NEST, его результаты представлены в виде диаграмм нейрональной активности различных отделов мозга модели, которые строятся Python-скриптами.

Так как вычислительные возможности современных компьютеров не позволяют воспроизвести модель норадреналиновой подсистемы, в которой задействовано большое количество нейронов, нами были использованы параметры

мозга крысы, а именно, количество нейронов в отделах ее головного мозга. Оно было найдено с использованием различных научных источников. Для отделов мозга, для которых не было найдено количество нейронов, использовались приближенные данные, установленные, исходя из физиологических характеристик. Полученное количество нейронов представлено в табл. 1.

Таблица 1. Количество нейронов в отделах мозга крысы

Отдел мозга	Количество нейронов
Motor cortex [Glu]	$29000000 * 0.8 / 6 + 29000000 * 0.2 / 6^D$
Prefrontal cortex [Glu0]	18 3000 ^D
Prefrontal cortex [Glu1]	18 3000 ^D
Ventral tegemntal area [DA0]	20 000 ^D
Ventral tegemntal area [DA1]	20 000 ^D
Striatum [ACh]	1 500 ^D
Striatum [GABA0]	14 250 ^D
Striatum [GABA1]	14 250 ^D
Amygdala [Glu]	30 000 ^D
Amygdala [ACh]	6 632 [17]
Amygdala [GABA]	3 629 [18]
Locus coeruleus [NA0]	1 750 [19]
Locus coeruleus [NA1]	1 750 [19]
Locus coeruleus [GABA]	400 [20]
Locus coeruleus [ACh]	500 *
Lateral dorsal tegmental nucleus [ACh]	1811 [21]
Perirhinal cortex [GABA]	3 627 [22]
Bed nucleus of stria terminalis [GABA]	12 000 *
Bed nucleus of stria terminalis [ACh]	2 200 *
Bed nucleus of stria terminalis [Glu]	31 500 *
Nucleus paragigantocellularis lateralis [GABA]	15 000 [23]
Nucleus paragigantocellularis lateralis [Glu]	15 000 [23]
Raphe nuclei [5-HT]	5 800 [24]
Nucleus tractus solitarii A1 [NA]	3 500 [24]
Nucleus tractus solitarii A2 [NA]	1 300 [25]
Paraventricular nucleus [GABA]	1 000 *
Thalamus [Glu] ^D	5000000 / 6

^D – значение взято из материалов по моделированию дофаминовой подсистемы нейронной сети мозга

* – значение приближенное

Далее, в качестве входных данных необходимы также веса синаптических связей нейронов. Во время распространения норадреналина они определяют, насколько сильно зоны головного мозга воздействуют друг на друга. Этот параметр подбирался в ходе экспериментальных запусков программы.

В силу имеющихся вычислительных возможностей построенная нейронная сеть состояла из 10000 нейронов. Ее моделирование осуществлялось на протяжении 200 мс, а активность нейронов регистрировалась каждую 0.1 мс.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ АКТИВАЦИИ ВЕНТРАЛЬНОГО ПУТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НОРАДРЕНАЛИНА

Моделирование вентрального пути распространения норадреналина в головном мозге проводилось с целью определения влияния норадреналиновой нейромодуляции на зоны, участвующие в активации норадреналинового пути. Основным источником норадреналина здесь являются группы нейронов норадреналина A1 и A2, которые находятся в ядре одиночного пути (Nucleus tractus solitarius – NTS). Импульс возникает в латерально-спинном ядре покрышки (Lateral dorsal tegmental nucleus – LTD). Далее идет сигнал на таламус, после – на моторную кору. Из ядра одиночного пути сигнал идет в ядро ложа концевой полоски (bed nucleus of stria terminalis – BNST). Если сигнал будет сильнее ингибирующего воздействия аминокислотной кислоты, то он перейдет в паравентрикулярное ядро (paraventricular nucleus – PVN). В ходе моделирования активность нейронов в паравентрикулярном ядре не была обнаружена, это говорит о том, что сигнал, поступающий из норадреналиновой группы A2, был не настолько сильным, чтобы перейти в паравентрикулярное ядро [15].

При моделировании генератор спайков был подключен к зоне ядра одиночного пути и латерально-спинному ядру покрышки.

Полученные результаты отображают зависимости от времени частоты импульса нейрона и потенциала на мембране нейрона. Активность нейронов различных областей мозга, участвующих в вентральном пути распространения норадреналина, изображена на рисунках 6 – 11. Мембранный потенциал нейронов

различных областей мозга, участвующих в вентральном пути распространения норадреналина, изображен на рисунках 12 – 17.

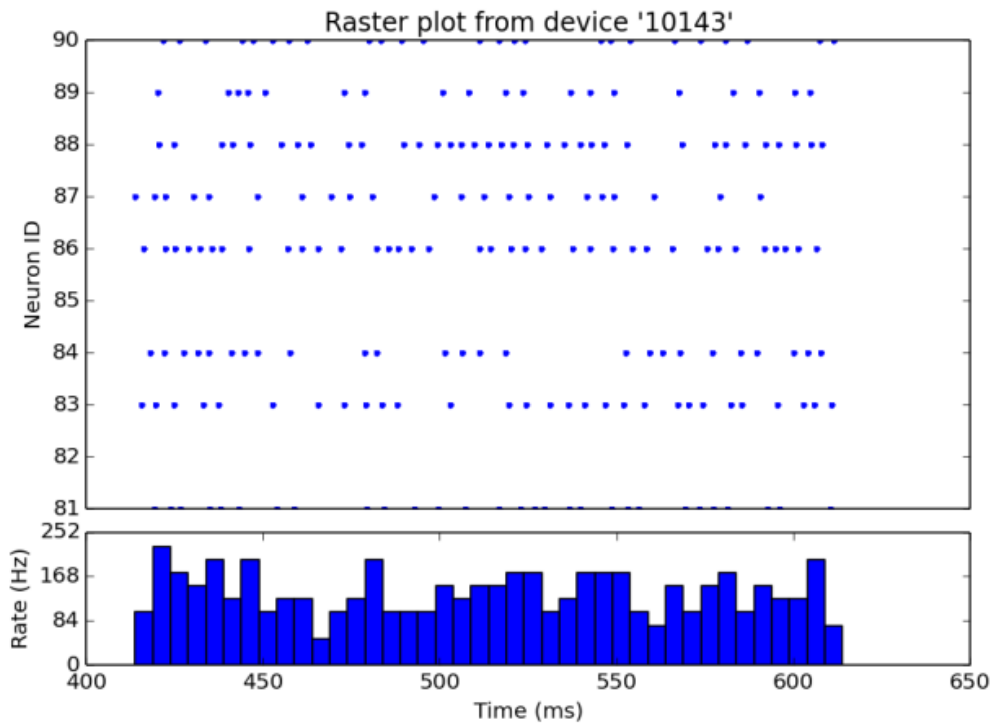


Рис. 6. Частота импульса (Гц) группы BNST [Glu] нейронов A2

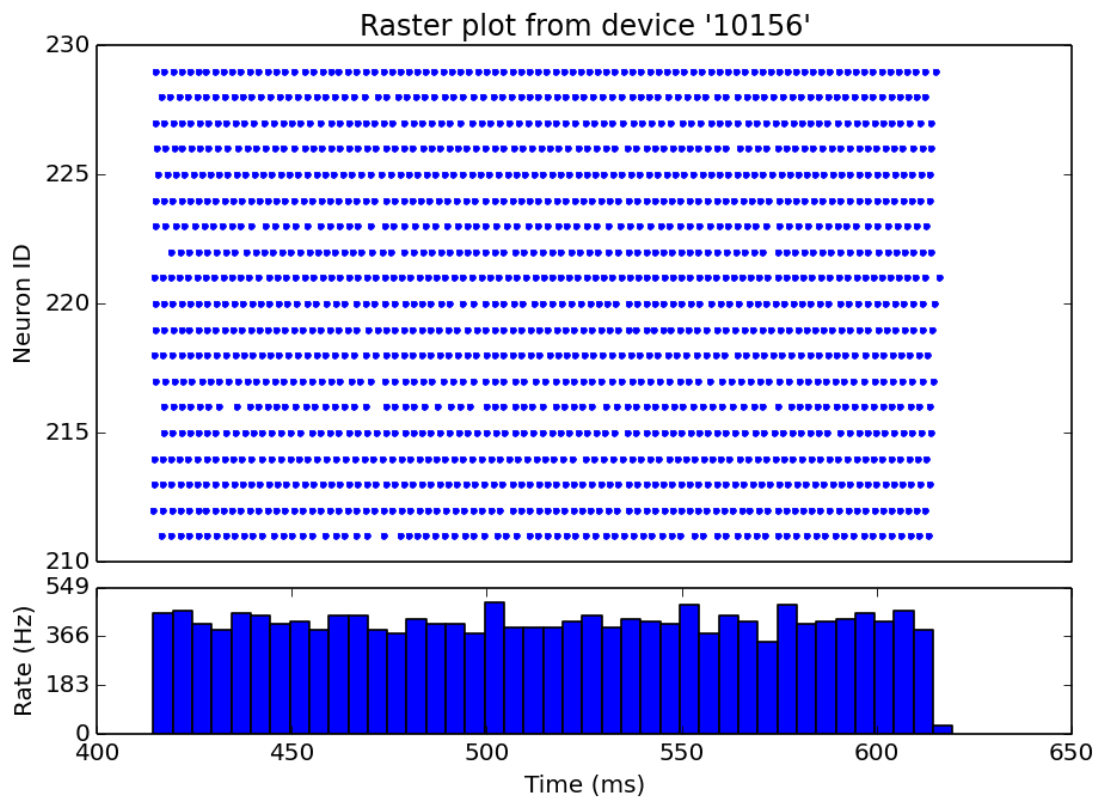


Рис. 7. Частота импульса (Гц)

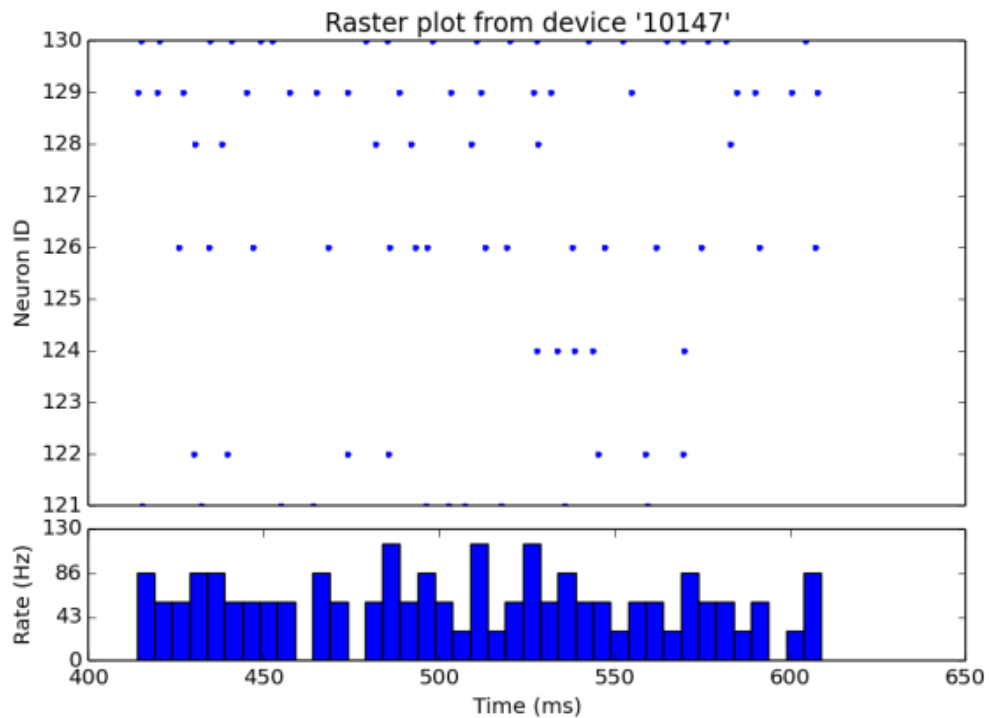


Рис. 8. Частота импульса (Гц) BNST [GABA]

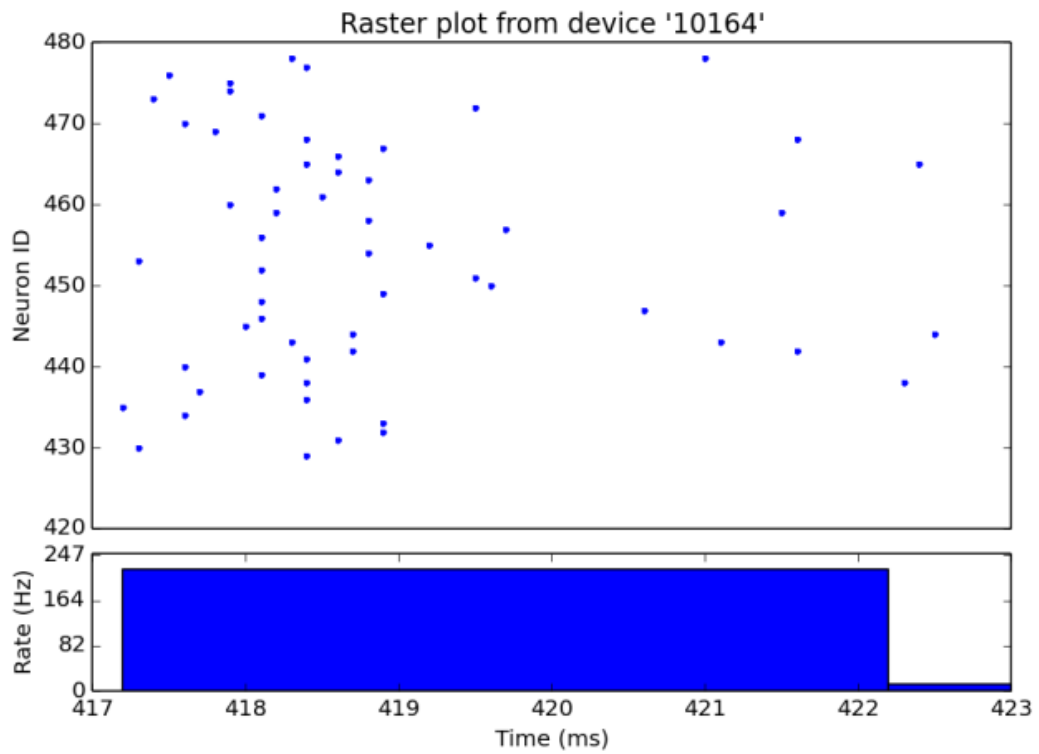


Рис. 9. Частота импульса (Гц) LTD

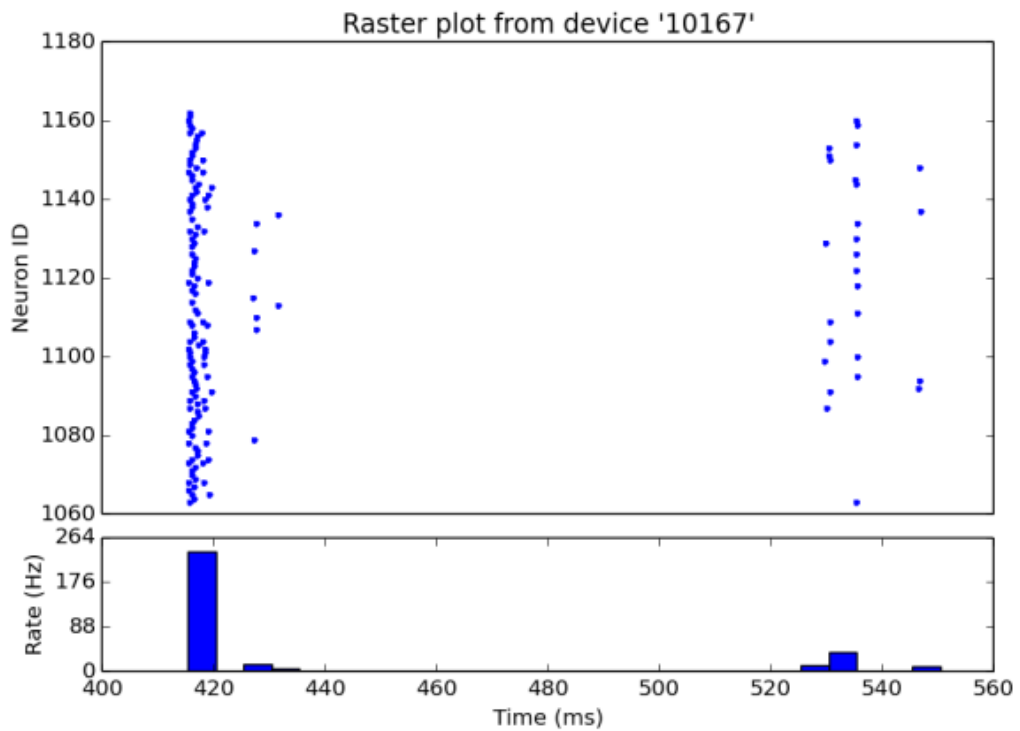


Рис. 10. Частота импульса (Гц) Thalamus

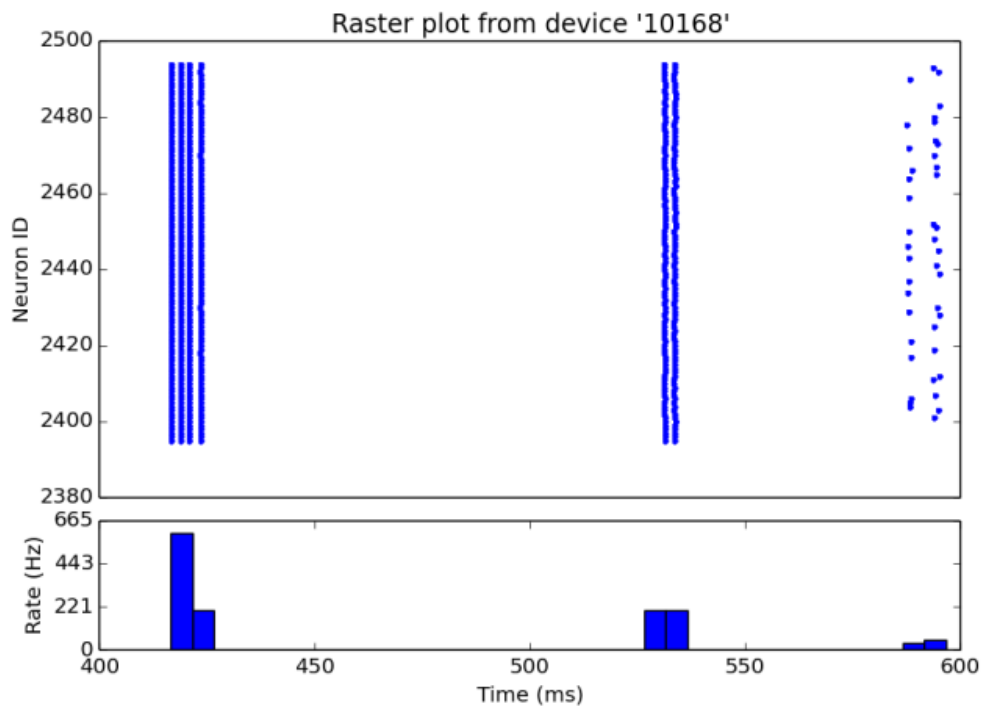


Рис. 11. Частота импульса (Гц) Motor cortex

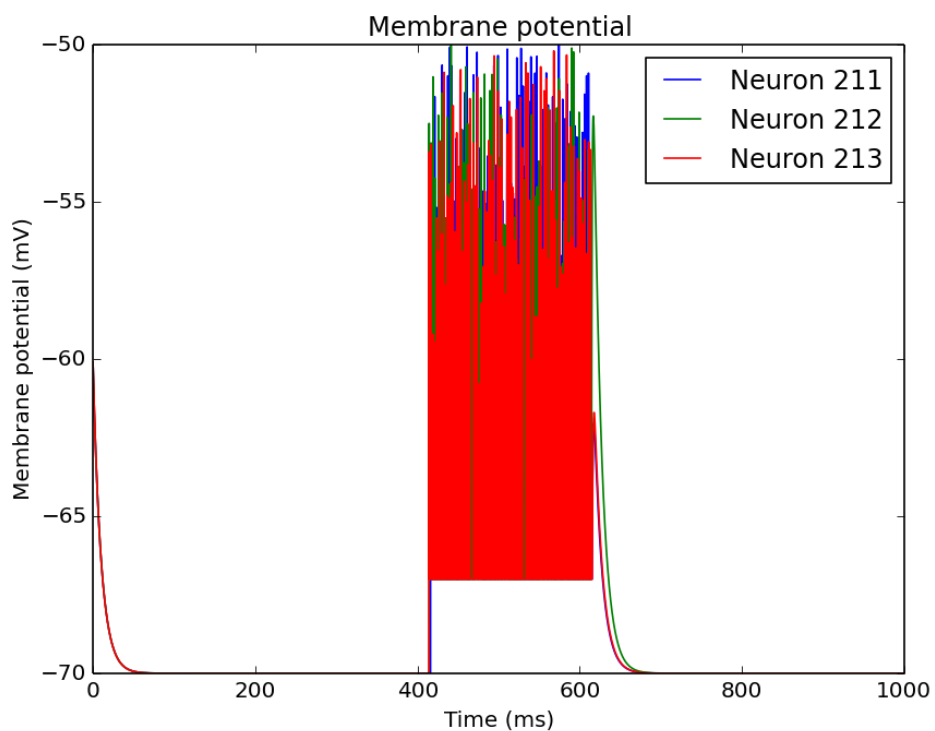


Рис. 12. Потенциала мембраны нейронов группы нейронов норадреналина A2

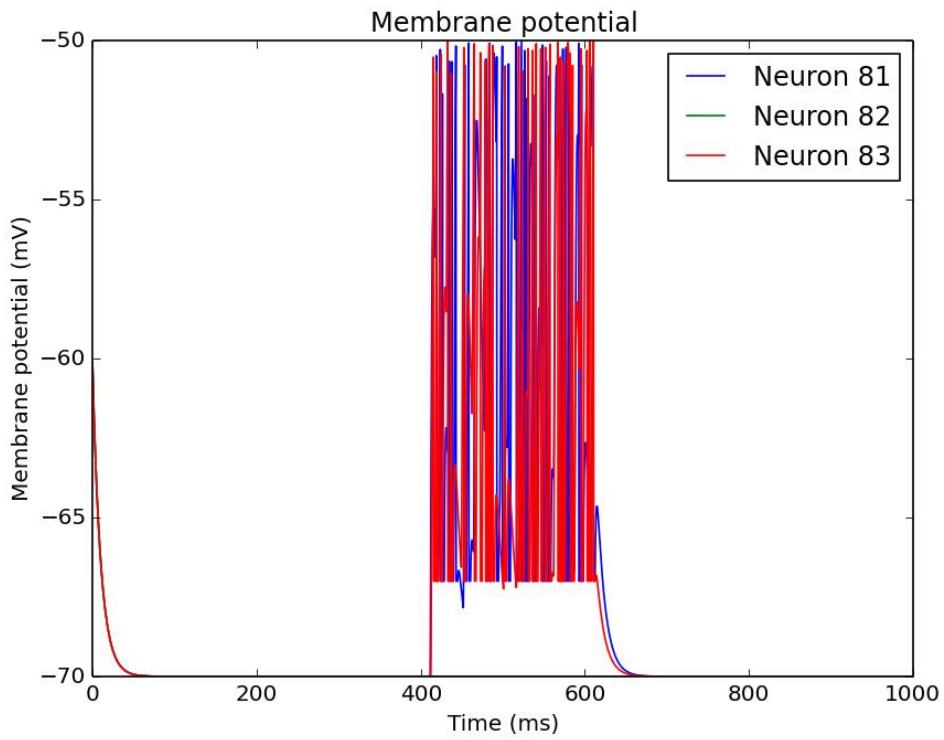


Рис. 13. Потенциала мембраны глутамата в BNST

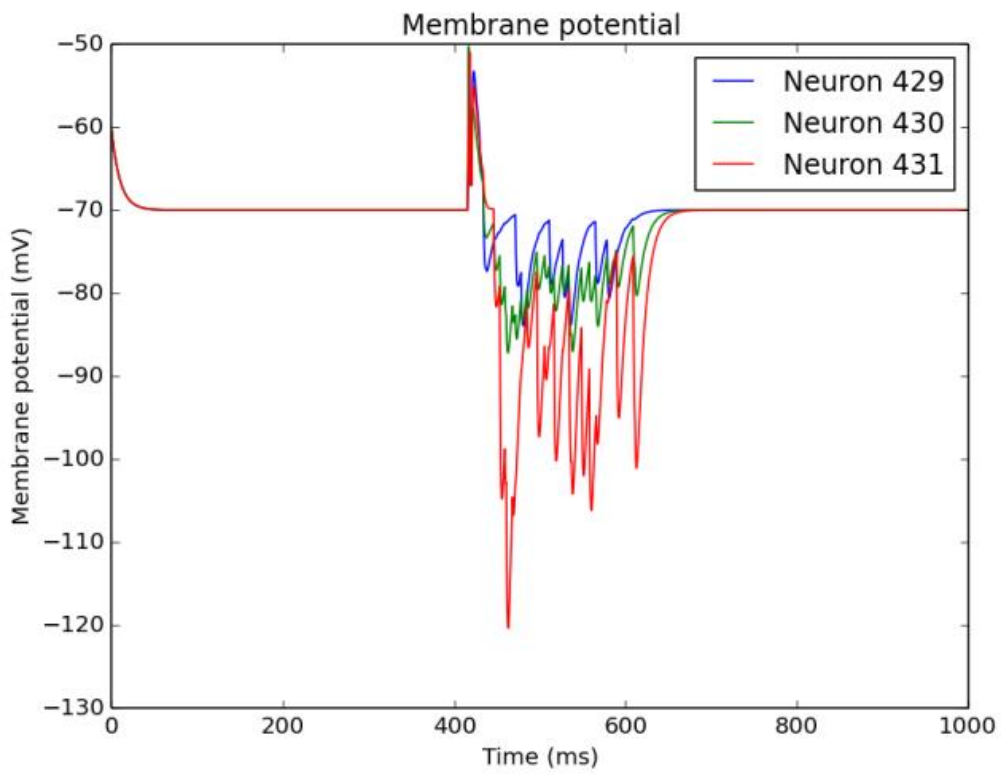


Рис. 14. Потенциала мембраны нейронов ГАМК в BNST

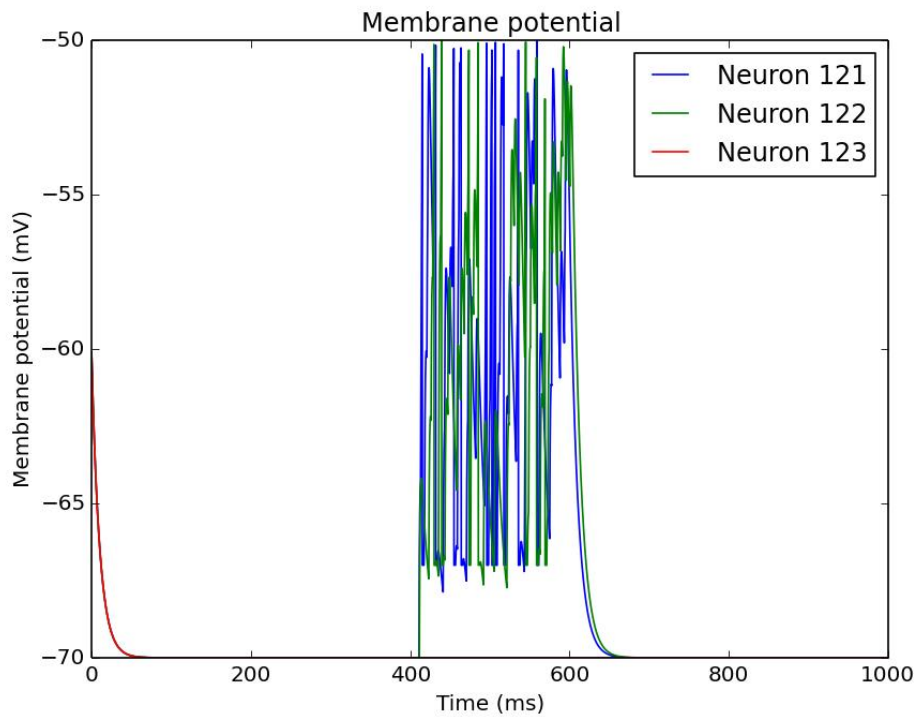


Рис. 15. Потенциала мембраны нейронов ацетилхолина в LTD

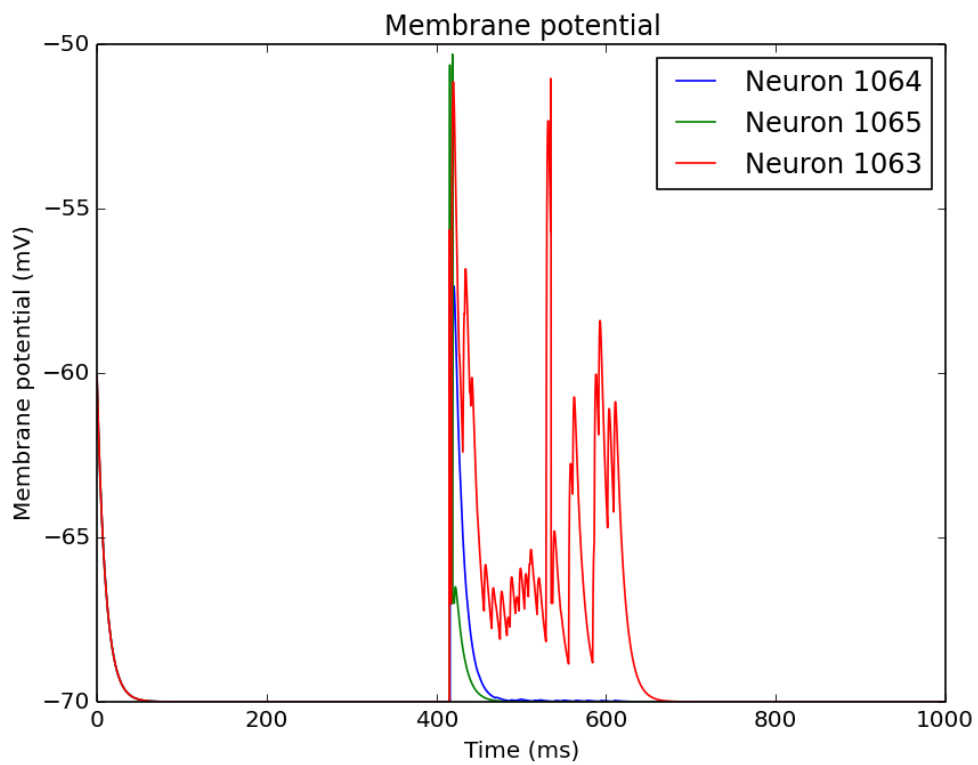


Рис. 16. Потенциал мембраны нейронов глутамата в Thalamus

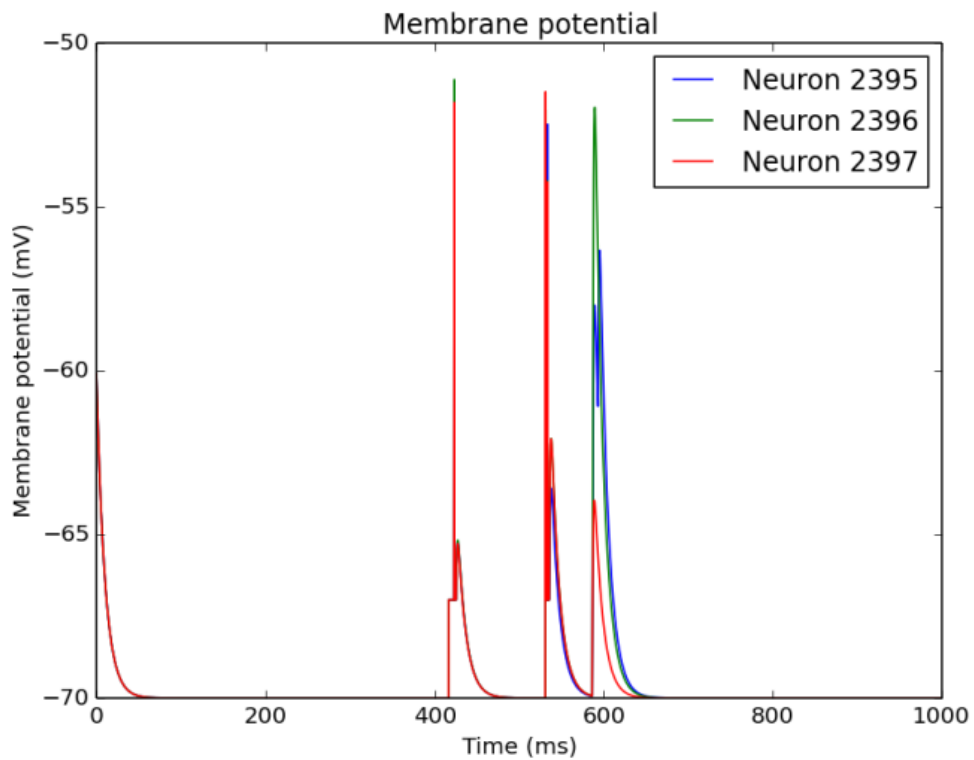


Рис. 17. Потенциала мембраны нейронов глутамата в Motor cortex

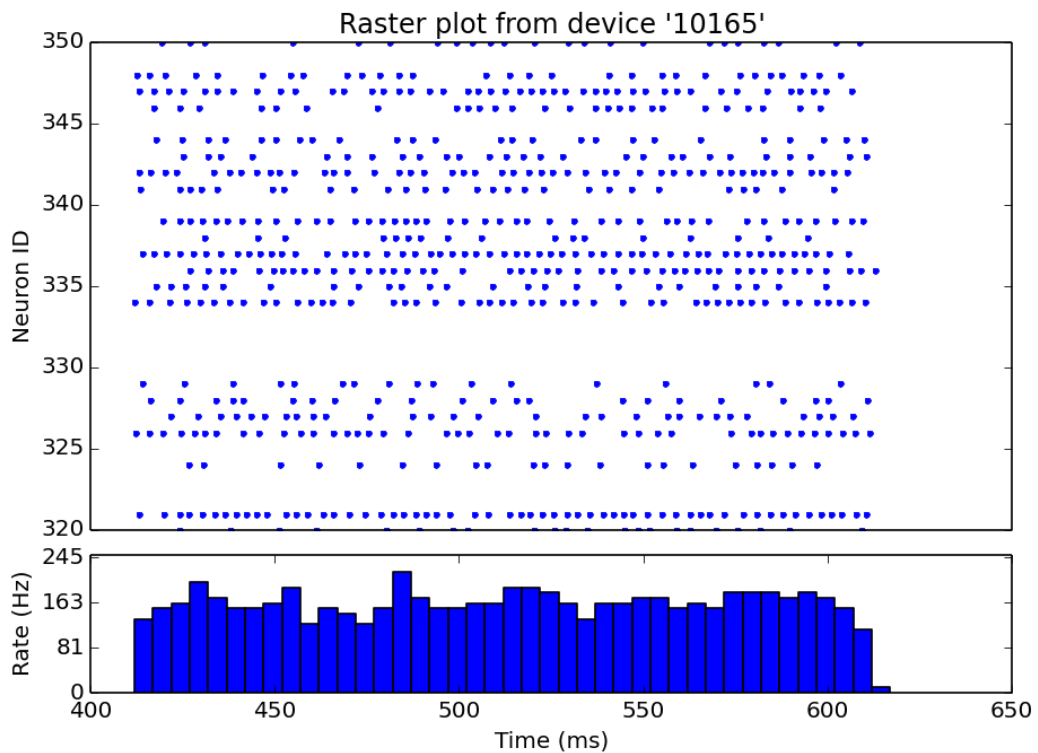


Рис. 18. Частота импульса (Гц) VTA[DA]

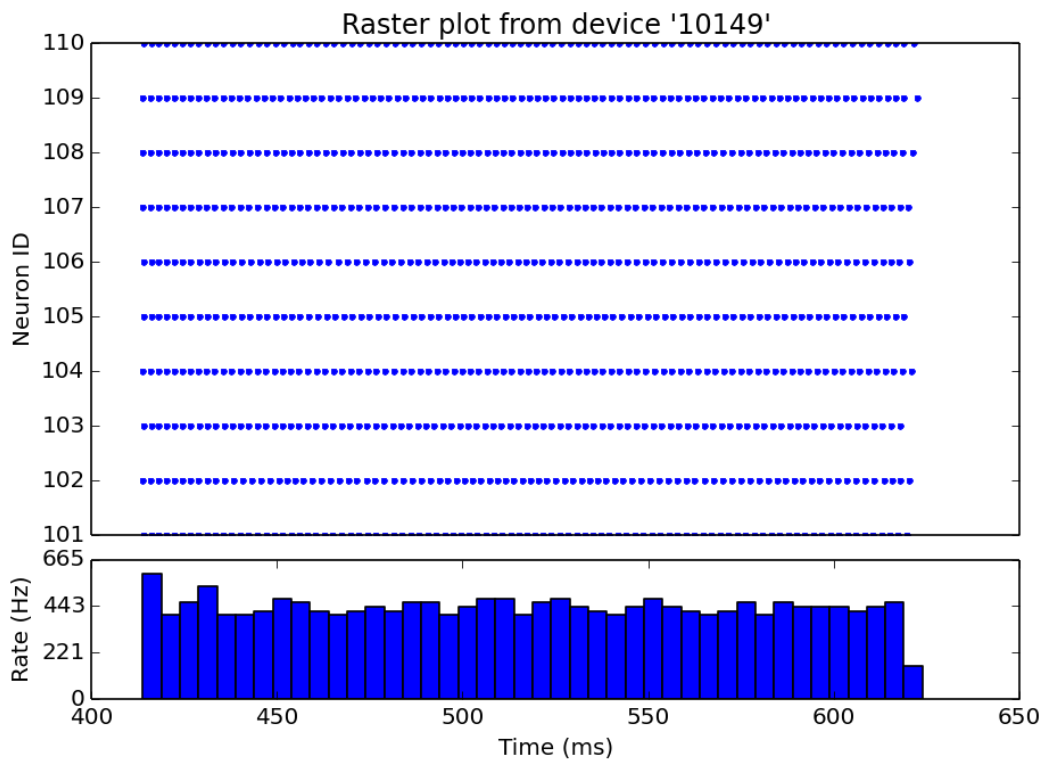


Рис. 19. Частота импульса (Гц) Locus Coeruleus [NA0]

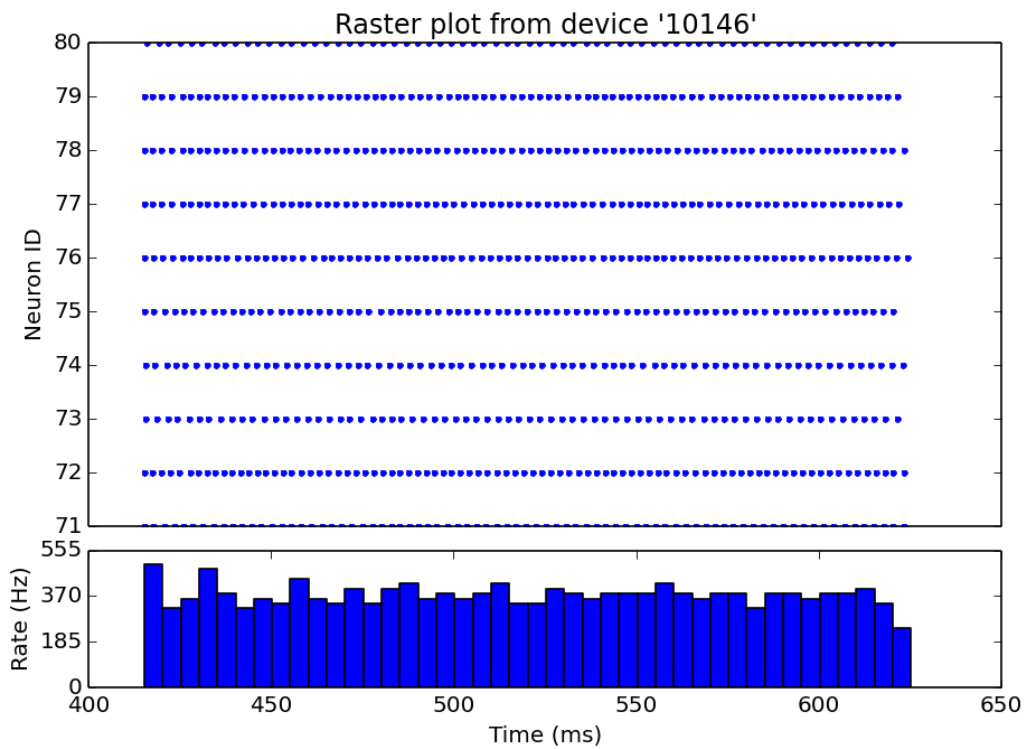


Рис. 20. Частота импульса (Гц) VTA [$\alpha 1$]

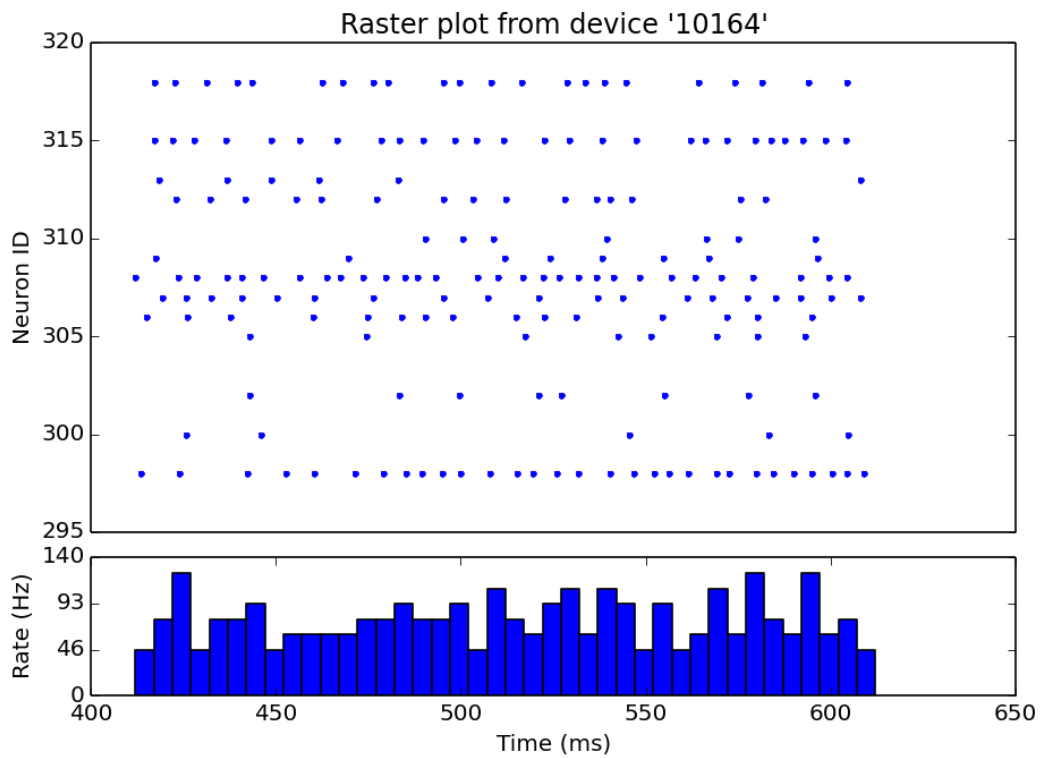


Рис. 21. Частота импульса (Гц) PGI[Glu]

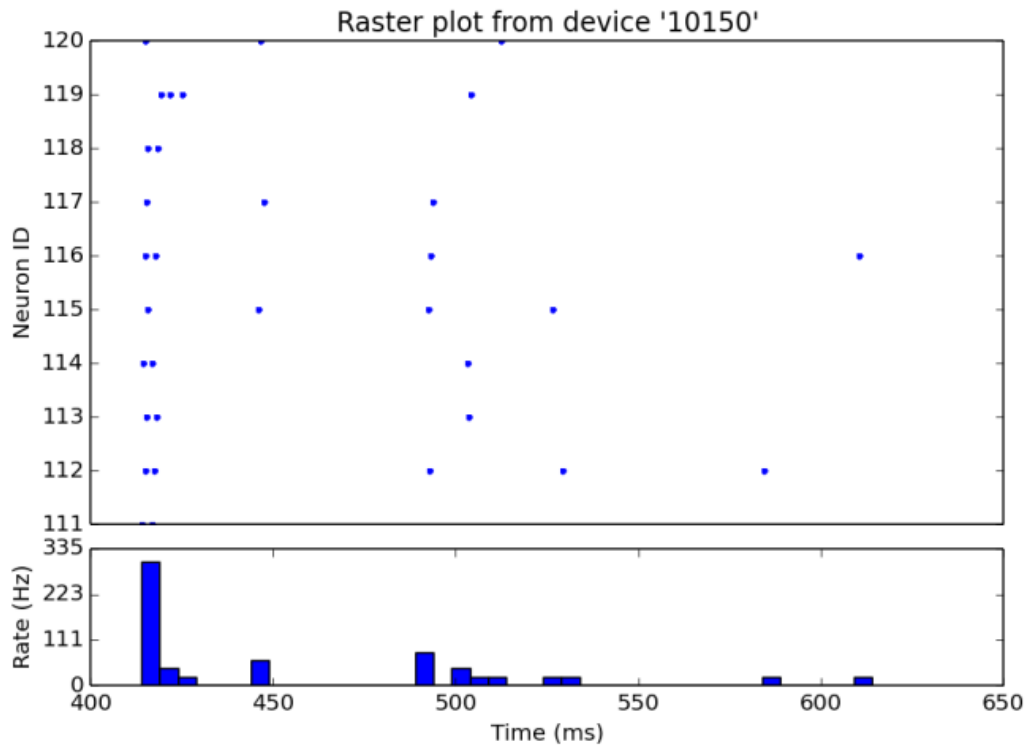


Рис. 22. Частота импульса (Гц) Locus Coeruleus [NA1]

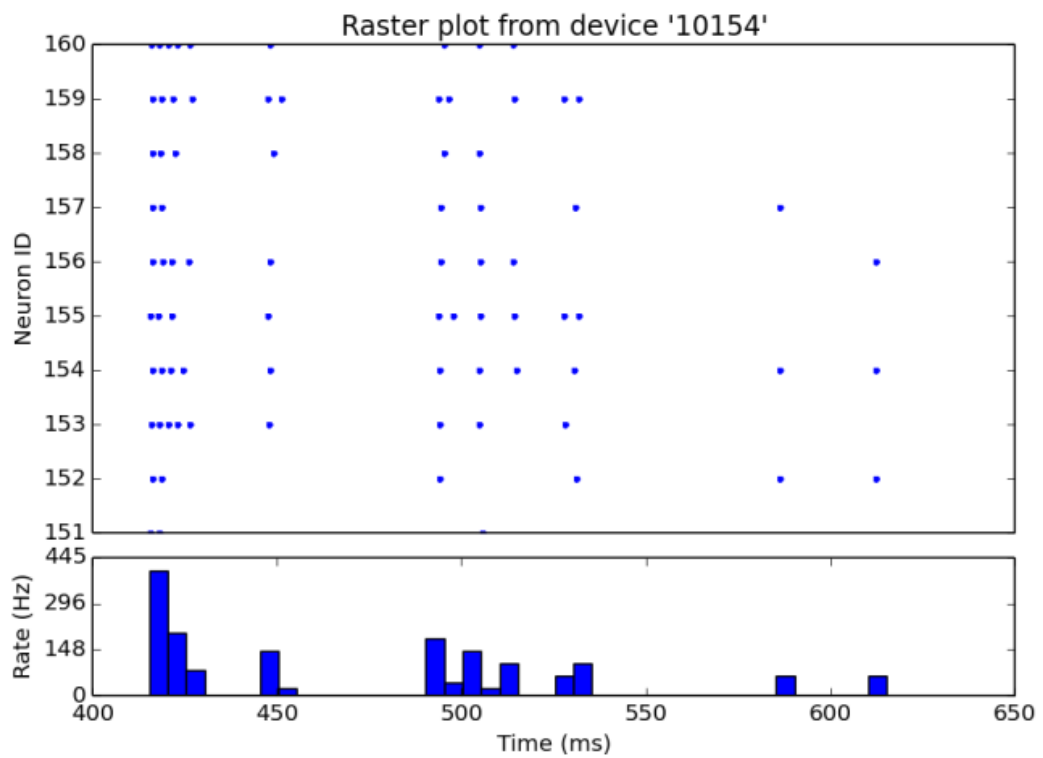


Рис. 23. Частота импульса (Гц) $RN[\alpha 1]$

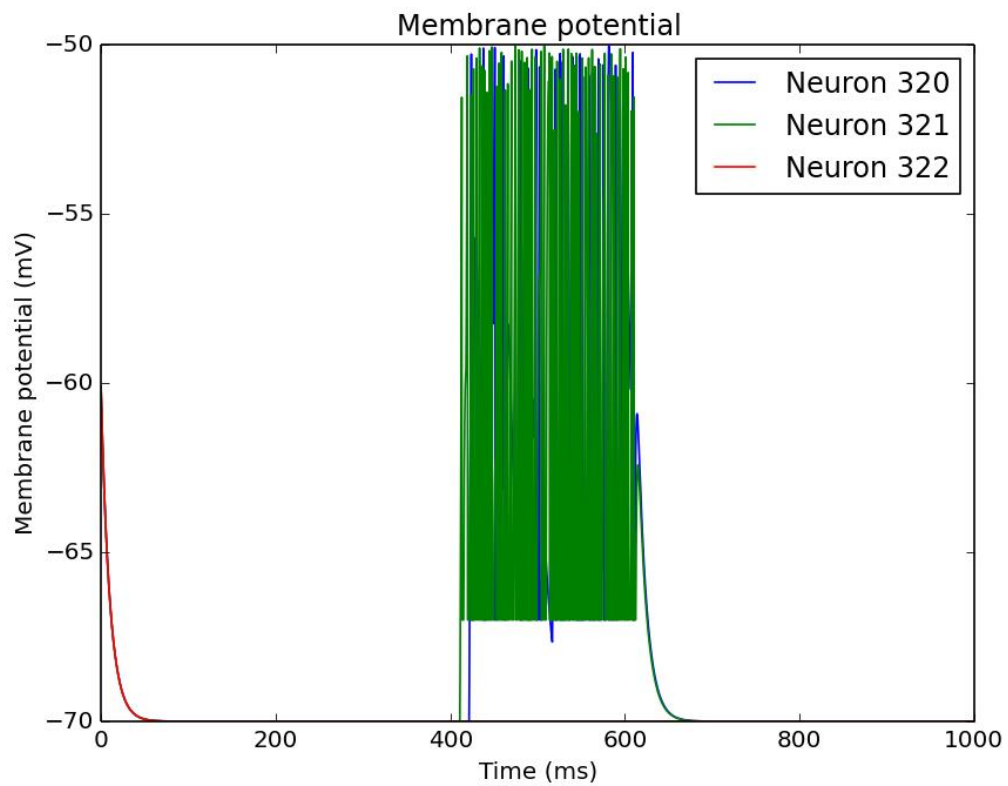


Рис. 24. Потенциала мембраны нейронов дофамина в VTA

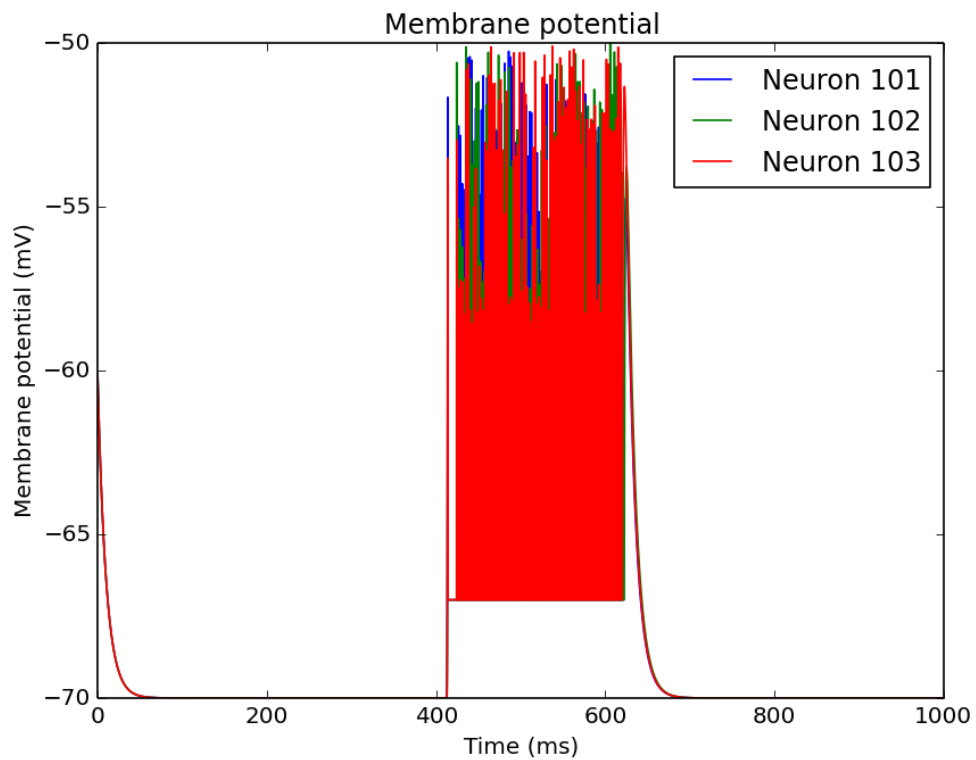


Рис. 25. Потенциала мембраны нейронов норадреналина [NA0] в Locus Coeruleus

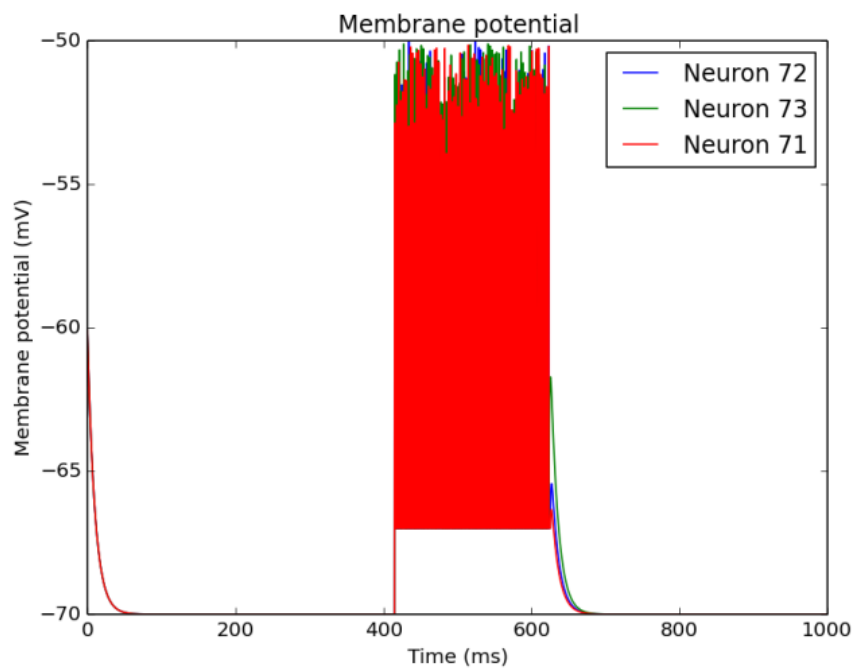


Рис. 26. Потенциала мембраны нейронов $\alpha 1$ в VTA

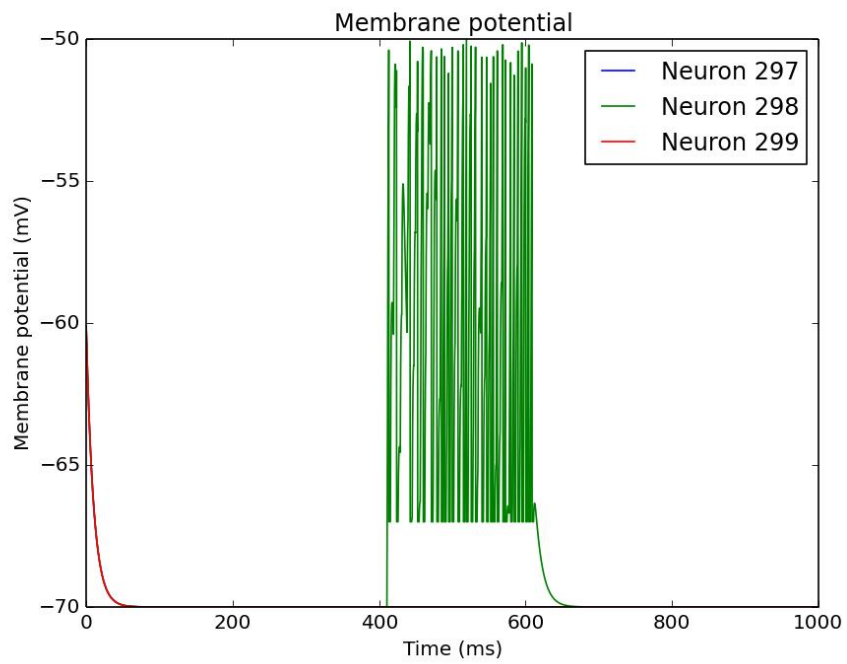


Рис. 27. Потенциала мембраны нейронов глутамата в PGI

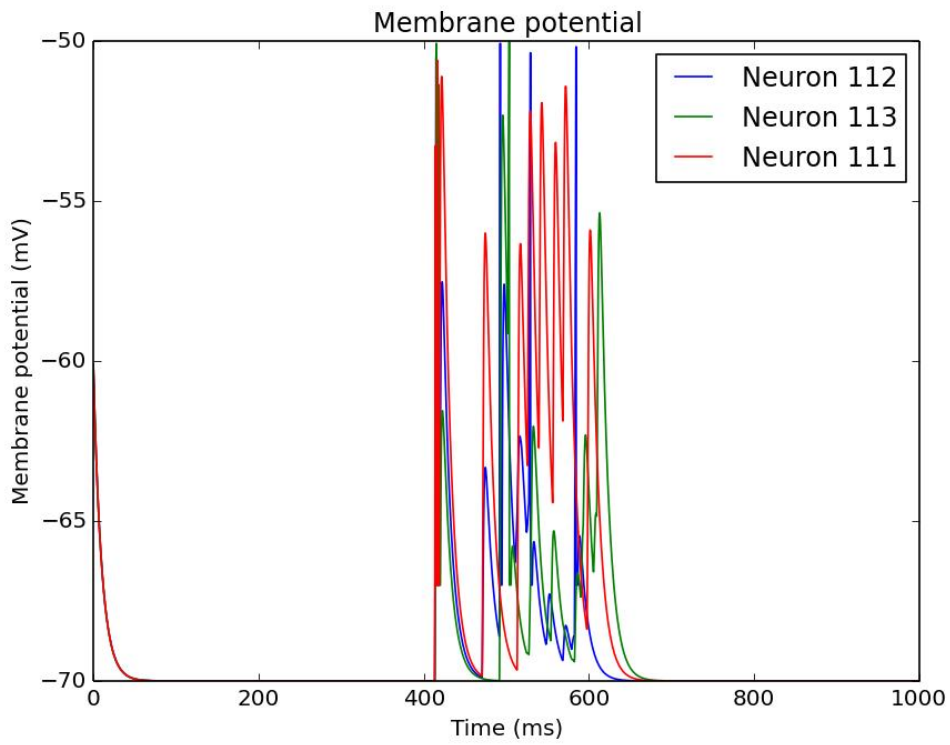


Рис. 28. Потенциала мембраны нейронов норадреналина [NA1] в Locus Coeruleus

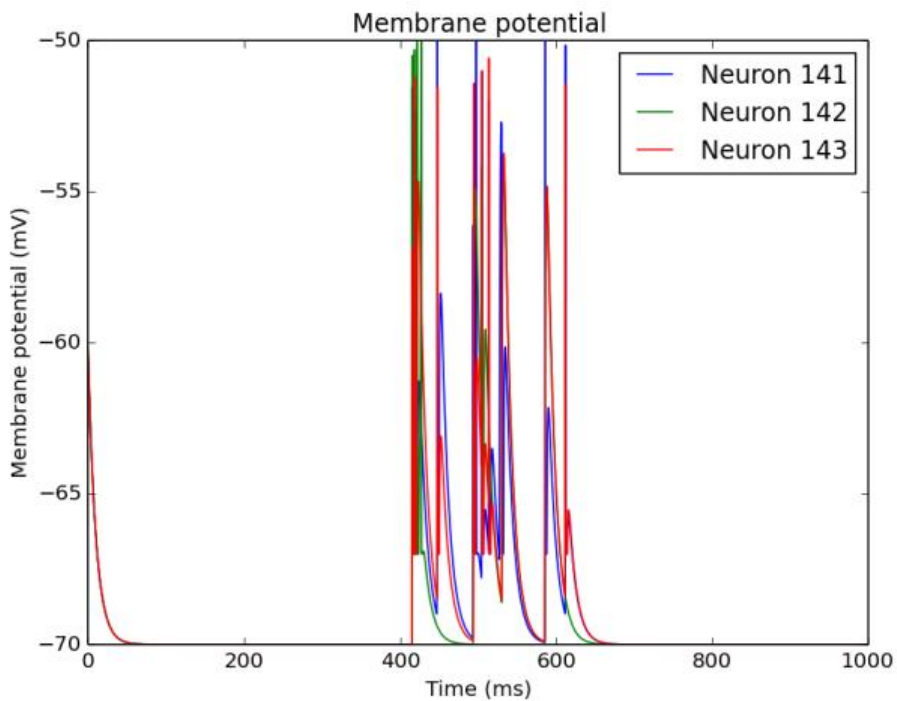


Рис. 29. Потенциала мембраны нейронов $\alpha 1$ в RN

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ АКТИВАЦИИ ДОРСАЛЬНОГО ПУТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НОРАДРЕНАЛИНА

Моделирование дорсального пути распространения норадреналина в головном мозге активирует его отделы следующим образом. Основным источником норадреналина является голубое пятно (*Locus coeruleus*). Активируют его высвобождение рецепторы D1 и D2, на которые проецируется дофамин из вентральной области покрышки (*Ventral tegemntal area – VTA*). Проекция на D1 оказывает возбуждающее воздействие, на D2 – тормозящее. Также афферентами к голубому пятну являются ядро *paragigantocellularis* (PGI) и вентромедиальный аспект *prepositus hypoglossi* (PrH). Стимуляция PGI сильно возбуждает нейроны локуса. Торможение вырабатывается при стимуляции PrH [15]. При проведении моделирования генератор спайков был подключен к *Motor cortex*, PGI, PrH, VTA. Активность нейронов различных областей мозга, участвующих в дорсальном пути распространения норадреналина, изображена на рисунках 18–23. Мембранный потенциал нейронов различных областей мозга, участвующих в дорсальном пути распространения норадреналина, изображен на рисунках 28–33.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НОРАДРЕНАЛИНОВОЙ ПОДСИСТЕМЫ

На рис. 30 показана активность нейронов ацетилхолина в латерально-спинном ядре покрышки (LTD), глутамата в таламусе (*Thalamus*) и глутамата в моторной коре (*Motor cortex*). Активность нейронов возникает в LTD, далее она передается на таламус и моторную кору.

Объединенные результаты работы дорсального пути норадреналина изображены на рисунках 31 и 32. На первом из них демонстрируются частота импульса нейронов норадреналина [NA0] в голубом пятне (*Locus coeruleus*) и активность адренергических рецепторов $\alpha 1$ в вентральной области покрышки (VTA). Нейроны дофамина [DA0] в вентральной области покрышки оказывают возбуждающее воздействие на нейроны норадреналина в голубом пятне, через проекции к рецепторам дофамина [D1]. Высокая активность нейронов норадреналина показана на рис. 31.

Проекции норадреналина на рецепторы $\alpha 1$ активируют дофамин [DA1] в вентральной области покрышки. Эти нейроны оказывают тормозящее воздействие на нейроны норадреналина [NA1] в голубом пятне. Мы можем наблюдать

их низкую активность в голубом пятне на рис. 32. Далее нейроны норадреналина [NA1] посылают сигналы к серотонину в ядра шва (Raphes nuclei). Активность нейронов серотонина изображена на рис. 33.

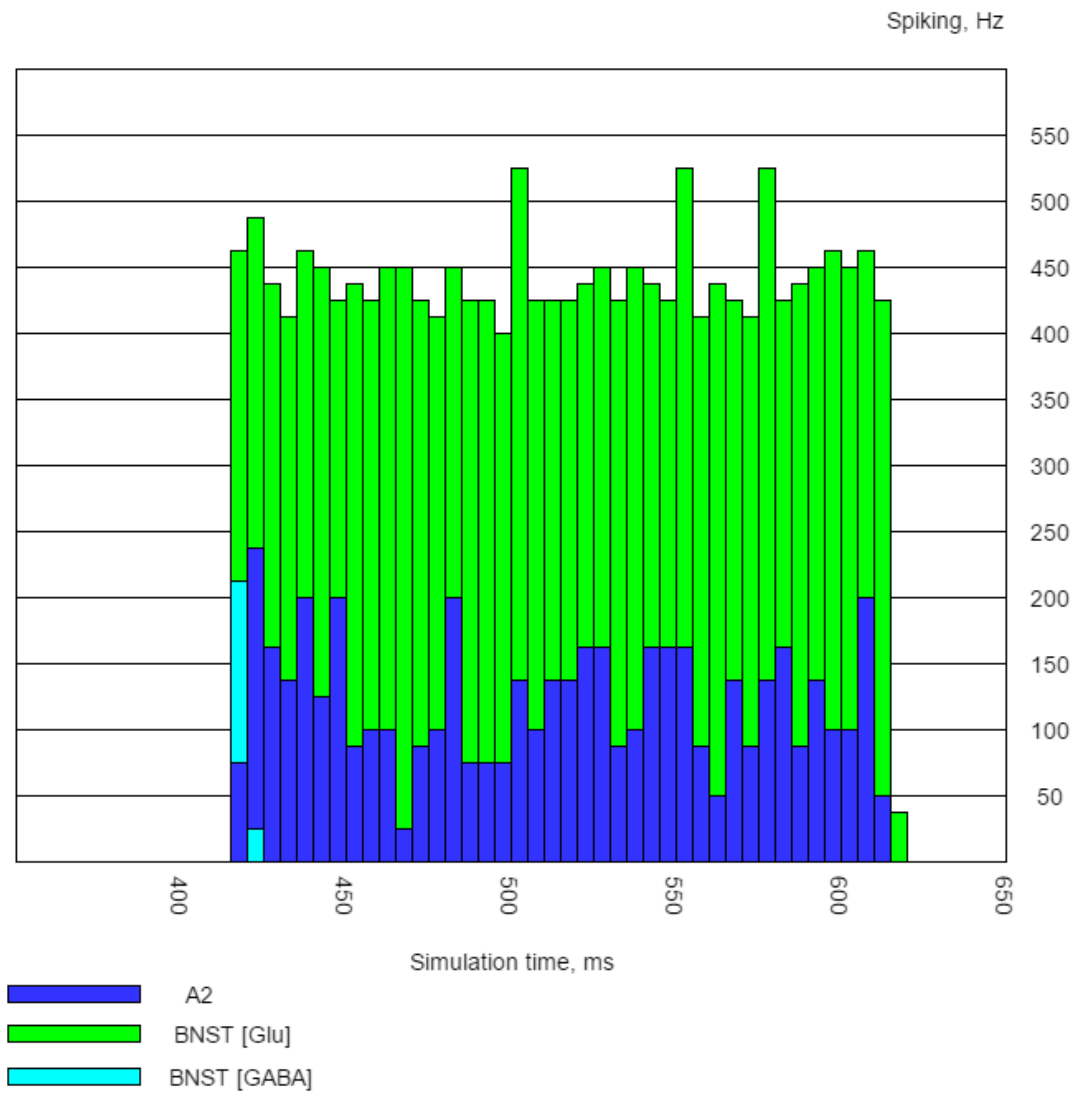


Рис. 30. Частота спайков нейронов группы A2 и BNST

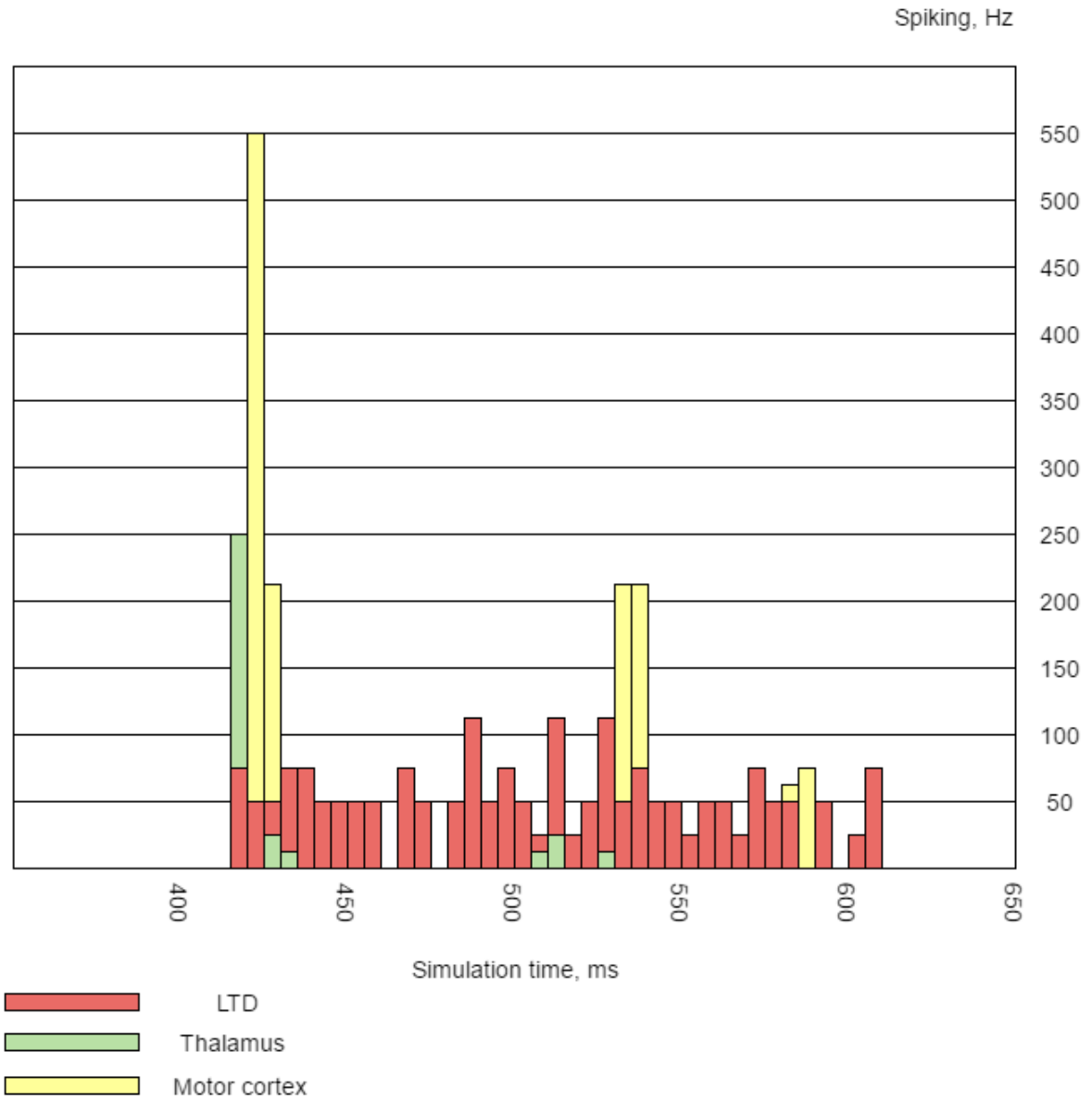


Рис. 31. Частота спайков LTD, Thalamus, Motor cortex

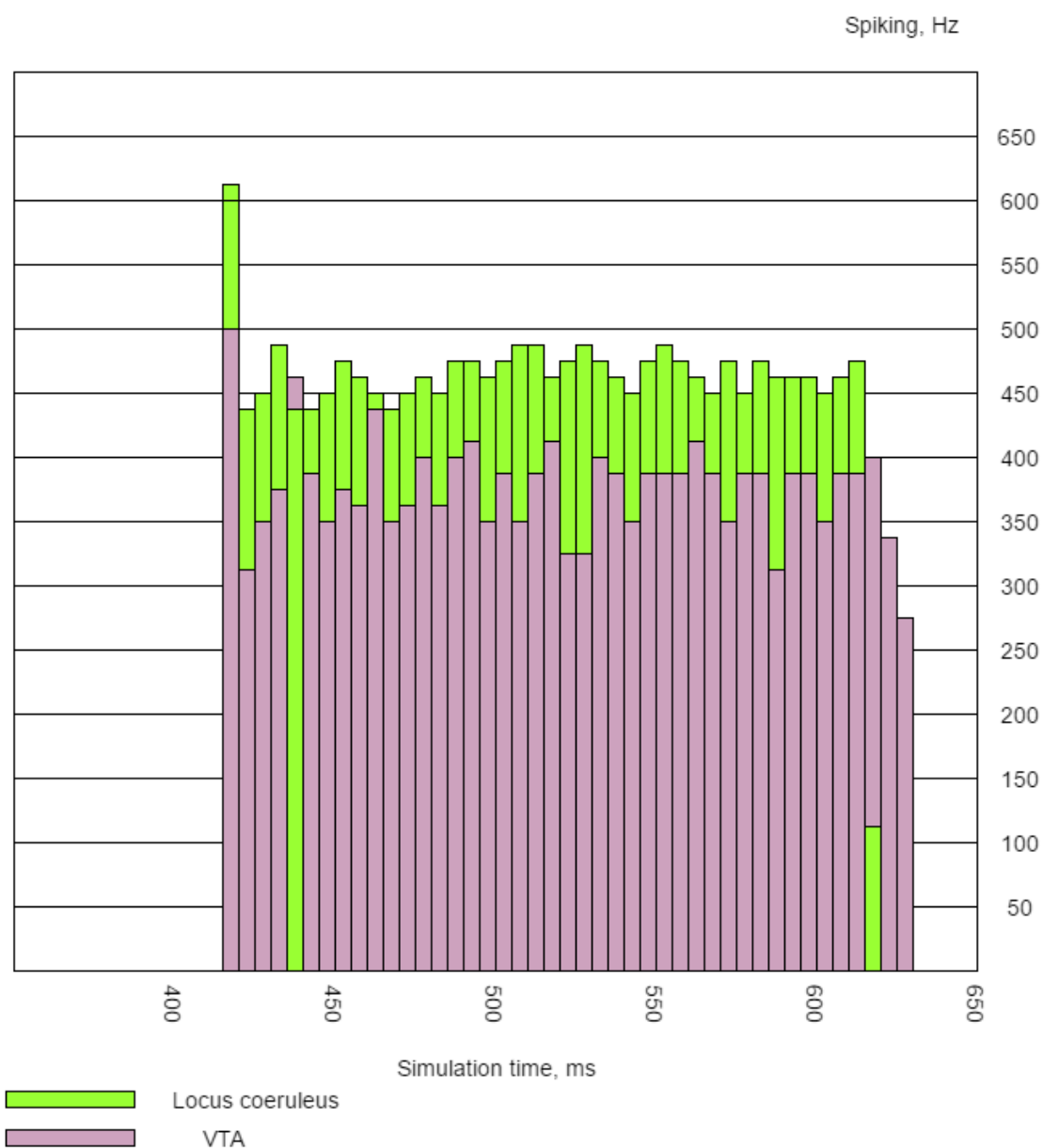


Рис. 32. Частота спайков Locus coeruleus, VTA

Таким образом, доказана работоспособность реализованной модели норадреналиновой подсистемы. Полученные результаты демонстрируют работу норадреналиновой подсистемы нейронной импульсной сети мозга млекопитающего. Говорить о реализации эмоционального состояния мы не можем, но наблюдаем рост вычислительной мощности.

При норадреналиновой нейромодуляции происходит повышенная спайковая активность в ядре ложа концевой полоски, вентральной области покрышки, моторной коре, что доказывает повышенную вычислительную мощность системы.

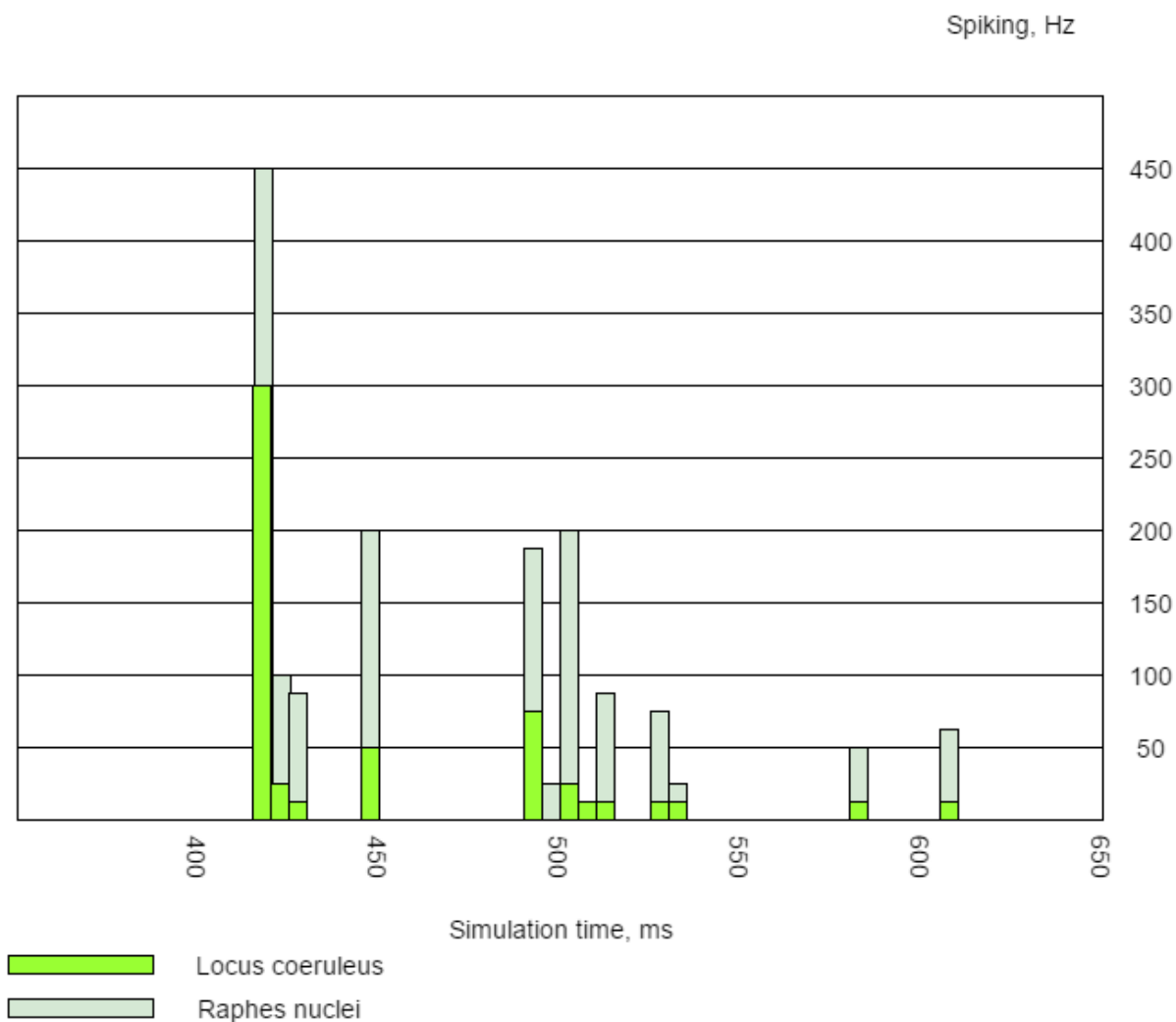


Рис. 33. Частота спайков Locus coeruleus, Raphes nuclei

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена норадреналиновая подсистема, проведен эксперимент, изучающий влияние нейромедиатора норадреналина на параметры вычислительной системы. Выполнен активный поиск реального количества нейронов зон головного мозга, участвующих в схеме распространения норадреналина в головном мозге. Проведено моделирование вентрального и дорсального путей норадреналина и экспериментально доказано, что при норадреналиновой модуляции происходит повышенная спайковая активность в ядре ложа концевой полоски, вентральной области покрышки, моторной коре, что доказывает повышенную вычислительную мощность системы. Последняя проявляется как повышенная спайковая активность после норадреналиновой нейромодуляции.

Моделирование норадреналиновой подсистемы позволит проводить исследования в области медицины, психологии и других областях, а также приблизит нас к возможности реализовать эмоциональные процессы в вычислительных системах так, как это устроено у человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lövheim H.* A new three-dimensional model for emotions and monoamine neurotransmitters // *Med Hypotheses*. 2012. V. 8. P. 341–348.
2. *Tomkins S.* Affect theory // In: P. Ekman, W. Friesen, P. Ellsworth, Eds. *Emotions in the Human Face*. Cambridge: Cambridge University Press, 1982. P. 355–395.
3. *Helena F., Debra K.* Emotions and social movements // *Routledge*. 2015. P. 19–41.
4. *Michael Cole M.* Culture and cognitive science // *Outlines*. 2003. No 1. P. 4.
5. *Ёлкин С.С., Клышинский Э.С., Максимов В.Ю., Мусаева Т.Н.* Модель бионической нейронной сети и ее применения // ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2008. С. 7–9.
6. *Purves D., Augustine G.J., Fitzpatrick D. et al.* *Neuroscience: 2nd edition* // (MA): Sinauer Associates. 2001. P. 4–8.
7. *Simon Haykin.* *Neural Networks A Comprehensive Foundation*. Second Edition. MsMaster University. 2006. P. 23–28.
8. *Колесницкий О.К., Бокоцей И.В., Яремчук С.С.* Аппаратная реализация элементов импульсных нейронных сетей с использованием биспин-приборов, Часть 1 // XII Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика», 2010. С. 122–127.
9. *Сланевская Н.М.* Мозг, мышление и общество. Часть 1. Центр Междисциплинарной нейронауки, 2012. С. 26–35.
10. *Lodish H., Berk A., Zipursky SL. et al.* *Molecular Cell Biology*, 4th edition. New York: W.H. Freeman, 2000. P. 287–298.
11. *Richard Finkel, Michelle Alexia Clark, Luigi X. Cubeddu.* *Pharmacology*. Lippincott Williams & Wilkins, 2008. P. 35–43.
12. *Päivi Marjamäki.* Imaging of dopamine and serotonin transporters Pre-

Clinical Studies with Radiotracers for Positron Emission Tomography // Turun Yliopisto University of Turku, 2011. P. 14–15.

13. *Cannon Walter B.* Bodily changes in pain, hunger, fear, and rage. Appleton-Century-Crofts, 1920. P. 184–214.

14. *Keith T., Bolshakov V.* Emotional enhancement of memory: how norepinephrine enables synaptic plasticity // Massachusetts: Molecular Brain, 2010. P. 1–3.

15. *Gregory A.O., Michael A.S., Frazer A.* Brain Norepinephrine: Neurobiology and Therapeutics. New York: Cambridge University Press, 2007. P. 157–257.

16. *Gewaltig Marc-Oliver, Diesmann Markus.* NEST (NEural Simulation Tool) // Scholarpedia. 2007. V. 2, No 4. P. 1430. URL: [http://www.scholarpedia.org/article/NEST_\(NEural_Simulation_Tool\)](http://www.scholarpedia.org/article/NEST_(NEural_Simulation_Tool)).

17. *Zaborszky L., Anthony van den Pol, Gyengesi E.* The Basal Forebrain Cholinergic Projection System in Mice. Academic Press Elsevier, 2012. 686 p.

18. *Mcdonlad A.J., Mascagni F.* Colocalization of calcium-binding properties and GABA in neurons of the rat basolateral amygdala // Department of Cell Biology and Neuroscience, 2000. P. 681–693.

19. *Masuko S., Nakajima Y., Nakajima S., Yamaguchi K.* Noradrenergic neurons from the Locus Ceruleus in dissociated cell culture: culture methods, morphology, and electrophysiology // Journal of Neuroscience. 1986. P. 3229–3241.

20. *Gary Aston-Jones, Yan Zhu, J. Patrick.* Card numerous GABAergic afferents to Locus Ceruleus in the pericerular dendritic zone: possible interneuronal pool // Journal of Neuroscience. 2004. P. 2313–2321.

21. *Hui-Ling Wang, Marisela Morales.* Pedunculo-pontine and laterodorsal tegmental nuclei contain distinct populations of cholinergic, glutamatergic and GABAergic neurons in the rat // Eur. J. of Neuroscience. 2009. P. 340–358.

22. *Gavrilovici C., D'Alfonso S., O. Poulter M.* Diverse interneuron populations have highly specific interconnectivity in the rat piriform cortex // Journal of Comparative Neurology. 2010. P. 1570–1588.

23. *Rockhold R.W., Liu N., Coleman D., Commiskey S., Shook J., Ho I.K.* The nucleus paragigantocellularis and opioid withdrawal-like behavior // Journal of Comparative Neurology. 2010. P. 270–276.

24. Ford B., Colin J., Holmes Mainville L., Barbara E. GABAergic neurons in the rat pontomesencephalic tegmentum: codistribution with cholinergic and other tegmental neurons projecting to the posterior lateral hypothalamus // *Journal of Comparative Neurology*. 1995. P. 177–196.

25. Akira Monji, Nobumitsu Morimoto, Iwao Okuyama, Kazuo Umeno, Ikuko Nagatsu, Yasuhiko Ibata, Nobutada Tashiro. The number of noradrenergic and adrenergic neurons in the brain stem does not change with age in male Sprague-Dawley rats // *Brain Research*. 1994. P. 171–175.

THE LOW LEVEL IMPLEMENTATION OF THE NORADRENALINE PATHWAYS OF SPIKING NEURAL NETWORK

J. Safandeeva¹, M. Talanov²

Kazan (Volga Region) Federal University

¹tsyganova0410@gmail.com; ²max.talanov@gmail.com

Abstract

We propose to re-implement basic emotions described by Silvan Tomkins via "Cube of emotions" of Hugo Lövhelm, and spiking NNs. We use the basic mechanism of noradrenaline neuromodulation and map it to the influence over computational processes in modern computers. We implement noradrenaline pathways via neuro-biological simulator NEST.

Keywords: NEST, Lövhelm, nor-adrenaline, NeuCogAR

REFERENCES

1. Lövhelm H. A new three-dimensional model for emotions and monoamine neurotransmitters // *Med Hypotheses*. 2012. V. 8. P. 341–348.
 2. Tomkins S. Affect theory // In: P. Ekman, W. Friesen, P. Ellsworth, Eds. *Emotions in the Human Face*. Cambridge: Cambridge University Press, 1982. P. 355–395.
 3. Helena F., Debra K. *Emotions and social movements* // Routledge. 2015. P. 19–41.
-

4. *Michael Cole M.* Culture and cognitive science // Outlines. 2003. No 1. P. 4.
5. *Yolkin S.S., Yolkin S.V., Klyshinskiy E.S., Maximov M.Yu., Musaeva T.N.* Model bionicheskoy neyronnoy seti i eyo primenennie // IPM im. M.V. Keldysha RAN. 2008. S. 7–9.
6. *Purves D., Augustine G.J., Fitzpatrick D. et al.* Neuroscience: 2nd edition // (MA): Sinauer Associates. 2001. P. 4–8.
7. *Simon Haykin.* Neural Networks A Comprehensive Foundation. Second Edition. MsMaster University. 2006. P. 23–28.
8. *Kolesnitskiy O.K., Bokotsey I.V., Yaremchuk S.S.* Apparalnaya realizatsiya elementov impulsnykh neyronnykh setey s ispolzovaniem bispin-priborov, P.1 // Neyroinformatika. 2010. S. 122–127.
9. *Slanevskaya N.M.* Mosg, myshlenie, obtschestvo, P. 1. Centr Mezhdisciplinarnoy neyronauki. 2012. S. 26–35.
10. *Lodish H., Berk A., Zipursky SL. et al.* Molecular Cell Biology, 4th edition. New York: W.H. Freeman, 2000. P. 287–298.
11. *Richard Finkel, Michelle Alexia Clark, Luigi X. Cubeddu.* Pharmacology. Lippincott Williams & Wilkins, 2008. P. 35–43.
12. *Päivi Marjamäki.* Imaging of dopamine and serotonin transporters Pre-Clinical Studies with Radiotracers for Positron Emission Tomography // Turun Yliopisto University of Turku, 2011. P. 14–15.
13. *Cannon Walter B.* Bodily changes in pain, hunger, fear, and rage. Appleton-Century-Crofts, 1920. P. 184–214.
14. *Keith T., Bolshakov V.* Emotional enhancement of memory: how norepinephrine enables synaptic plasticity // Massachusetts: Molecular Brain, 2010. P. 1–3.
15. *Gregory A.O., Michael A.S., Frazer A.* Brain Norepinephrine: Neurobiology and Therapeutics. New York: Cambridge University Press, 2007. P. 157–257.
16. *Gewaltig Marc-Oliver, Diesmann Markus.* NEST (NEural Simulation Tool) // Scholarpedia. 2007. V. 2, No 4. P. 1430. URL: [http://www.scholarpedia.org/article/NEST_\(NEural_Simulation_Tool\)](http://www.scholarpedia.org/article/NEST_(NEural_Simulation_Tool)).
17. *Zaborszky L., Anthony van den Pol, Gyengesi E.* The Basal Forebrain Cholinergic Projection System in Mice. Academic Press Elsevier, 2012. 686 p.
18. *Mcdonlad A.J., Mascagni F.* Colocalization of calcium-binding properties and

GABA in neurons of the rat basolateral amygdala // Department of Cell Biology and Neuroscience, 2000. P. 681–693.

19. *Masuko S., Nakajima Y., Nakajima S., Yamaguchi K.* Noradrenergic neurons from the Locus Ceruleus in dissociated cell culture: culture methods, morphology, and electrophysiology // *Journal of Neuroscience*. 1986. P. 3229–3241.

20. *Gary Aston-Jones, Yan Zhu, J. Patrick.* Card numerous GABAergic afferents to Locus Ceruleus in the pericerulear dendritic zone: possible interneuronal pool // *Journal of Neuroscience*. 2004. P. 2313–2321.

21. *Hui-Ling Wang, Marisela Morales.* Pedunculopontine and laterodorsal tegmental nuclei contain distinct populations of cholinergic, glutamatergic and GABAergic neurons in the rat // *Eur. J. of Neuroscience*. 2009. P. 340–358.

22. *Gavrilovici C., D'Alfonso S., O. Poulter M.* Diverse interneuron populations have highly specific interconnectivity in the rat piriform cortex // *Journal of Comparative Neurology*. 2010. P. 1570–1588.

23. *Rockhold R.W., Liu N., Coleman D., Commiskey S., Shook J., Ho I.K.* The nucleus paragigantocellularis and opioid withdrawal-like behavior // *Journal of Comparative Neurology*. 2010. P. 270–276.

24. *Ford B., Colin J., Holmes Mainville L., Barbara E.* GABAergic neurons in the rat pontomesencephalic tegmentum: codistribution with cholinergic and other tegmental neurons projecting to the posterior lateral hypothalamus // *Journal of Comparative Neurology*. 1995. P. 177–196.

25. *Akira Monji, Nobumitsu Morimoto, Iwao Okuyama, Kazuo Umeno, Ikuko Nagatsu, Yasuhiko Ibata, Nobutada Tashiro.* The number of noradrenergic and adrenergic neurons in the brain stem does not change with age in male Sprague-Dawley rats // *Brain Research*. 1994. P. 171–175.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



САФАНДЕЕВА Юлия Сергеевна – выпускница 2016 года Высшей школы информационных технологий и информационных систем Казанского (Приволжского) федерального университета.

Julia Sergeevna SAFANDEEVA, bachelor of Higher School Information technologies and systems of Kazan Federal University.

email: julia.safandeeva@gmail.com



ТАЛАНОВ Максим Олегович – кандидат технических наук, руководитель Лаборатории машинного понимания Высшей школы информационных технологий и информационных систем Казанского (Приволжского) федерального университета.

Maxim Olegovich TALANOV, PhD, head of Machine Cognition Lab in Higher Institute of Information Technology in Kazan (Volga `Region) Federal University.

email: max.talanov@gmail.com

Материал поступил в редакцию 15 мая 2016 года