

R e t I N a B o x

## Планы уроков

Версия 1.0



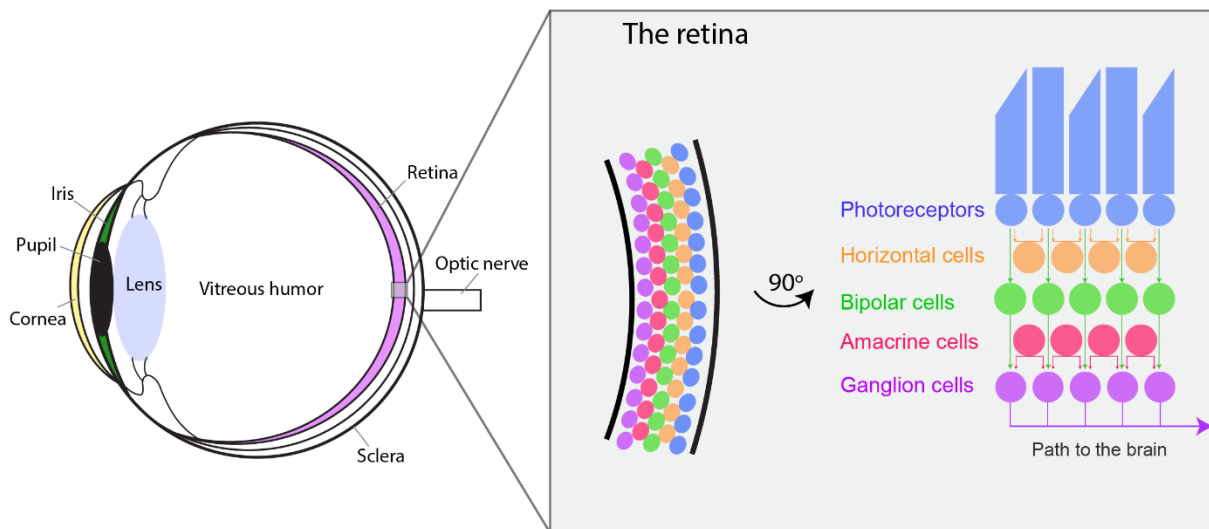
## Обзор зрительной системы: как мы видим?

Обработка зрительной информации начинается в **сетчатке** тонком слое светочувствительной мозговой ткани в задней части глаза (да, **сетчатка** это часть вашего мозга).

Внутри сетчатки нейроны, называемые **фоторецепторами**, воспринимают свет и преобразуют его в электрохимические сигналы. В процессе **фототрансдукции** изменение интенсивности света изменяет мембранный потенциал **фоторецептора**, то есть напряжение, или разность электрических потенциалов, между внутренней и внешней частями клетки. Это изменение мембранного потенциала влияет на количество нейромедиатора глутамата, выделяемого фоторецептором.

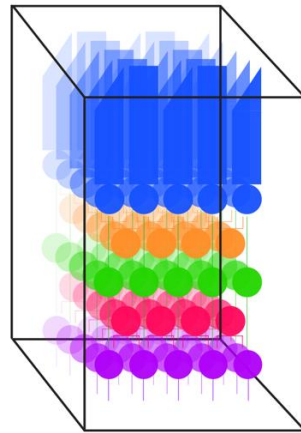
Эти сигналы, опосредованные фоторецепторами, передаются вспомогательными нейронами, называемыми **биполярными клетками**, к ганглиозным клеткам, которые посылают ретинальные сигналы из глаза в остальную часть мозга через зрительный нерв (**Рисунок 1**).

В сетчатке сложные структуры связей между биполярными, горизонтальными, амакриновыми и ганглиозными клетками (**Рис. 1**) преобразуют сигналы, опосредованные фоторецепторами (которые сами по себе просто сигнализируют об увеличении или уменьшении яркости), в селективные зрительные реакции. Это означает, что ганглиозные клетки реагируют только на определённые зрительные объекты. Например, один ганглиозный нейрон может реагировать только на появление светового пятна определённого размера, а другой ганглиозный нейрон может реагировать только на перемещение зрительного стимула слева направо по полю зрения..



**Рисунок 1.** Упрощённая схема сетчатки. Свет попадает в глаз и воспринимается фоторецепторами, которые передают сигналы ганглиозным клеткам через сеть дополнительных ретинальных клеток. Ганглиозные клетки интегрируют эти сигналы и передают их в остальные отделы мозга для дальнейшей интерпретации. Вот более подробное описание. Слева представлена схема глаза на английском языке. Справа – клеточная мембрана, расположенная в задней части глаза. Синим цветом обозначены фоторецепторы, жёлтым – горизонтальные клетки, зелёным – биполярные клетки, красным – амакриновые клетки, а фиолетовым – ганглиозные клетки.

Однако анатомия сетчатки несколько сложнее, чем описано выше. Фоторецепторы (и все остальные типы клеток, изображённые выше) расположены в плотном трёхмерном пространстве (**Рис. 2**). Внутри каждого слоя сетчатки клетки образуют двумерную мозаику (**Рис. 2**). Например, в слое фоторецепторов каждый отдельный фоторецептор улавливает изменения яркости крошечного участка зрительной сцены, но вместе все фоторецепторы кодируют полное изображение, представляющее поле зрения.

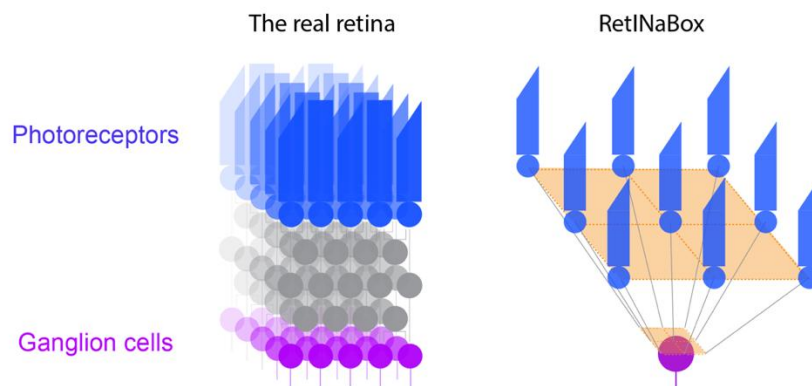


**Рисунок 2.** Схема сетчатки, иллюстрирующая мозаичное расположение клеток в сетчатке.

\*Более подробный обзор сетчатки можно найти на сайтах [theopenbrain.org](http://theopenbrain.org) и <https://webvision.med.utah.edu/>.

## РетнаБокс: упрощенная модель ранней зрительной системы

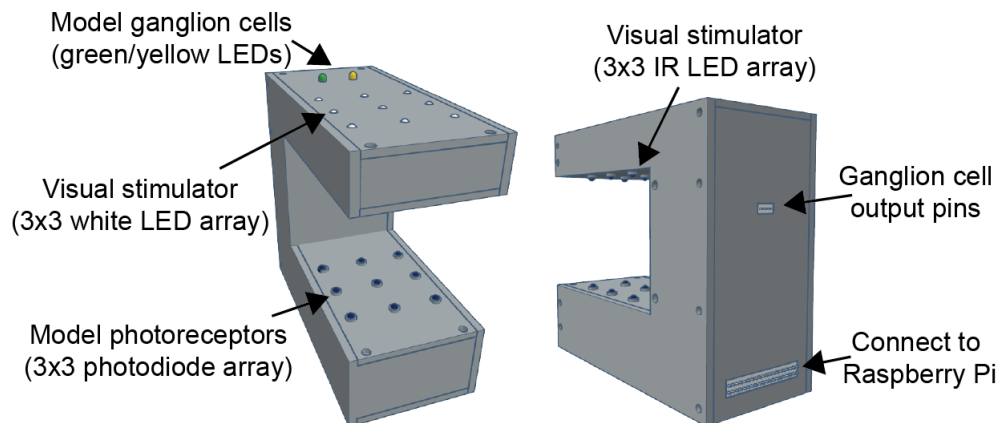
Как вы видели, реальная сетчатка сложна: множество типов клеток замысловато связаны между собой, образуя множество цепей. «РетнаБокс» это упрощённая модель сетчатки (**Рис. 3**), которая сохраняет ключевые принципы обработки зрительных сигналов, но при этом предоставляет практический инструмент для подключения, настройки и тестирования визуальных вычислений. Другими словами, он был разработан, чтобы помочь вам понять, как работает сетчатка. «РетнаБокс» содержит массив 3 x 3 модельных фоторецепторов, которые напрямую связаны с двумя модельными ганглиозными клетками сетчатки.



**Рисунок 3.** Схема упрощённой модели РетнаБокс. Свет воспринимается фоторецепторами, которые образуют синапсы на ганглиозных клетках. Справа показана связь между фоторецепторной матрицей 3 x 3 и одной из двух ганглиозных клеток модели РетнаБокс.

РетнаБокс состоит из нескольких ключевых компонентов (Рис. 4):

- А Массив светочувствительных **фотодиодов** 3 х 3, которые действуют как модельные **фоторецепторы**, которые обнаруживают изменения в инфракрасном свете (от ИК-светодиодов визуальной стимуляции РетнаБокс) и преобразуют эти визуальные сигналы в электрические сигналы, которые затем отправляются в 2 модельные ганглиозные клетки сетчатки
- Две модельные **ганглиозные** клетки сетчатки (РГК), которые интегрируют сигналы от модельных фоторецепторов



**Рисунок 4.** Аннотированная схема РетнаБокс (вид спереди (слева), вид сзади (справа)). В верхней части корпуса расположены зелёно-жёлтые ганглиозные клетки и зрительный стимулятор. В нижней части — макеты фоторецепторов. На задней стороне корпуса расположены выходные контакты ганглиозных клеток и разъём для подключения к компьютеру Raspberry Pi.

Каждая ганглиозная клетка реагирует, получая положительный сигнал от достаточного количества фоторецепторов, в зависимости от заданного пользователем порога. Каждый фоторецептор может быть связан с одной или обеими ганглиозными клетками. **Вы можете выбрать:**

- **Полярность:** активирует ли каждый фоторецептор (**возбуждающая, +1**) или подавляет (**тормозящая, -1**) ганглиозную клетку, с которой он связан, или же она молчит.
- **Временная задержка:** время, необходимое сигналу фоторецептора для достижения ганглиозной клетки (это моделирует асимметричную связность цепи, которая может быть полезна для обработки движения).
- **Порог:** количество положительных сигналов от фоторецептора, которые ганглиозная клетка должна получить для реакции. Если сумма сигналов от всех подключенных фоторецепторов не превышает заданного порога, ганглиозная клетка молчит.

Чтобы помочь вам проводить эксперименты с РетнаБокс, мы разработали простой в использовании **графический интерфейс пользователя (GUI)**! Он состоит из трёх компонентов (**Рис. 5**):

- (1) **Контроллер визуальных стимулов** (см. **Рис. 5**, левая панель; **Рис. 6**): управляет активацией светодиодной матрицы 3 x 3, что позволяет точно контролировать активацию фоторецепторов модели. Вы выбираете, какие светодиоды активно посылают свет на соответствующие фоторецепторы («активированные» светодиоды; активация светодиода происходит после выбора светодиода и включения контроллера визуальных стимулов). Светодиоды могут быть активированы в режиме «*Static*» (неподвижные стимулы) или «*Moving*» (стимулы движутся влево или вправо с медленной, средней или высокой скоростью). Используйте кнопку «*On/Off*» для переключения между режимами активации светодиодов.
- (2) **Менеджер подключений** (см. **Рис. 5**, средняя панель): позволяет пользователям подключать каждый фоторецептор модели к одной (или обеим) ганглиозным клеткам, задавая полярность сигнала (молчание, **возбуждающий (+)** или **тормозящий (-)**) и задержку (отсутствует, короткая, средняя или длинная).
- (3) **Монитор сигналов** (см. **Рис. 5**, правая панель): отображает вход и выход каждого фоторецептора, а также выход каждой ганглиозной клетки (активация ганглиозной клетки также отображается с помощью зеленого и желтого светодиодов в верхней части РетнаБокса).



**Рисунок 5.** Графический интерфейс РетнаБокс, включающий контроллер визуальных стимулов (слева), менеджер подключений (посередине) и монитор сигналов (справа)

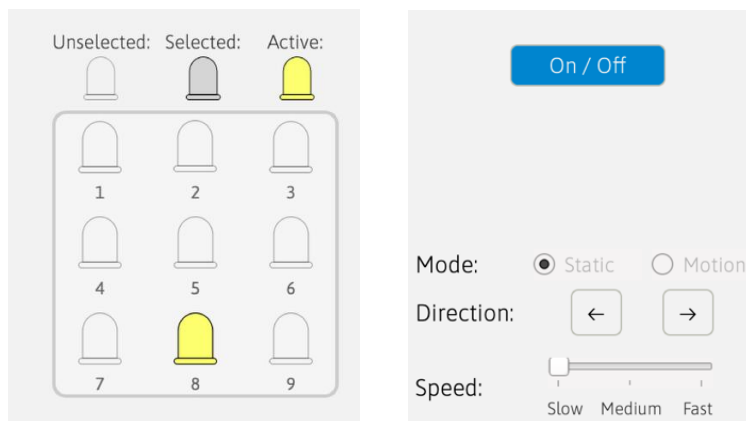
Такая установка достаточна для создания модели ганглиозных клеток с рецептивными полями, ориентированными по центру и периферии, и избирательными по направлению точно так же, как в настоящей сетчатке!

*\*Если вам нужна дополнительная помощь по программному обеспечению, обратитесь к руководству пользователя.*

## Как проверить схемы

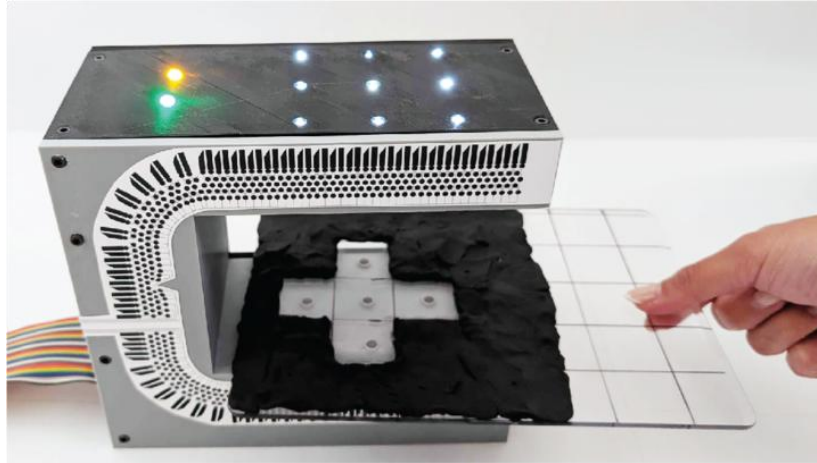
Каждый урок (описан ниже) включает в себя практические задания, которые помогут вам создать нейронные сети сетчатки, реагирующие на различные типы зрительных стимулов. Для каждой созданной вами сети у вас будет два способа проверить её зрительную избирательность:

- (1) **Активация светодиодов** (см. **Рис. 6**): вручную активируйте различные комбинации светодиодов в контроллере визуальных стимулов, чтобы стимулировать модели фоторецепторов различными световыми узорами. Это быстрый способ проверить, что ваша схема работает ожидаемым образом (т.е. что ваши ганглиозные клетки избирательно реагируют на определённые визуальные стимулы). Используйте кнопку «On/Off.» для включения/выключения светодиодов.



**Рисунок 6.** Интерфейс контроллера визуального стимула для выбора и активации светодиодов в массиве 3 x 3 для создания пользовательских шаблонов световой стимуляции.

**Ручная визуальная стимуляция с помощью инструмента «Визуальный стимул»** (см. **Рис. 7**): активируйте всю светодиодную матрицу. Затем создайте узоры с помощью инструмента «Визуальный стимул» пластины на прозрачной пластиковой пластине. Проведите пластину между светодиодами и фоторецепторными матрицами, чтобы выборочно блокировать свет, попадающий на определённые фоторецепторы. Это лучший способ проверить, что ваша зрительная система избирательно реагирует на определённые статические визуальные сигналы. Если вы ловкий, можете управлять узором света, падающим на фоторецепторную матрицу РетнаБокс, просто руками или листами бумаги/картона. Для перемещения стимулов рекомендуем просто проводить рукой влево и вправо по светодиодной матрице РетнаБокс.



*Рисунок 7. Демонстрация инструмента визуального стимула, расположенного между светодиодной матрицей и модельными фоторецепторами, для выборочного блокирования света и передачи точных визуальных образов на матрицу фоторецепторов РетнаБокса..*

## Урок 1: Центр-Область

*Как ваша зрительная система узнает, на чем в окружающем мире следует сосредоточиться?*

В сетчатке рецептивные поля с центральным и периферическим расположением клеток помогают зрительным нейронам избирательно реагировать на локальный яркостной контраст, то есть на разницу в интенсивности света между соседними участками поля зрения. Зрительные нейроны с центральным и периферическим расположением клеток реагируют, когда в пределах небольшой области видимой ими зрительной сцены одна часть их рецептивного поля яркая, а другая - тёмная (например, тёмный текст на белом фоне). Клетки с центральным и периферическим расположением клеток не любят однородные зрительные сцены (например, чисто белую стену), что означает, что ваша зрительная система оптимизирована для обнаружения визуальных стимулов, отличающихся от однотонного фона.

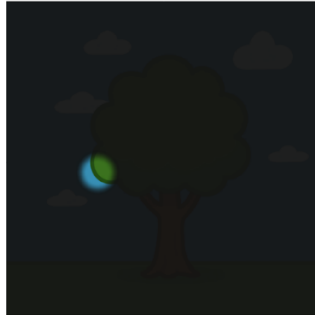
*Почему это полезно?*

### (1) Определение местоположения объекта в мире

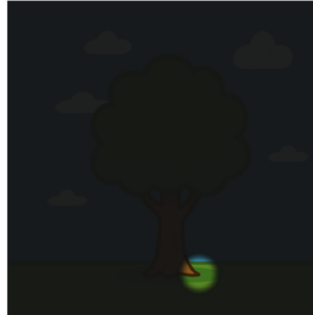
Способ, которым наша зрительная система определяет местоположение объекта, начинается на уровне отдельных нейронов. У каждого зрительного нейрона есть **рецептивное поле**: определённая область сетчатки (и, следовательно, видимого мира), где изменения интенсивности света могут влиять на активность этого нейрона. Рецептивное поле можно представить как прожектор: «прожектор» каждого нейрона позволяет ему видеть только определённую часть мира.



Cell 1's receptive field



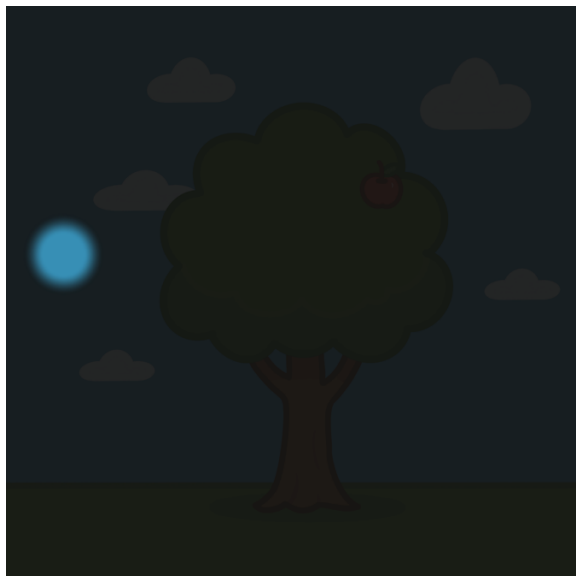
Cell 2's receptive field



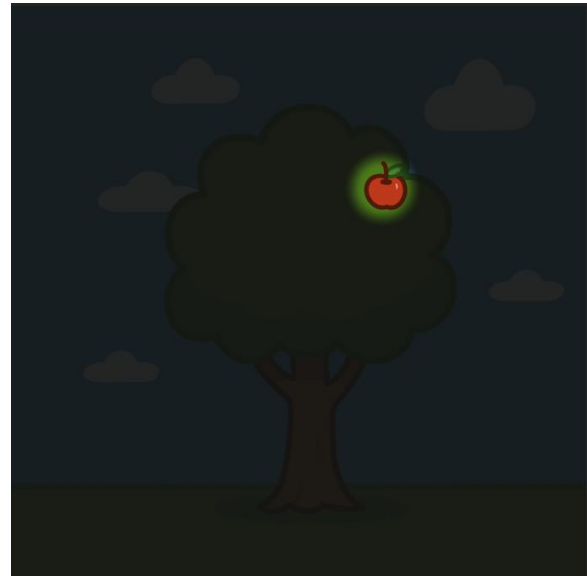
**Рисунок 8.** Разные нейроны имеют разные рецептивные поля.

Когда нейрон активируется, он не просто сигнализирует о том, что видит предпочитаемый им визуальный объект. Это также означает, что этот объект находится в рецептивном поле этой клетки. Поскольку рецептивные поля множества различных нейронов образуют организованное визуальное пространство, совокупность ответов различных нейронов на определённый визуальный объект позволяет мозгу определить, где находится этот объект.

Рецептивное поле клетки 1



Рецептивное поле клетки 2



**Рисунок 9.** Пример: обнаружение красного яблока среди зелёных листьев дерева. Представьте себе два нейрона, оба ищут яблоки в окружающем мире, но рецептивные поля этих двух клеток расположены по-разному. В приведённом выше примере только клетка справа отреагирует на эту сцену.



## (2) Знание того, насколько велик большой

Помимо знания того, где что-то находится, нам также нужно знать, *насколько оно большое*. Для одного фоторецептора это может быть неоднозначным: обнаруживаемый им признак может быть маленьким и ограниченным его рецептивным полем или достаточно большим, чтобы также активировать рецептивные поля соседних фоторецепторов. Зрительная система частично решает эту неоднозначность с помощью центрально-окружных рецептивных полей: когда зрительный стимул идеального размера, чтобы падать прямо на нейрон (область, называемую центром рецептивного поля), клетка максимально реагирует; однако, если зрительный стимул больше и распространяется на область, непосредственно соседствующую с клеткой (область, называемую окружением рецептивного поля), это снижает реакцию нейрона. Это означает, что каждый нейрон лучше всего реагирует на зрительный стимул определенного размера, соответствующего центру его рецептивного поля, и яркостного контраста между центром и окружением. Поскольку разные нейроны могут иметь рецептивные центры и области вокруг них разного размера, разные нейроны могут иметь предпочтения к зрительным стимулам разного размера..

### *Цель урока 1*

Создайте простую схему, имитирующую центрально-окружную ганглиозную клетку сетчатки, чтобы исследовать, как зрительная система обнаруживает фокусные световые пятна. Затем протестируйте схему, активируя различные светодиоды (в «статическом» режиме), чтобы проверить селективность ганглиозной клетки. Наконец, выполните реальную визуальную стимуляцию с помощью инструмента «Визуальный стимул», чтобы оценить надежность вашей центрально-окружной цепи (подробнее см. в разделе «Как протестировать схемы»).

### Задание № 1: создание точечного детектора с приемным полем типа «ВКЛ. центр/ВЫКЛ. окружность»

Нейроны с рецептивными полями типа «**ВКЛ-центр/ВЫКЛ-окружение**» активируются (ВКЛ) светом в самом центре их рецептивного поля, но ингибируются (ВЫКЛ) светом в окружающей области.

Используйте графический интерфейс пользователя для создания схемы (RGC1) с ганглиозной клеткой с включенным центром и выключенным окружением, которая реагирует только тогда, когда центральный модельный фоторецептор матрицы 3 x 3 активируется светом, но не тогда, когда также активируются какие-либо окружающие модельные фоторецепторы и не тогда, когда небольшая точка располагается над любым другим модельным фоторецептором.

### Задание №2: создание второго точечного детектора с другим расположением поля восприятия

Ваша следующая задача — создать ганглиозную клетку (RGC2) с тем же размером (как в задании №1), но рецептивное поле которой находится в **другом месте** на фоторецепторной матрице. Перемещая инструмент визуального стимула с небольшим

пятном, вы теперь сможете активировать каждую RGC, но только по одной за раз, в зависимости от положения стимула.

### Задание №3: создание двух детекторов пятен с настройками на пятна разных размеров.

Ваша следующая задача создать **две разные** ганглиозные клетки (RGC1 и RGC2) с одинаковым расположением рецептивного поля (в центре), но настроенные на точки **разного размера**. Одна ганглиозная клетка должна обнаружить **маленькое** пятно света, а другая — **большее**. Если вы создадите два пятна разного размера с помощью инструмента визуального стимула, то с помощью маленького пятна вы сможете активировать только RGC1, а с помощью большего — только RGC2.

### Задача: Взлом кода с использованием центрально-окружных рецептивных полей

Теперь, когда вы узнали, как заставить ганглиозные клетки избирательно реагировать на точки определённых размеров в определённых местах, мы предлагаем вам применить полученные знания о рецептивных полях «центр-окружность» для расшифровки **скрытого сообщения**.

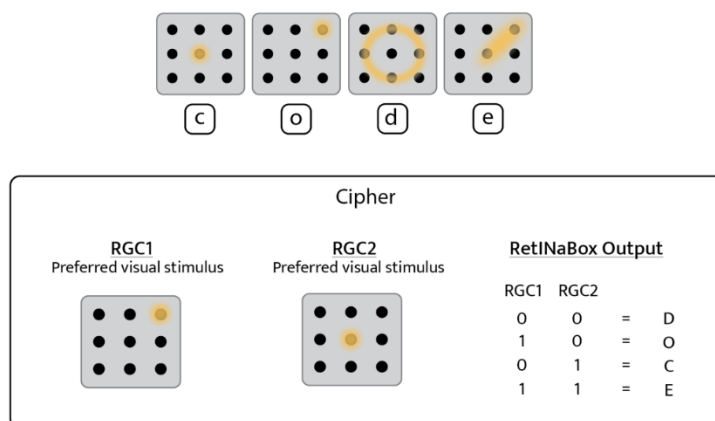
Вам будет предоставлена серия визуальных стимулов, каждый из которых представлен в виде сетки фоторецепторов  $3 \times 3$ . Некоторые фоторецепторы активируются (жёлтые), а другие — нет (чёрные). Каждый стимул соответствует **одной букве** секретного сообщения.

Вам также будет предоставлен **шифр**, который поможет вам расшифровать сообщение. Шифр сообщит вам о визуальных предпочтениях двух ганглиозных клеток РетнаБокс, RGC1 и RGC2. Шифр также даст вам способ расшифровать активность ганглиозных клеток РетнаБокс четырьмя буквами (0 означает, что ганглиозная клетка неактивна; 1 означает, что ганглиозная клетка активна).

#### Ваша задача:

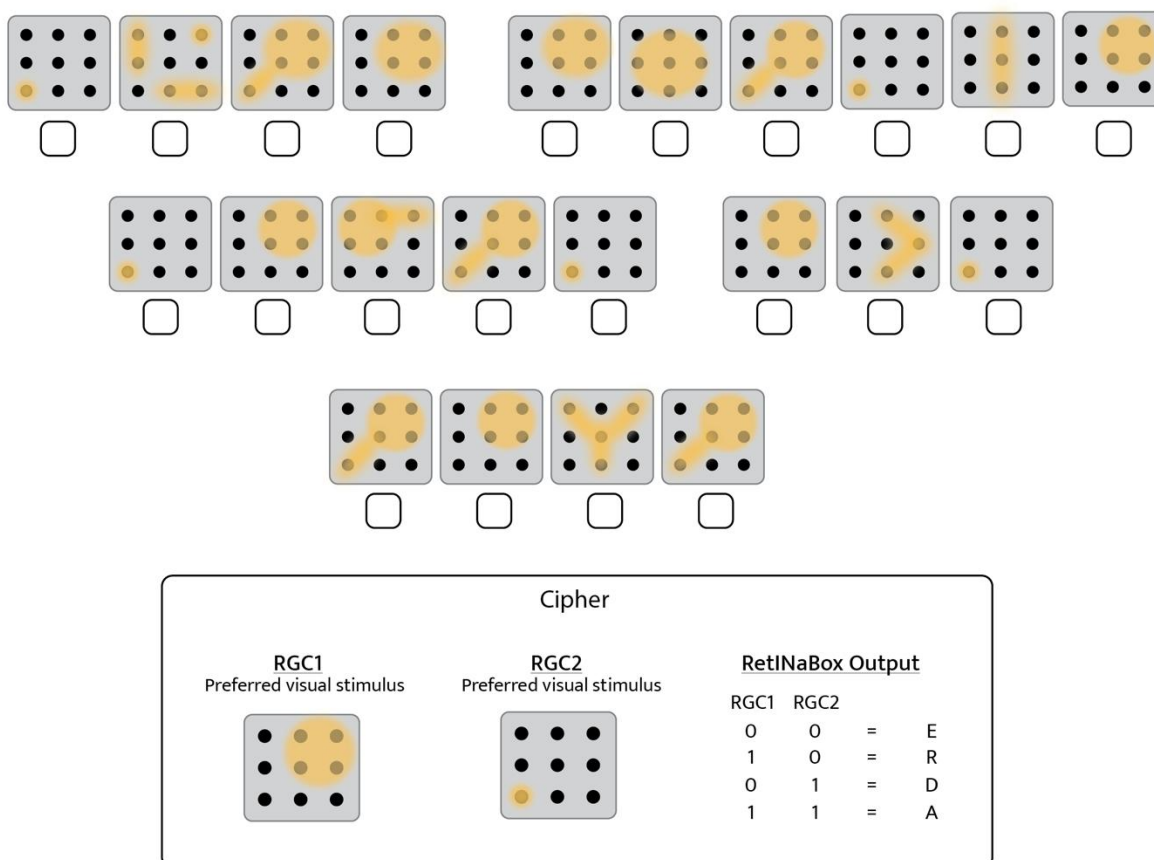
1. На вкладке «Меню» в графическом интерфейсе перейдите к разделу «Взломщик кода» (Уроки > Урок 1 > Взломщик кода) (Lessons > Lesson 1 > Code Breaker).
2. В диспетчере подключений подключите РетнаБокс так, чтобы две ганглиозные клетки реагировали на указанные визуальные стимулы. Важно: *убедитесь, что обе ганглиозные клетки могут одновременно активироваться одним визуальным стимулом!*
3. Используйте инструмент «Визуальный стимул» для предъявления визуальных стимулов из кода РетнаБокс и отслеживайте реакцию ганглиозных клеток.
4. Для каждого визуального стимула используйте шифр для преобразования выходных данных RGC1/RGC2 в букву.
5. Повторите для каждого стимула и соберите полное секретное сообщение.

См. пример ниже (**Рисунок 10**):



**Рисунок 10** – Пример игры по взлому кода.

*Задача №1 по взлому кода*



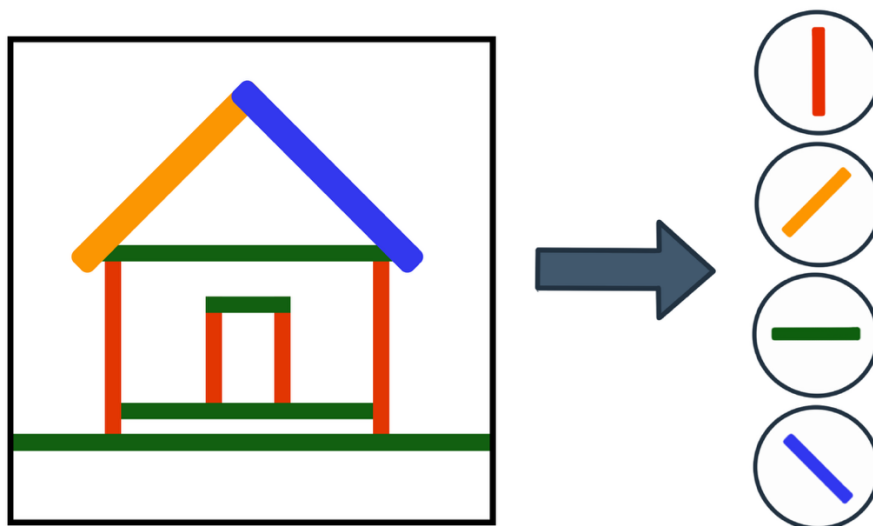
**Рисунок 11** – Задание 1 для игры по взлому кодов.

*\*Решение этой и дополнительных задач по взлому кодов см. в Приложении к плану урока..*

## Урок 2: Селективность ориентации

*Как мы распознаем объекты в мире?*

Как мы видели в Уроке 1, наша зрительная система особенно чувствительна к локальному яркостному контрасту. Это означает, что она отлично распознаёт линии и края в видимом мире. Однако вместо того, чтобы просто обрабатывать визуальный мир с помощью набора пиксельных детекторов с рецептивными полями «центр-окружение», наша зрительная система также использует нейроны, которые объединяют рецептивные поля от нескольких нейронов с пространственно смежными центрами рецептивных полей. Это может генерировать зрительные нейроны, которые, вместо того чтобы быть просто избирательными к яркостному контрасту в одной небольшой части зрительной сцены, избирательны к протяжённым краям или линиям определённой ориентации в пределах своих рецептивных полей (см. **Рис. 12**) — то, что называется ориентационной селективностью. В этом уроке вы изучите, как ганглиозные клетки сетчатки могут стать избирательными к линиям определённой ориентации, и как можно использовать эти детекторы признаков для построения детектора формы.



**Рисунок 12.** Пример: дом может показаться единым, знакомым объектом, но ваш мозг анализирует его, разбивая на множество линий и ребер под разными углами.

### Цель

Создайте и протестируйте две ганглиозные клетки сетчатки для моделирования ориентационно-избирательных ганглиозных клеток сетчатки и используйте совместную настройку этих двух клеток для создания детектора формы. Сначала протестируйте свои схемы, активируя различные комбинации светодиодов (в «статическом» режиме графического интерфейса). Затем выполните реальную визуальную стимуляцию с помощью инструмента «Визуальный стимул», создав фигуру, представляющую собой комбинацию двух ориентированных линий, стимулирующих RGC1 и RGC2.

**Задание №1:** создание ганглиозной клетки, которая обнаруживает вертикальную линию.

Настройте схему RGC1 так, чтобы она реагировала только на тонкую вертикальную линию, расположенную в определённой части фоторецепторной матрицы. Ганглиозная клетка не должна реагировать на пятно света, а также на линию той же длины, но другой ориентации/толщины или расположенную в другой части фоторецепторной матрицы.

**Задание №2:** создание второй ганглиозной клетки, которая обнаруживает диагональную линию.

Создайте цепь для RGC2, реагирующую на линию той же толщины, что и в задании №1, но только если линия расположена по диагонали. Эта вторая ганглиозная клетка не должна реагировать на линию другой ориентации или толщины, а также на линию той же ориентации, расположенную в другой части фоторецепторной матрицы.

**Задание №3:** создайте две ганглиозные клетки, которые обнаруживают вертикальные линии разной толщины.

Настройте RGC1 и RGC2 таким образом, чтобы обе клетки реагировали на вертикальные линии, но одна из них избирательно реагировала на тонкую линию, а другая — на толстую линию.

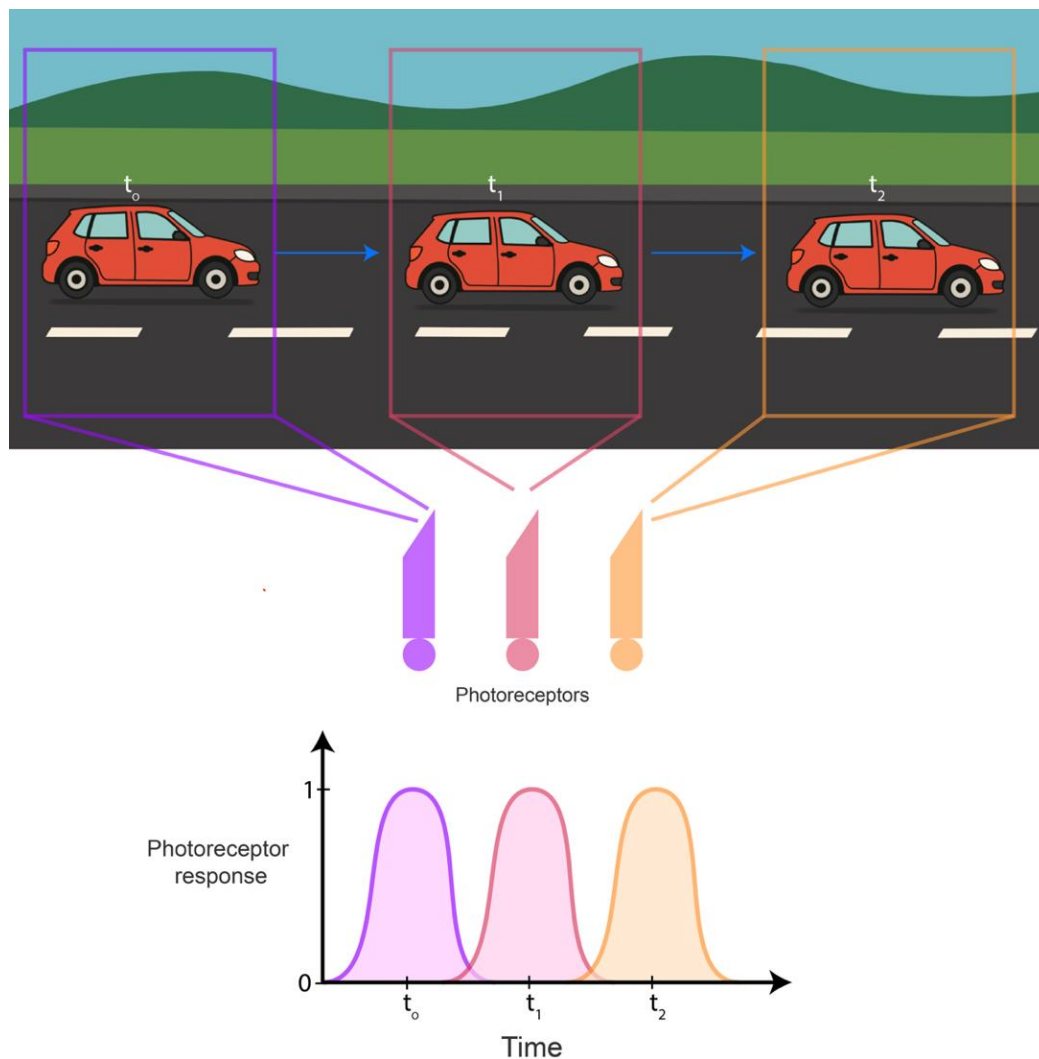
**Задача:** построить детектор формы с рецептивными полями, селективными по ориентации.

Ваша задача — объединить выходные сигналы двух ганглиозных клеток, селективных по ориентации, для обнаружения определенной формы: формы, возникающей в результате комбинации линий, активирующих ганглиозную клетку 1 и ганглиозную клетку 2. Например, вы можете построить детектор для символов X, T, L или +.

Чтобы сделать эксперимент ещё более захватывающим, вам сначала придётся собрать зуммер, который будет издавать звук только при наличии целевой фигуры. Это значит, что зуммер будет издавать звук только при активации обеих ганглиозных клеток. Чтобы собрать схему зуммера, обратитесь к руководству пользователя РетнаБокс на страницах 14–15. После сборки схемы зуммера подключите выходы двух ганглиозных клеток (цифровые контакты 3,3 В на задней панели РетнаБокс) и один из выводов заземления к схеме зуммера (см. **Рис. 13**). Если вы правильно подключили схему зуммера, он будет издавать звук только при предъявлении целевой фигуры. Это похоже на то, как проводят свои эксперименты многие нейробиологи, например, Дэвид Хьюбел и Торстен Визель, открывшие избирательную настройку ориентации в зрительной коре кошек, часто подключали электрофизиологический сигнал записи к динамику и прослушивали реакцию нейронов на предъявление зрительных стимулов.



Для формирования предпочтений к стимулам, движущимся в определённых направлениях, наша зрительная система использует тот факт, что движущийся стимул активирует пространственно смещенные фоторецепторы, которые связаны с одним нижестоящим зрительным нейроном во временной последовательности вдоль траектории движения, то есть фоторецепторы на переднем крае движущегося стимула активируются первыми, а фоторецепторы на заднем крае движущегося стимула – последними. Это означает, что для ганглиозной клетки, реагирующей на движущийся стимул, существует временная задержка между получением ею сигналов от фоторецепторов на переднем и заднем краях её рецептивного поля (см. **Рис. 15**).



**Рисунок 15.** При движении объекта по полю зрения последовательно активируются различные фоторецепторы с пространственно смещенными рецептивными полями, в том порядке, в котором они «видят» объект. Первыми реагируют фоторецепторы на переднем фронте движения (слева), затем на среднем, и, наконец, на заднем фронте (справа). Эта последовательная активация создает задержанные по времени сигналы, которые зрительная система может использовать для определения направления движения.



**Цель:** создать схему, имитирующую ганглиозную клетку сетчатки, селективность по направлению, чтобы понять, как зрительная система распознаёт движение. Сначала протестируйте схему, активируя различные комбинации светодиодов (используйте режим «Движение» в графическом интерфейсе, выбрав скорость и направление движения). Затем проведите рукой по полю зрения РетнаБокса.

Ключ к избирательности направления лежит в асимметричных анатомических связях, которые по-разному обрабатывают зрительные стимулы, движущиеся в одном направлении по сравнению с другим. В РетнаБокс эти асимметричные различия могут быть реализованы с помощью временных задержек, которые асимметрично добавляются в диспетчере связей вдоль оси справа-слева массива фоторецепторов 3 x 3. Эти задержки гарантируют, что входные сигналы в ГКС суммируются (и ганглиозная клетка активируется) только тогда, когда стимул движется в предпочтительном для ГКС направлении.

#### *Примечание*

- В этом разделе, проводя рукой взад-вперёд между светодиодами и фоторецепторами, проверьте работоспособность вашей схемы. \*Мы не рекомендуем использовать инструмент визуального стимула для тестирования движущихся стимулов из-за краевых артефактов, которые могут вызывать ложные реакции при входе и выходе внешних границ инструмента визуального стимула из поля зрения РетнаБокс.*
- В зависимости от временных задержек, назначенных для каждого фоторецептора, вам может потребоваться протестировать разные скорости стимула (т. е. двигать рукой с разной скоростью), чтобы наблюдать за активацией ганглиозных клеток в определённом направлении движения.*

#### **Задание № 1: создание ганглиозной клетки, селективной в направлении движения влево ←**

Создайте схему, в которой RGC1 реагирует на движение вертикальной линии влево. Проверьте схему, перемещая руку по антенной решетке влево и вправо.

#### **Задание №2: создание ганглиозной клетки, селективной в направлении движения вправо →**

Затем создайте вторую схему, где RGC2 реагирует на движение вертикальной линии вправо. Проверьте схему, перемещая руку по антенне как вправо, так и влево.

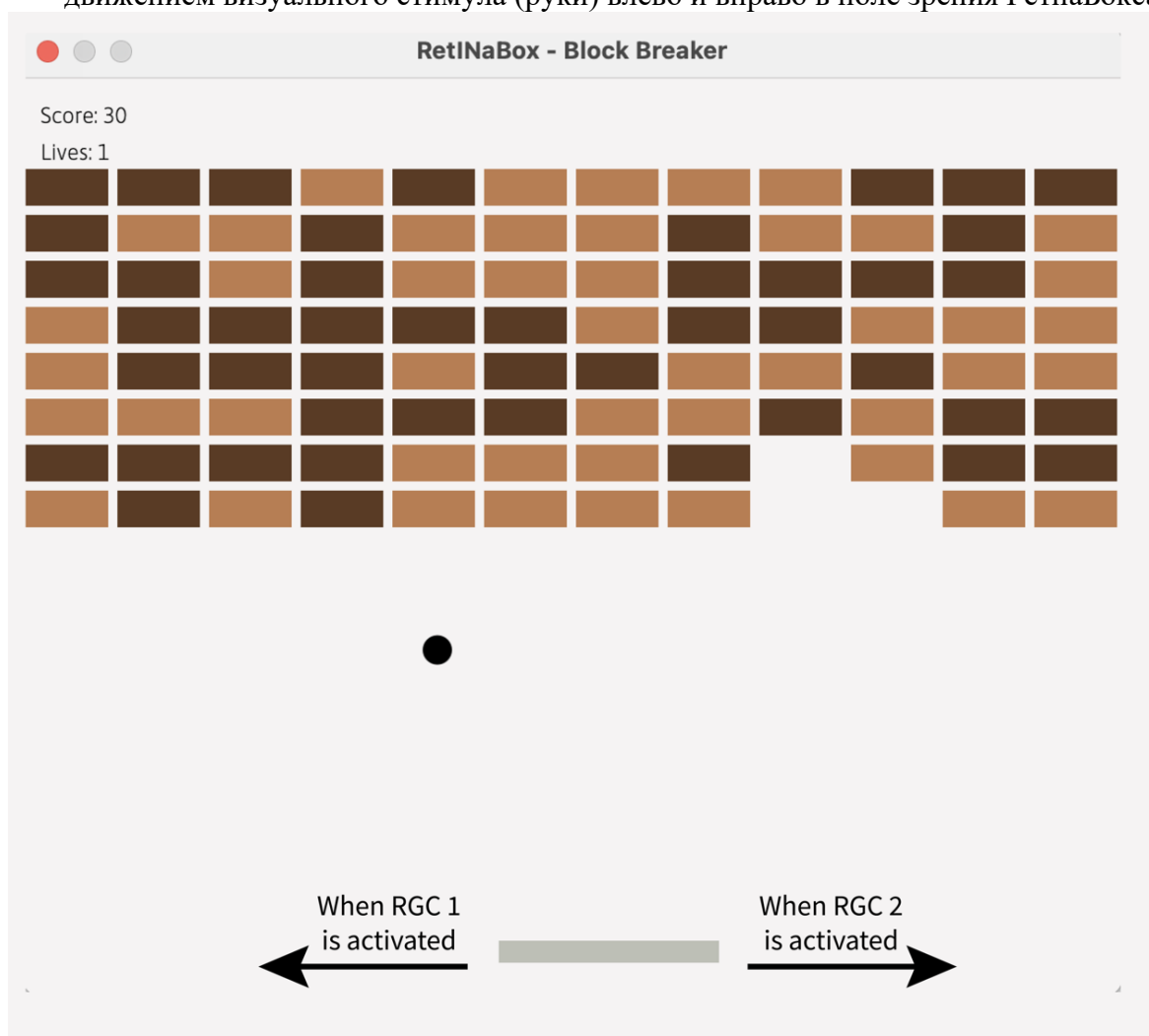
#### **Задание №3: построение модели медленного и быстрого движения, избирательного по направлению ганглиозной клетки. →**

Создайте схему, где RGC1 реагирует на медленное движение вертикальной линии вправо, а RGC2 — на движение вертикальной линии в том же направлении, но быстрее. Проверьте схему, перемещая руку вправо по массиву с разной скоростью. \*Совет: чтобы создать RGC с настройками для разных скоростей, подумайте о том, к чему приведет изменение задержки.



**Задача: Разрушение блоков с помощью схем, избирательных по направлению**  
 Block Breaker — аркадная игра, в которой игроки управляют ракеткой, двигая её влево и вправо, чтобы отбивать мяч и разбивать несколько рядов блоков. Цель — убрать все блоки, не давая мячу упасть. Ваша задача — настроить две ганглиозные клетки с противоположной направленной селективностью (то есть создать две устойчивые ганглиозные клетки с избирательностью по направлению) и использовать их в качестве элементов управления игрой в графическом интерфейсе РетнаБокс.

- **Шаг 1:** В диспетчере подключений настройте обе цепи ганглиозных клеток так, чтобы RGC1 был селективен *только* для движения влево, а RGC2 — *только* для движения вправо.
- **Шаг 2:** Загрузите игру. В меню графического интерфейса выберите «Разрушитель блоков» (Уроки > Урок 3 > Разрушитель блоков), (Lessons > Lesson 3 > Block Breaker).
- **Шаг 3:** Теперь вы готовы к игре (см. **Рис. 16**)! Разрушитель блоков управляется движением визуального стимула (руки) влево и вправо в поле зрения РетнаБокса.



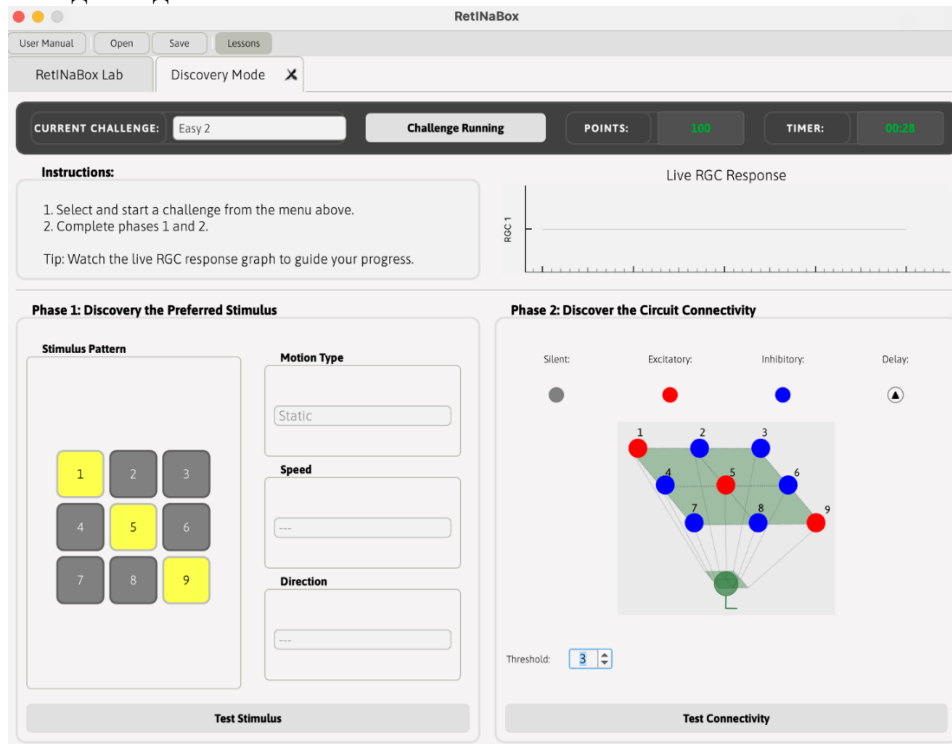
**Рисунок 16.** Блок-брейкер в графическом интерфейсе РетнаБокс. Активация GC1 должна перемещать ракетку влево, а активация GC2 — вправо.

## Урок 4: Режим открытия

*Добро пожаловать в режим «Открытие» (Discovery Mode)! Вы добрались до этого места, а это значит, что вы готовы к настоящим экспериментам! В этом разделе вы познакомитесь с работой визуального нейробиолога!*

До сих пор вы исследовали рецептивные поля, реагирующие на центр и периферию, ориентационно-избирательные и направленно-избирательные — все эти нейронные сети уже хорошо изучены учёными, изучающими зрение. Но поиски понимания того, что нейроны «любят видеть», ещё далеки от завершения. Даже сегодня нейробиологи продолжают работать над тем, какие стимулы лучше всего активируют различные зрительные нейроны в разных отделах мозга. *Теперь ваша очередь выяснить, какие зрительные стимулы лучше всего активируют некоторые недавно открытые зрительные нейроны, а затем выяснить, какие свойства связей нейронных сетей лежат в основе такой избирательности к признакам.*

В режиме «Открытие» (см. **Рис. 17**) есть три уровня сложности (лёгкий, средний, сложный), каждый со своим набором заданий. Для выполнения каждого задания вам необходимо обнаружить (т.е. правильно ответить) целевой визуальный стимул загадочной ганглиозной клетки (зрительную реакцию, которая запускает эту ганглиозную клетку) и цепь связей (настройки в диспетчере связей), лежащую в основе этой избирательной реакции. За каждое задание вы получаете 100 очков, но неправильные ответы стоят вам 5 очков. Ваша цель — выполнить каждое задание с максимально возможным количеством очков.



**Рисунок 17.** Графический интерфейс режима «Открытие». Каждое задание состоит из двух этапов: (1) обнаружение предпочтительного стимула (слева) и (2) обнаружение связей в цепи (справа).

Каждое задание в режиме «Открытие» состоит из двух этапов:

- **Откройте для себя предпочтительный стимул**

На вкладке «Меню» перейдите в «Режим исследования» (Уроки > Урок 4 > Режим исследования) - (Lessons > Lesson 4 > Discovery Mode). Выбрав загадочную цепь из раскрывающегося меню в графическом интерфейсе, ваша первая задача — выяснить, на что реагирует ганглиозная клетка. Предпочитает ли она определённую форму? Определённое направление движения? Используйте инструмент «Визуальный стимул» для тестирования различных статических стимулов. Используйте руку для тестирования стимулов, избирательных по направлению. Загадочные цепи в РетнаБокс очень избирательны к определённым визуальным стимулам, поэтому убедитесь в этом, прежде чем отправлять свой ответ. Некоторые загадочные ганглиозные клетки предпочитают статические стимулы, некоторые — движущиеся!

- **Откройте для себя цепную связь**

После того, как вы определили, на что настроена ганглиозная клетка, ваша следующая задача — понять, как она обеспечивает эту избирательность. Как фоторецепторы связаны с ганглиозной клеткой? Какие задержки, полярности или пространственное расположение фоторецепторов обуславливают избирательный ответ ганглиозной клетки? *Примените правильные настройки в диспетчере подключений, чтобы соответствовать обнаруженной вами избирательности.*

Удачи! *От вашего успеха зависит получение гранта для вашей лаборатории!*

# Приложение

## Решения для урока 1: Центр-Объем

Задание № 1: создание точечного детектора с приемным полем типа «ВКЛ. центр/ВЫКЛ. окруж.»

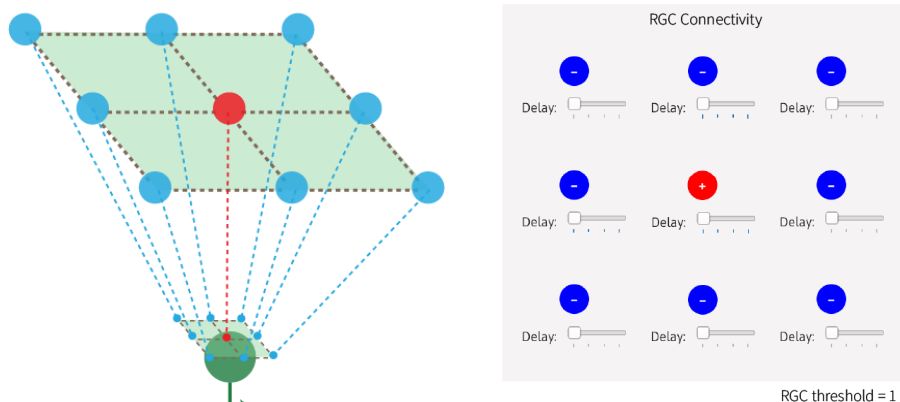
Центральный фоторецептор (красный) – возбуждающий (+): он активирует ганглиозную клетку при обнаружении света.

- Соедините центральный фоторецептор с ганглиозной клеткой с **положительной полярностью** (возбуждающий).

Окружающие фоторецепторы (синие) – тормозящие (-): они подавляют ганглиозную клетку при активации.

- Соедините каждый окружающий фоторецептор с той же ганглиозной клеткой с отрицательной полярностью (тормозящий).

Установите порог ганглиозной клетки равным 1. Ганглиозная клетка будет активироваться **только** при попадании света на центральный фоторецептор. Однако, если любой из окружающих фоторецепторов также активируется, их торможение нейтрализует возбуждение, и ганглиозная клетка не активируется.



Урок 1, Задание 1: Входы и подключение к RGC1 (центрально-окружающая клетка с центральным рецептивным полем)

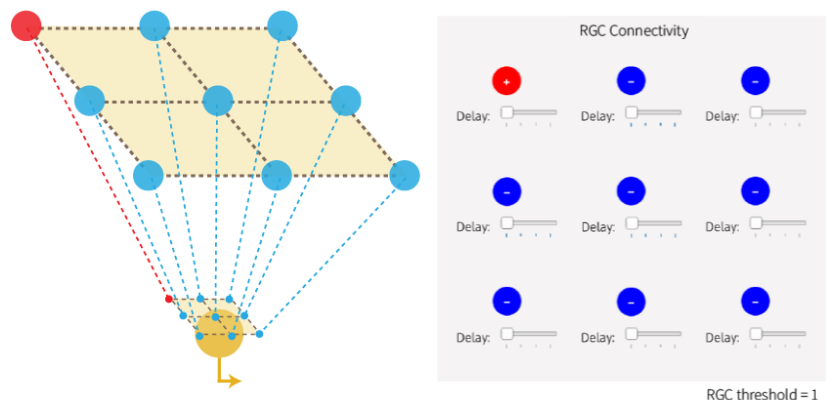
Задание №2: создание второго точечного детектора с другим расположением поля восприятия

Обратите внимание, что ниже приведены лишь два возможных примера правильных решений. Однако вы могли выбрать любое рецептивное поле в массиве 3 x 3 для любой ганглиозной клетки.

Пример решения 1

**Входы RGC2:** угловой фоторецептор (красный) – возбуждающий (+): он активирует ганглиозную клетку при обнаружении света. Все остальные периферийные фоторецепторы

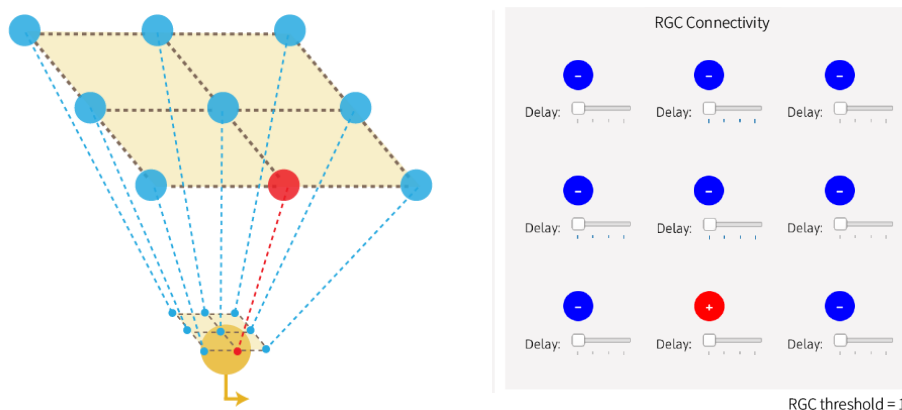
(синие) – тормозящие (-): они подавляют ганглиозную клетку при активации. Установите порог ганглиозной клетки на 1.



Урок 1, Задание 2 – Пример решения: Входы и подключение к RGC2 (центрально-окружающая клетка с рецептивным полем в верхнем левом углу)

Пример решения 2

**Входы RGC2:** краевой фоторецептор (красный) — возбуждающий (+): он активирует ганглиозную клетку при обнаружении света. Все остальные периферийные фоторецепторы (синие) — тормозящие (-): они подавляют ганглиозную клетку при активации. Установите порог ганглиозной клетки на 1.

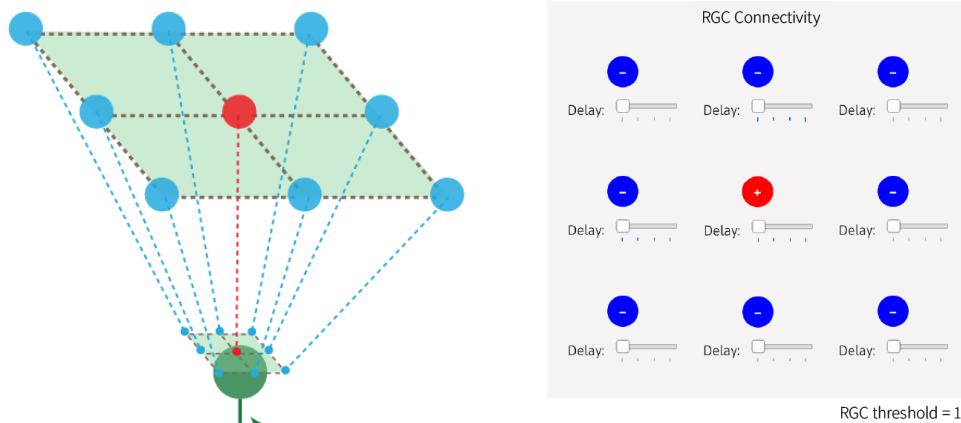


Урок 1, Задание 2 – Альтернативный пример решения: Входы и подключение к RGC2, чье рецептивное поле находится на краю массива (центрально-окружающая клетка с рецептивным полем на нижнем краю)

**Задание №3:** создание двух детекторов пятен с настройками на пятна разных размеров.

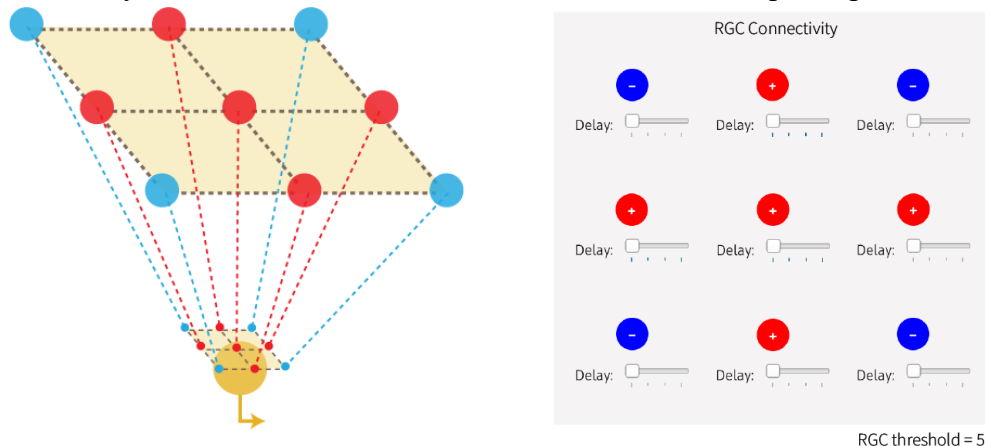
**Входы RGC1 (датчика малых точек):** как описано в решениях к заданию №1: Центральный фоторецептор (красный) является **возбуждающим** (положительная полярность, +), в то время как все остальные окружающие фоторецепторы (синие) являются тормозящими (отрицательная полярность, -). Установите порог ганглиозной клетки на 1.

Эта ганглиозная клетка будет активироваться только в ответ на небольшое пятно света, освещающее центральный фоторецептор.



Урок 1, Задание 3 – Схема RGC1: Входы и схема подключения к RGC1 (маленькая центрально-окружающая клетка с центральным рецептивным полем)

**Входы в RGC2 (детектор большого пятна):** центральный фоторецептор (красный) является возбуждающим (положительная полярность, +) и активирует ганглиозную клетку при обнаружении света. Однако ближайшие к нему окружающие фоторецепторы (непосредственно сверху, снизу и по бокам) также являются возбуждающими (+). Угловые фоторецепторы (синие) являются тормозящими (отрицательная полярность, -): они подавляют ганглиозную клетку, если стимул становится слишком большим. Установите порог ганглиозной клетки на 5. Эта ганглиозная клетка будет срабатывать в ответ на большее пятно света, освещающее центральный фоторецептор и его боковые окружающие фоторецепторы. Однако, если пятно становится слишком большим, и любой из угловых окружающих фоторецепторов также загорается, это добавленное торможение будет вычитаться из возбуждения, и ганглиозная клетка не достигнет порога срабатывания.

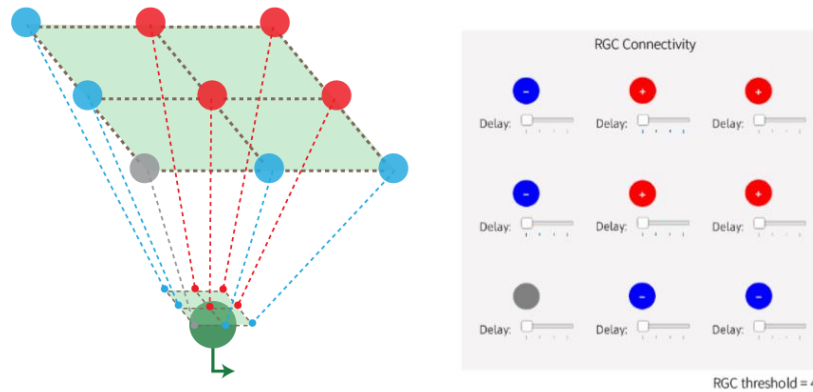


Урок 1, Задание 3 – Проводка RGC2: Входы и проводка к RGC2 (большая центральная клетка окружающего звучания)

## Задача: Взлом кода с помощью точечных детекторов

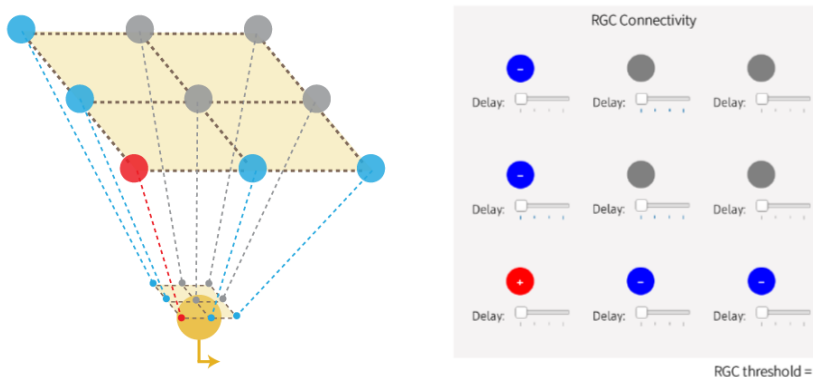
### Задача №1

**Входы для RGC1:** эта центрально-периферическая клетка реагирует только при активации четырёх фоторецепторов в правом верхнем углу. Эти четыре фоторецептора должны иметь положительную полярность (красный, возбуждающий, +). Все остальные периферийные фоторецепторы имеют отрицательную полярность (синий, тормозящий, -). Нижний левый фоторецептор остаётся неподключённым (серый), чтобы RGC1 и RGC2 могли активироваться одновременно. Порог ганглиозной клетки установлен на 4.



*Урок 1, Задача 1: Входы и подключение к RGC1 (большой точечный детектор с верхним правым положением поля восприятия)*

**Входы для RGC2:** эта центрально-окружная клетка реагирует только при активации нижнего левого фоторецептора. Этот фоторецептор должен иметь положительную полярность (красный, возбуждающий, +). Все остальные окружные фоторецепторы имеют отрицательную полярность (синий, тормозящий, -), за исключением четырёх верхних фоторецепторов, соответствующих центру рецептивного поля RGC1 (см. выше), которые должны быть не подключены (серый). Это обеспечивает возможность совместной активации RGC1 и RGC2. Порог ганглиозных клеток установлен на 1.

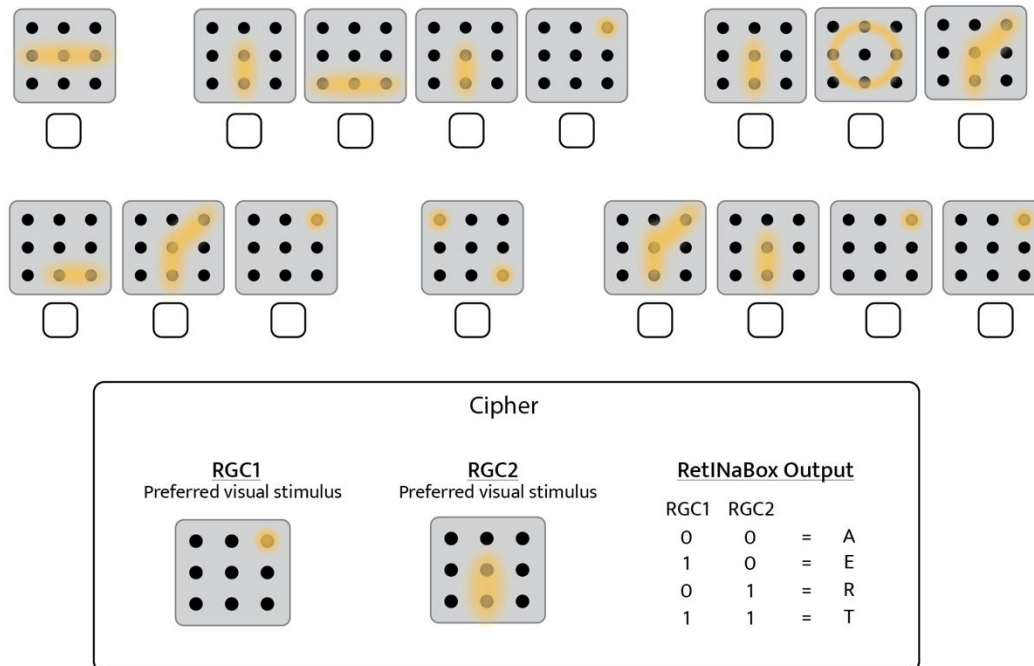


*Урок 1, Задача 1: Входы и подключение к RGC2 (небольшой точечный детектор с нижним левым полем восприятия)*

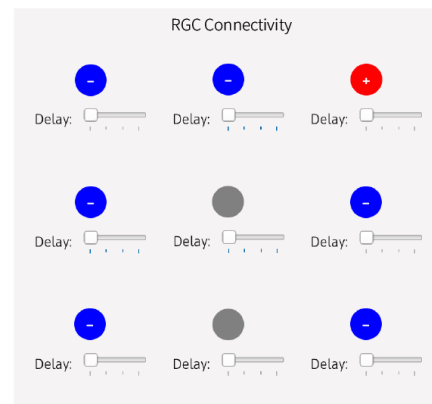
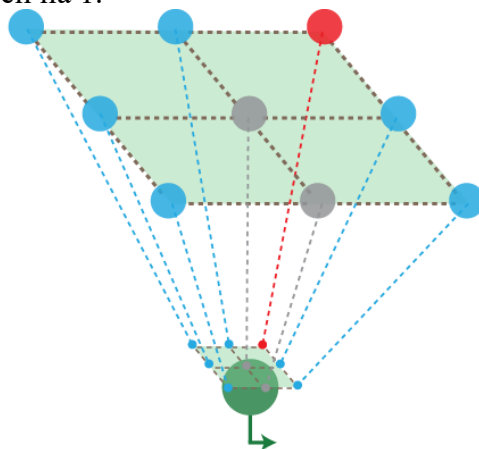
**Секретное сообщение №1: Дорогой читатель, ужасная красная зона. - Dear reader, dread red area.**

## Дополнительные проблемы

### Задача №2



**Входы для RGC1:** эта центрально-периферическая клетка реагирует только при активации фоторецептора в правом верхнем углу. Этот фоторецептор должен иметь положительную полярность (красный, возбуждающий, +). Все остальные периферийные фоторецепторы имеют отрицательную полярность (синий, тормозящий, -), за исключением центрального и нижнего фоторецепторов в средней колонке, которые остаются неактивными (серыми), что позволяет RGC1 и RGC2 коактивироваться. Порог чувствительности ганглиозных клеток установлен на 1.

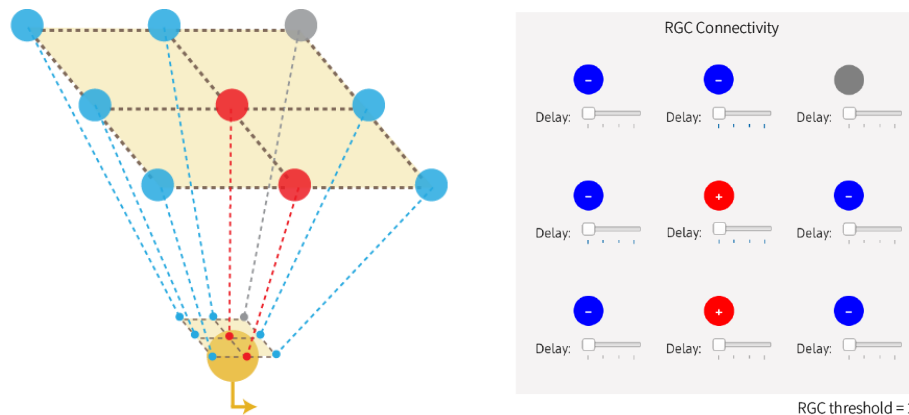


RGC threshold = 1

Урок 1, Задача 2: Входы и подключение к RGC1 (точечный детектор с верхним правым полем восприятия)



**Входы для RGC2:** эта клетка селективна к короткому вертикальному отрезку в центре матрицы. Она реагирует только при активации двух фоторецепторов в нижнем среднем столбце. Эти два фоторецептора должны иметь положительную полярность (красный, возбуждающий, +). Все остальные окружающие фоторецепторы имеют отрицательную полярность (синий, тормозящий, -), за исключением фоторецептора, связанного с центром RGC1, который должен быть молчалив. Порог ганглиозной клетки установлен на 2.



Урок 1, Задача 2: Входы и подключение к RGC2 (детектор вертикальных отрезков линии)

Секретное сообщение №2: Редкая крыса съела дерево. - A rare rat ate a tree.

### Challenge #3

☐

☐

☐

☐

☐

☐

☐

☐

☐

☐

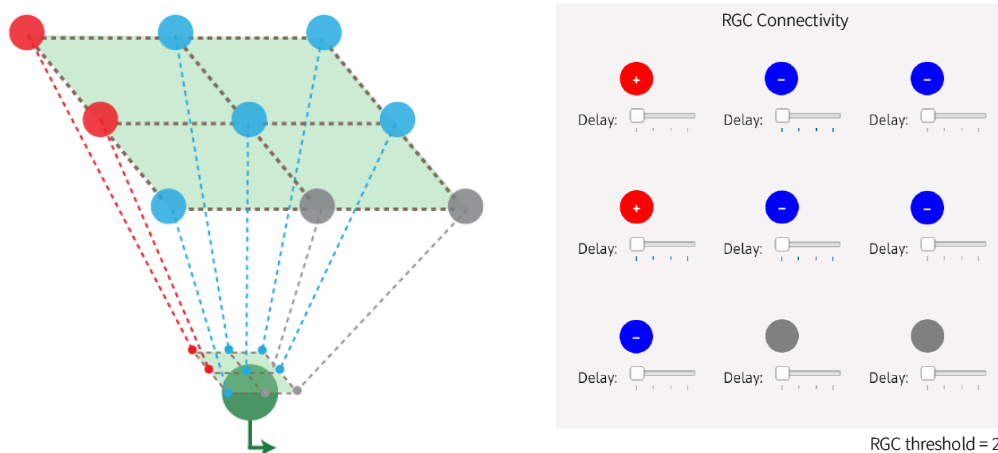
☐

☐

**Cipher**

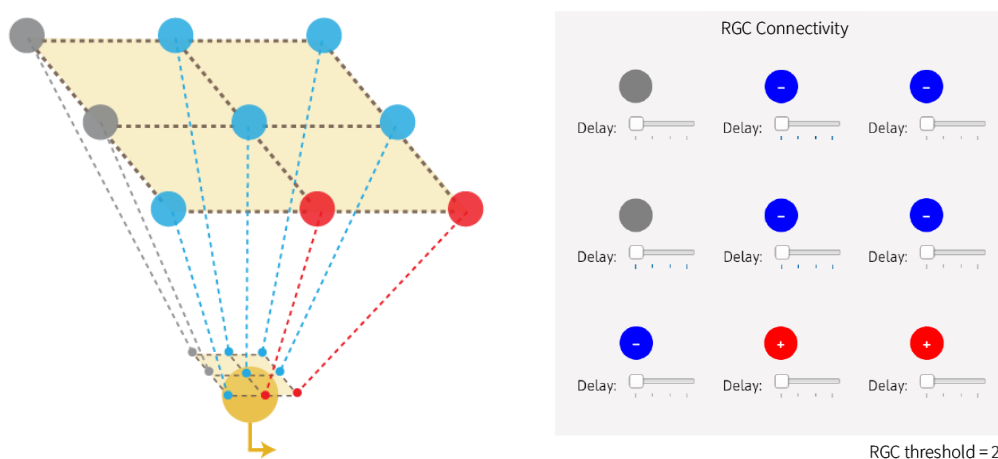
RGC1 Preferred visual stimulus	RGC2 Preferred visual stimulus	RetINaBox Output
		RGC1 RGC2
		0 0 = A
		1 0 = I
		0 1 = D
		1 1 = M

**Входы для RGC1:** эта клетка селективна к короткому вертикальному отрезку в левом верхнем углу матрицы. Она реагирует только при активации двух фоторецепторов в левом верхнем столбце. Эти два фоторецептора должны иметь положительную полярность (красный, возбуждающий, +). Все остальные боковые фоторецепторы имеют отрицательную полярность (синий, тормозящий, -), за исключением центрального и правого фоторецепторов в нижнем ряду, которые остаются неактивными (серыми), что позволяет RGC1 и RGC2 коактивироваться. Порог ганглиозной клетки установлен на 2.



*Урок 1, Задача 3: Входы и подключение к RGC1 (детектор вертикальных отрезков линии)*

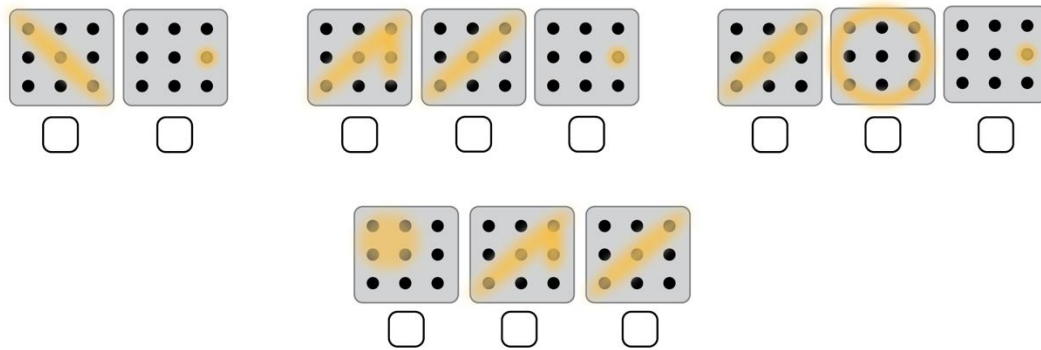
**Входы для RGC2:** эта клетка селективна к короткому горизонтальному отрезку линии в правом нижнем углу матрицы. Она реагирует только при активации двух фоторецепторов в правом нижнем ряду. Эти два фоторецептора должны иметь положительную полярность (красный, возбуждающий, +). Все остальные боковые фоторецепторы имеют отрицательную полярность (синий, тормозящий, -), за исключением центрального и верхнего фоторецепторов в левом столбце, которые остаются неактивными (серыми), что позволяет RGC1 и RGC2 коактивироваться. Порог ганглиозных клеток установлен на 2.



*Урок 1, Задача 3: Входы и подключение к RGC2 (детектору горизонтальной линии)*


Секретное сообщение №3: **Мамма миа! Я злюсь. - Mamma Mia! I am mad.**

#### Задача №4

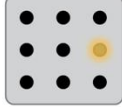


Cipher

**RGC1**  
Preferred visual stimulus

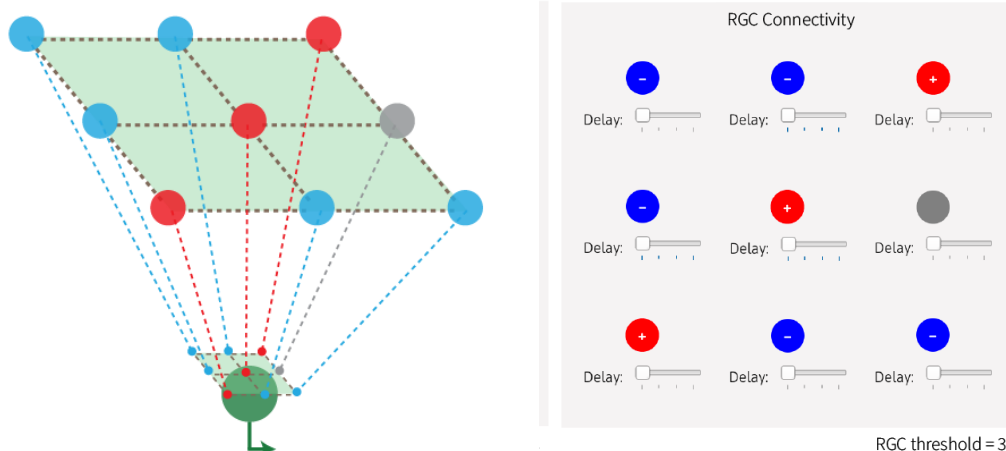


**RGC2**  
Preferred visual stimulus



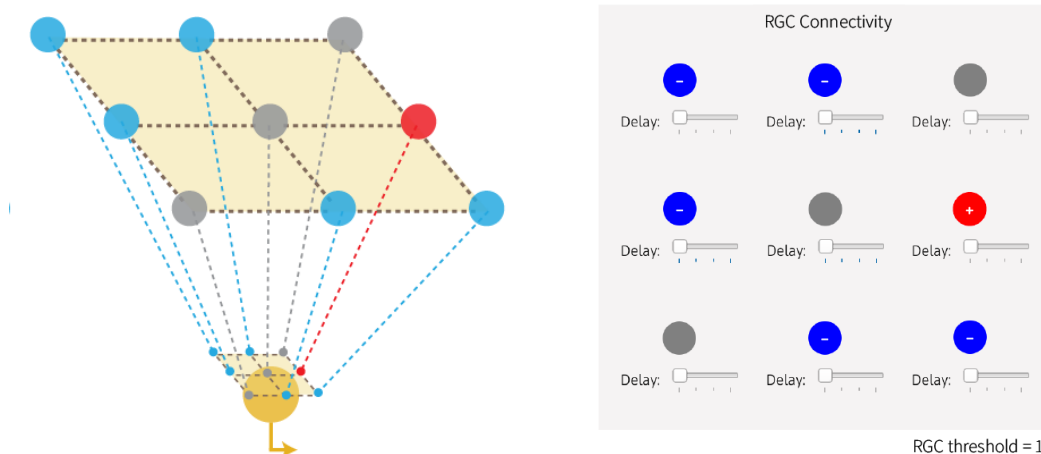
RetINaBox Output			
RGC1	RGC2	=	
0	0	=	H
1	0	=	T
0	1	=	E
1	1	=	A

**Входы для RGC1:** Эта ориентационно-селективная клетка (описанная в Уроке 2) селективна к диагональной линии, расположенной под углом 45°. Она реагирует только при активации трёх фоторецепторов, расположенных вдоль диагонали под углом 45°. Эти фоторецепторы должны иметь положительную полярность (красный, возбуждающий, +). Все остальные окружающие фоторецепторы имеют отрицательную полярность (синий, тормозящий, -), за исключением фоторецептора, соединённого с центром RGC2, который должен быть молчалив. Порог чувствительности ганглиозной клетки установлен на 3.



Урок 1, Задача 4: Входы и подключение к RGC1 (клетка избирательной ориентации).

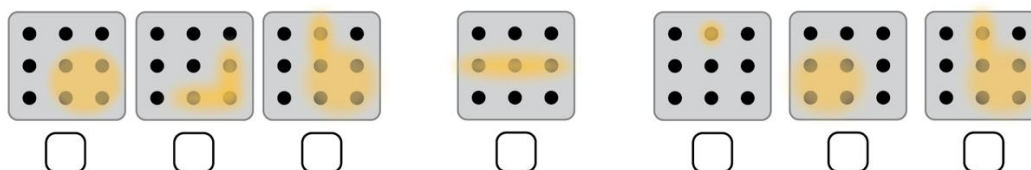
**Входы для RGC2:** эта центрально-периферическая клетка реагирует только при активации правого фоторецептора в среднем ряду. Этот фоторецептор должен иметь положительную полярность (красный, возбуждающий, +). Все остальные периферийные фоторецепторы имеют отрицательную полярность (синий, тормозящий, -), за исключением фоторецепторов вдоль центральной диагональной оси (45°), которые остаются неактивными (серый), что позволяет RGC1 и RGC2 коактивироваться. Порог чувствительности ганглиозных клеток установлен на 1.



Урок 1, Задача 4: Входы и подключение к RGC2 (точечный детектор с правосторонним рецептивным полем).

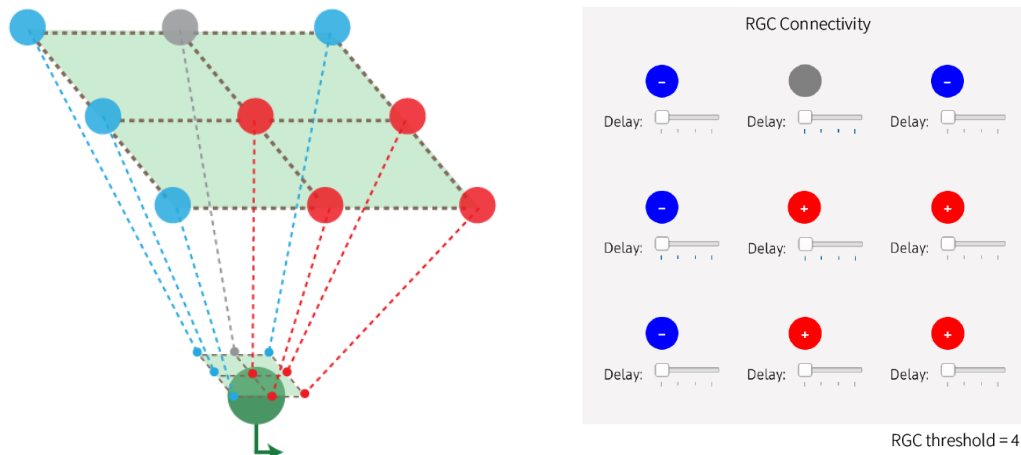
Секретное сообщение №4: Он съел шляпу. - He ate the hat.

Задача №5



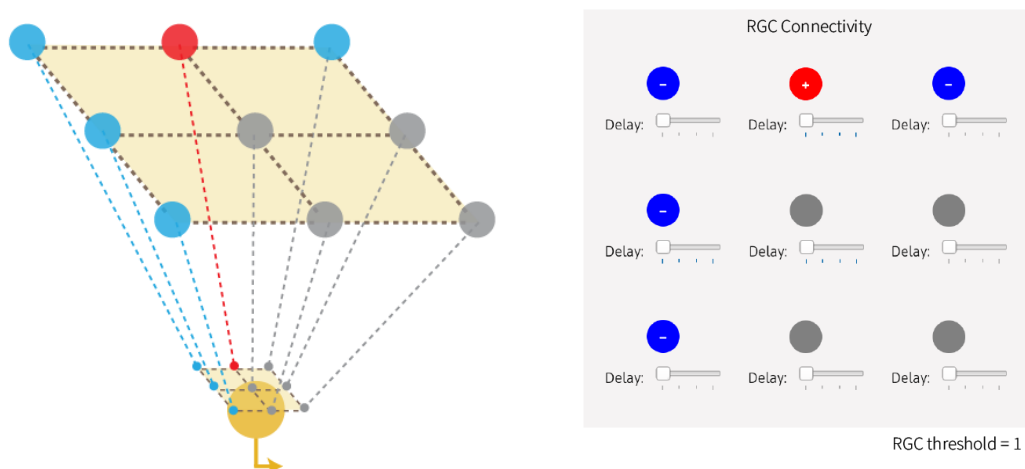
Cipher				
RGC1 Preferred visual stimulus		RGC2 Preferred visual stimulus		RetINaBox Output
0	0	=	A	
1	0	=	B	
0	1	=	C	
1	1	=	KE	

**Входы для RGC1:** эта центрально-окулярная клетка реагирует только при активации четырёх фоторецепторов в правом нижнем углу. Эти четыре фоторецептора должны иметь положительную полярность (красный, возбуждающий, +). Все остальные окружающие фоторецепторы имеют отрицательную полярность (синий, тормозящий, -), за исключением фоторецептора, соединённого с центром RGC2, который должен быть молчалив. Порог ганглиозной клетки установлен на 4.



*Урок 1, Задача 5: Входы и подключение к RGC1 (большой точечный детектор с нижним правым полем восприятия)*

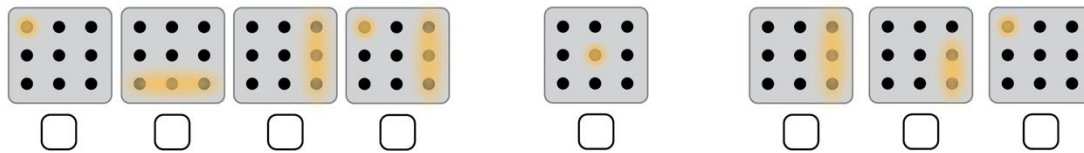
**Входы для RGC2:** эта центрально-окулярная клетка реагирует только при активации среднего фоторецептора в верхнем ряду. Этот фоторецептор должен иметь положительную полярность (красный, возбуждающий, +). Все остальные окружающие фоторецепторы имеют отрицательную полярность (синий, тормозящий, -), за исключением фоторецепторов, связанных с центром RGC1, которые должны быть молчаливы. Порог ганглиозной клетки установлен на 1.

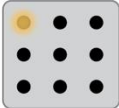
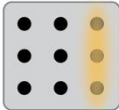


*Урок 1, Задача 5: Входы и подключение к RGC2 (точечный детектор с верхним центральным приемным полем) \*

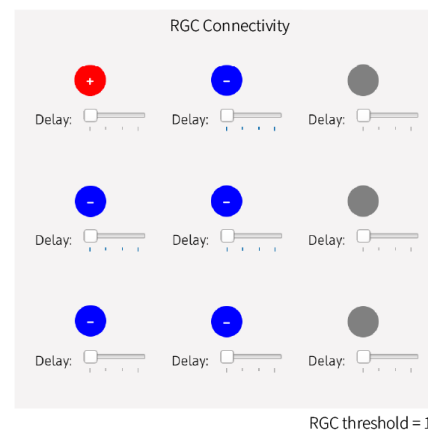
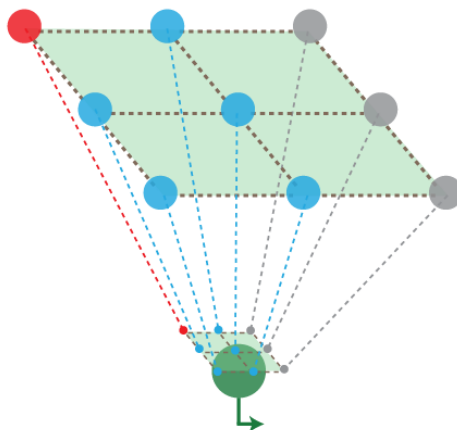
Секретное послание №5: **Испеките торт - Bake a cake.**

## Задача №6



Cipher					
<u>RGC1</u>		<u>RGC2</u>		<u>RetINaBox Output</u>	
Preferred visual stimulus		Preferred visual stimulus		RGC1	RGC2
				0	0 = A
				1	0 = P
				0	1 = C
				1	1 = K

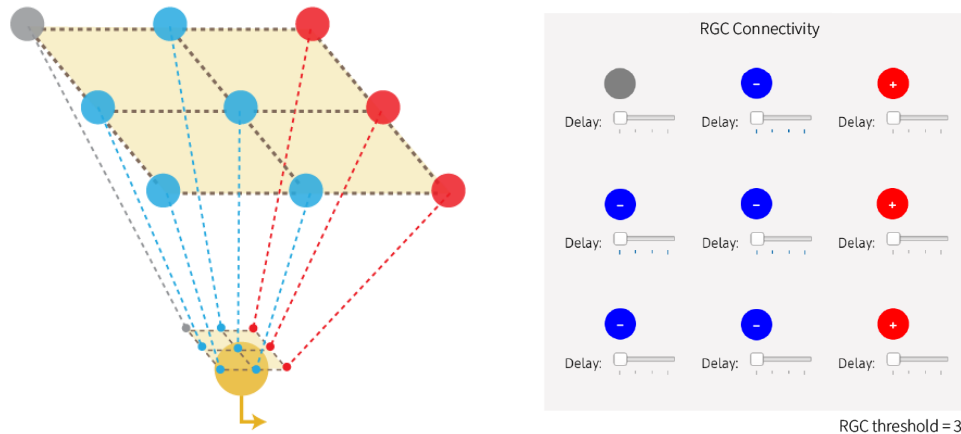
**Входы для RGC1:** эта центрально-периферическая клетка реагирует только при активации фоторецептора в левом верхнем углу. Этот фоторецептор должен иметь положительную полярность (красный, возбуждающий, +). Все остальные периферийные фоторецепторы имеют отрицательную полярность (синий, тормозящий, -), за исключением фоторецепторов в правом столбце, которые остаются неактивными (серые), что позволяет RGC1 и RGC2 коактивироваться. Порог чувствительности ганглиозных клеток установлен на 1.



Урок 1, Задача 6: Входы и подключение к RGC1 (точечный детектор с верхним левым полем восприятия)

**Входы для GC 2:** Эта ориентационно-селективная клетка (о которой мы говорили в Уроке 2) селективна к вертикальной линии в правой части массива фоторецепторов. Она реагирует только при активации трёх фоторецепторов в правом столбце. Эти фоторецепторы должны иметь положительную полярность (красный, возбуждающий, +). Все остальные окружающие фоторецепторы имеют отрицательную полярность (синий, тормозящий, -), за

исключением фоторецепторов, связанных с центром RGC2, которые должны быть молчаливы. Порог ганглиозной клетки установлен на 3.



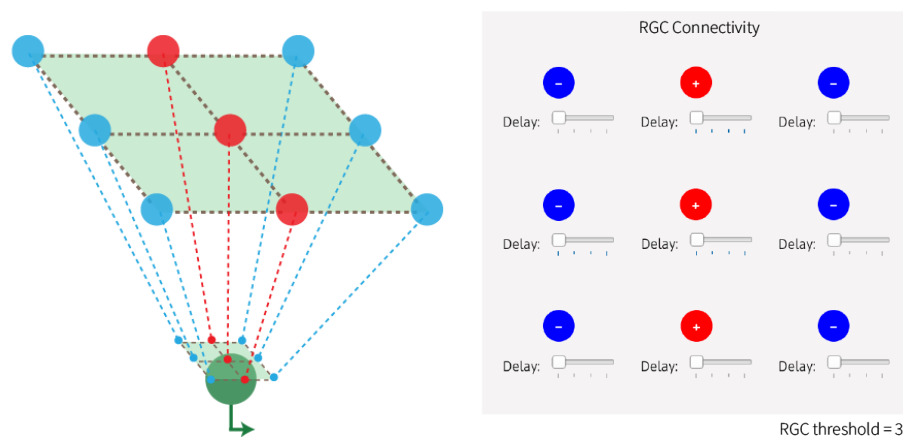
Урок 1, Задача 6: Входы и подключение к RGC2 (элементу избирательной ориентации)

Секретное послание №6: **Возьмите с собой кепку. - Pack a cap.**

## Решения для урока 2: Селективность ориентации

Задание №1: создание ганглиозной клетки, которая обнаруживает вертикальную линию.

**Входы для ганглиозной клетки 1:** Подключите 3 соседних фоторецептора по прямой вертикальной линии (например, средний столбец) к ганглиозной клетке с положительной (возбуждающей, +) полярностью. Подключите 6 других соседних фоторецепторов к той же ганглиозной клетке с отрицательной (тормозящей, -) полярностью. Установите порог ганглиозной клетки равным 3, чтобы ганглиозная клетка активировалась только при активации всех 3 фоторецепторов.

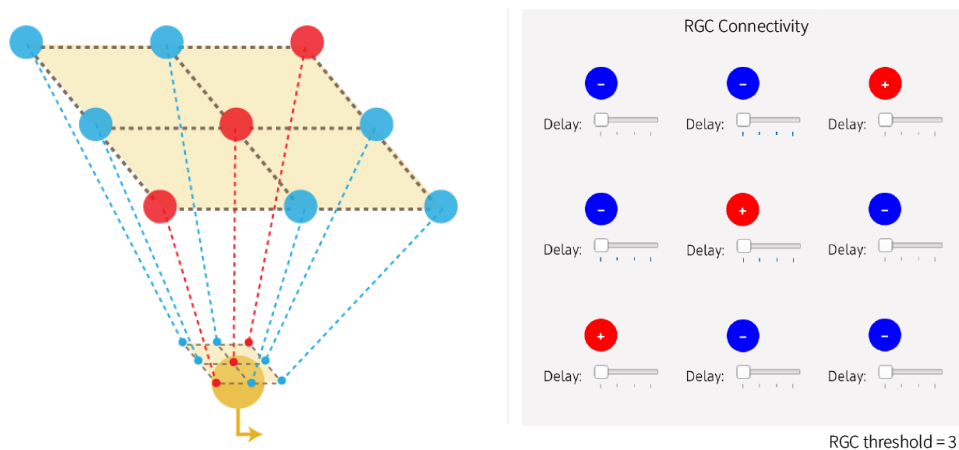


Урок 2, Задание 1: Входы и подключение к RGC1 (селективная клетка вертикальной ориентации)

Обратите внимание, что выше представлен лишь один из трёх возможных примеров правильного решения. Однако вы могли бы выбрать вертикальное рецептивное поле в левом или правом столбце матрицы 3 x 3.

**Задание №2:** создание второй ганглиозной клетки, которая обнаруживает диагональную линию.

**Входы для ганглиозной клетки 2:** Подключите 3 фоторецептора по диагонали к ганглиозной клетке с положительной (возбуждающей, +) полярностью. Подключите 6 других недиагональных фоторецепторов к той же ганглиозной клетке с отрицательной (тормозящей, -) полярностью. Установите порог ганглиозной клетки на 3, чтобы ганглиозная клетка активировалась только при активации всех 3 фоторецепторов и тормозилась при активации любого из недиагональных фоторецепторов.



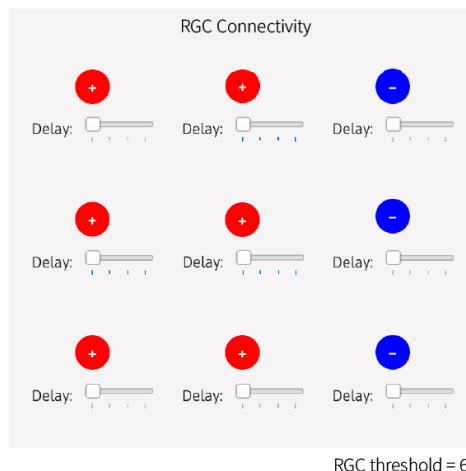
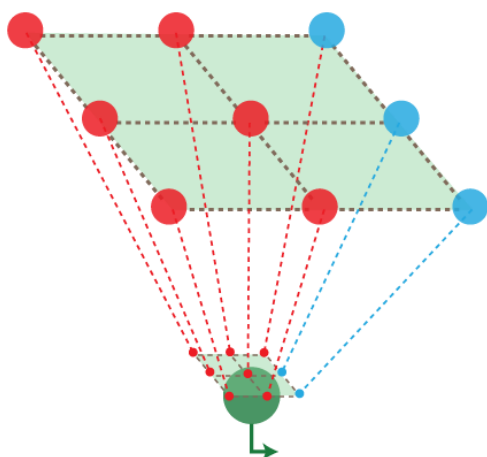
Урок 2, Задание 2: Входы и подключение к RGC2 (селективная клетка с диагональной ориентацией)

Обратите внимание, что вышеприведённый пример представляет собой лишь один из двух возможных примеров правильного решения. Однако вы могли бы выбрать диагональное рецептивное поле, ориентированное под углом 135° (т.е. другую диагональ).

**Задание №3:** создайте две ганглиозные клетки, которые обнаруживают вертикальные линии разной толщины.

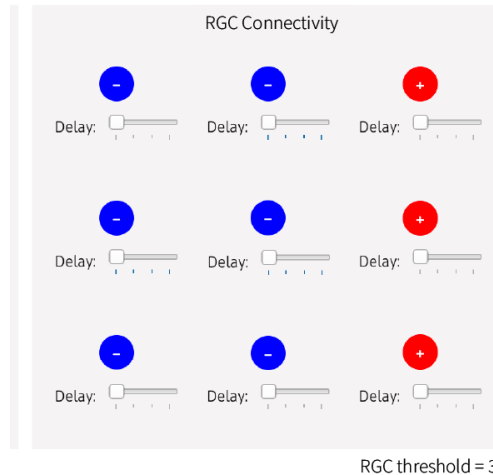
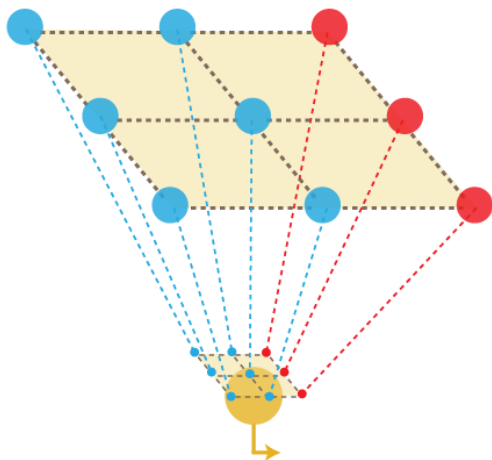
**Входы для ганглиозной клетки 1:** соедините два соседних столбца по 3 фоторецептора в вертикальную линию (например, средний столбец + боковой столбец) с ганглиозной клеткой 1, подав положительный (возбуждающий, +) потенциал. Подключите 3 других окружающих столбца фоторецептора к той же ганглиозной клетке, подав отрицательный (тормозящий, -) потенциал. Установите порог активации ганглиозной клетки на 6, чтобы ганглиозная клетка активировалась только при активации всех 6 фоторецепторов.





Урок 2, Задание 3: Входы и подключение к RGC1 (толстая вертикальная ориентация селективной ячейки)

**Входы для ганглиозной клетки 2:** подключите один столбец из 3 фоторецепторов, расположенных вертикально (например, правый столбец), к ганглиозной клетке 2 с положительной (возбуждающей, +) полярностью. Подключив 6 других соседних фоторецепторов к той же ганглиозной клетке с отрицательной (тормозящей, -) полярностью. Установите порог ганглиозной клетки на 3, чтобы ганглиозная клетка активировалась только при активации всех 3 фоторецепторов.



Урок 2, Задание 3: Входы и подключение к RGC2 (тонкая вертикальная селективная клетка)

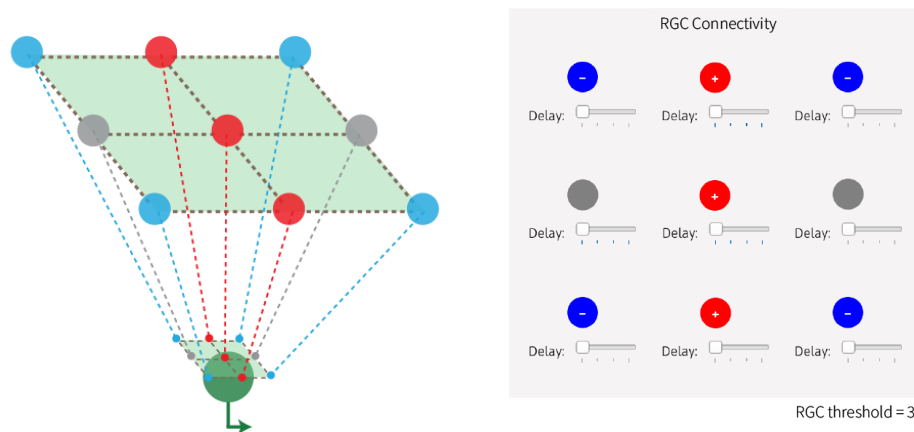
Обратите внимание, что вышеприведённый пример представляет собой один из нескольких возможных примеров правильного решения. Вы могли бы настроить каждую ганглиозную клетку с вертикальным рецептивным полем в разных местах (например, сместив его влево или вправо).

## Задача №1: построить детектор формы с рецептивными полями, селективными по ориентации

Обратите внимание, что приведённое ниже решение представляет собой одно из нескольких возможных правильных решений. Вы могли выбрать любую потенциальную фигуру, состоящую из двух прямых линий любой ориентации (например, X, T или L — в любой ориентации). Приведённое ниже решение настроит детектор формы, реагирующий на форму буквы «X».

Каждая из ганглиозных клеток должна реагировать на линию в различном положении/ориентации. Обе ганглиозные клетки должны активироваться при предъявлении фигуры (т.е. каждая ганглиозная клетка не должна подавляться, когда активна другая ганглиозная клетка).

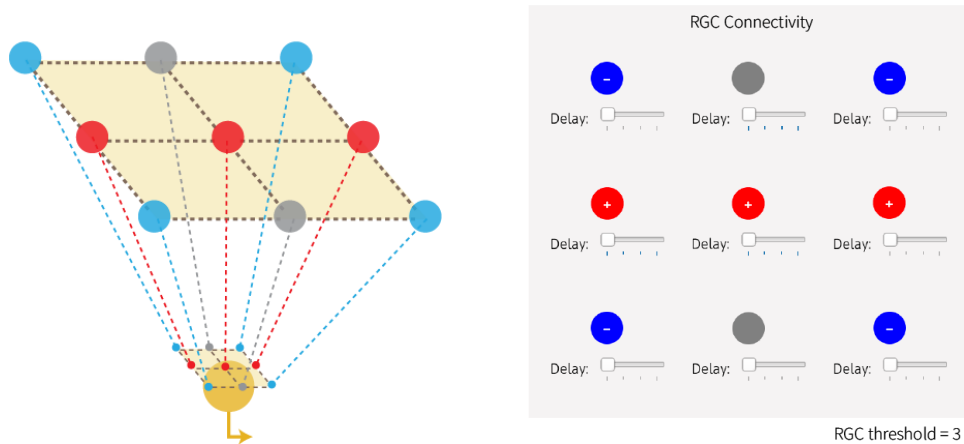
**Входные сигналы для ганглиозной клетки 1:** Чтобы получить крестообразную форму, нам нужно, чтобы ганглиозная клетка 1 реагировала на вертикальную линию в центре фоторецепторной матрицы. Подключите 3 соседних фоторецептора (например, вертикальную линию) к ганглиозной клетке с положительной (возбуждающей, +) полярностью, чтобы она активировалась только при активации всех 3 фоторецепторов (т.е. при наличии вертикальной полосы света в центре матрицы). Клетки в углу матрицы должны быть ингибирующими (-), а две левые и правые клетки в центральном ряду должны быть инактивированы (серые). Это сделает ориентацию клеток селективной, но при этом продолжит реагировать при активации ганглиозной клетки 2 (см. ниже).



Урок 2, Задача 1: Входы и подключение к RGC1 (селективная клетка вертикальной ориентации)

**Входные сигналы для ганглиозной клетки 2:** Чтобы получить крестообразную форму, мы хотим, чтобы ганглиозная клетка 2 реагировала на горизонтальную линию в центре фоторецепторной матрицы. Подключите 3 соседних фоторецептора (например, горизонтальную линию) ко второй ганглиозной клетке с положительной (возбуждающей, +) полярностью, чтобы она активировалась только при активации всех трёх фоторецепторов (т.е. при наличии горизонтальной полосы света в центре матрицы). Аналогично

предыдущему, добавление ингибирования к угловым фоторецепторным связям (отрицательной полярности, -) с одновременным инактивированием верхней и нижней клеток в средней колонке сделает ориентацию клетки избирательной, но при этом позволит ей реагировать при активности RGC1.



Урок 2, Задача 1: Входы и подключение к RGC2 (селективная клетка горизонтальной ориентации)

## Урок 3 Решения: Направление Селективность

*Примечание: В зависимости от временных задержек, назначенных каждому фоторецептору, вам может потребоваться протестировать различные скорости стимула, чтобы наблюдать за активацией ганглиозной клетки в одном направлении. Схема будет работать наиболее надёжно, когда скорость движения подобрана к задержкам, что позволит всем входным сигналам в предпочтительном направлении суммироваться в ганглиозной клетке одновременно во время движения в предпочтительном направлении, а также позволит торможению в нулевом направлении эффективно подавлять возбуждение во время движения в нулевом направлении.*

**Задание № 1: создание селективной ганглиозной клетки, движущейся влево**  
←

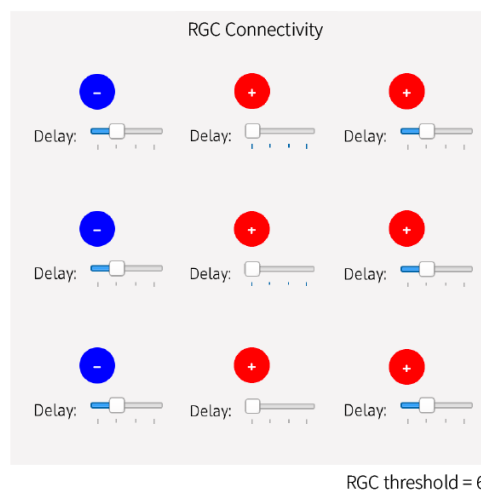
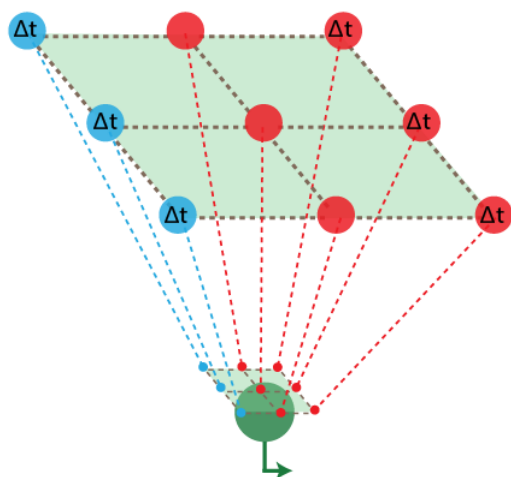
Ганглиозная клетка получает сигнал от двух полных столбцов возбуждающих фоторецепторов (положительная полярность) и одного полного столбца тормозных фоторецепторов (отрицательная полярность).

- Крайний левый столбец фоторецепторов (тормозящий, -): короткая/средняя временная задержка
- Средний столбец фоторецепторов (возбуждающий, +): без временной задержки
- Крайний правый столбец фоторецепторов (возбуждающий, +): короткая/средняя временная задержка

Установите пороговое значение для **ганглиозной клетки на 6**. Это гарантирует, что клетка будет активироваться только при синхронной активации обоих столбцов возбуждающих

фоторецепторов (всего 6 фоторецепторов), то есть при движении влево, и при идеальном совпадении времени для суммирования входного сигнала.

Такая конфигурация приводит к тому, что ганглиозная клетка активируется только при движении стимула влево по массиву. Стимул последовательно активирует фоторецепторы правого, среднего и, наконец, левого столбцов. Задержки настроены таким образом, что сигналы от двух возбуждающих столбцов поступают в ганглиозную клетку одновременно **ТОЛЬКО** при движении влево, позволяя клетке достичь порогового значения и активироваться. Запоздывающий входной сигнал тормозного столбца поступает слишком поздно, чтобы повлиять на реакцию ганглиозной клетки. Если стимул движется вправо (то есть в направлении, противоположном предпочтительному для ганглиозной клетки), тормозной столбец суммируется с возбуждающим столбцом, нейтрализуя возбуждение и предотвращая активацию ганглиозной клетки. Более того, два столбца возбуждающих входов будут активированы в противофазе друг с другом для движения вправо. \*обратите внимание, что если вы просто стимулируете 6 положительно связанных фоторецепторов (не стимулируя 3 отрицательно связанных фоторецептора) статическим стимулом, ганглиозная клетка в конечном итоге также включится (аналогично тому, что происходит со многими ганглиозными клетками в мозге, селективными по направлению, которые иногда могут активироваться как движением в предпочтительном направлении, так и статическими стимулами).



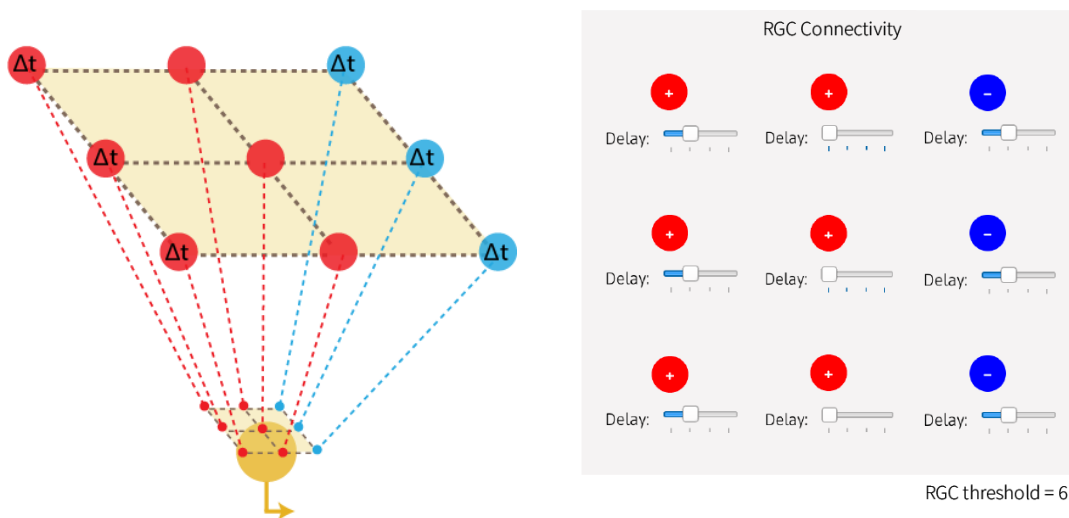
Урок 3, Задание 1: Входы и подключение к RGC1 (селективная клетка с левым направлением движения)

Задание №2: создание ганглиозной клетки, селективно движущейся вправо →

Ганглиозная клетка получает входные сигналы от двух полных столбцов возбуждающих фоторецепторов (положительная полярность) и одного полного столбца ингибирующих фоторецепторов (отрицательная полярность).

- Крайний левый столбец фоторецепторов (возбуждающий, +): короткая/средняя задержка
- Средний столбец фоторецепторов (возбуждающий, +): без задержки
- Крайний правый столбец фоторецепторов (тормозящий, -): короткая/средняя задержка

**Установите пороговое значение для ганглиозных клеток равным 6.** Это гарантирует, что клетка будет активироваться только тогда, когда оба столбца возбуждающих фоторецепторов (всего 6 фоторецепторов) активируются синхронно, то есть когда направление движения направлено вправо, и время идеально совпадает для суммирования входных сигналов. Подробное объяснение синхронизированного по времени суммирования входных сигналов см. в решении задания №1.



Урок 3, Задание 2: Входы и подключение к RGC2 (селективная клетка правого направления движения)

**Задание №3: построение модели медленного и быстрого движения, избирательного по направлению ганглиозной клетки. →**

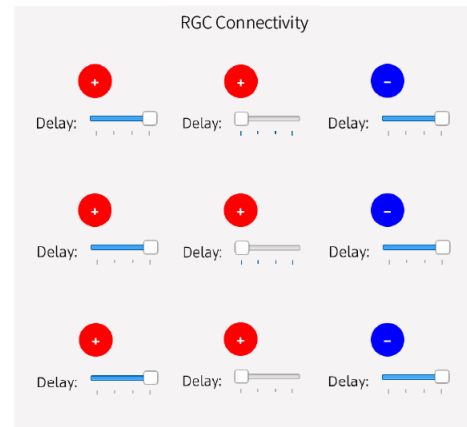
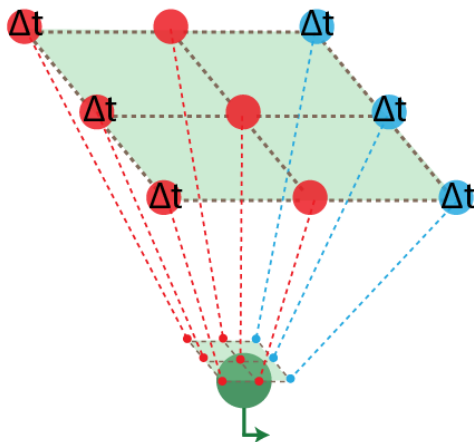
Ключом к решению этой проблемы является **величина временных задержек**, налагаемых на схемы, рассматриваемые в Задании № 1 (избирательная клетка правого направления).

Каждая ганглиозная клетка получает сигнал от двух полных столбцов возбуждающих фоторецепторов (положительная полярность) и одного полного столбца тормозных фоторецепторов (отрицательная полярность). Установите пороговое значение для каждой **ганглиозной клетки на 6**. Это гарантирует, что клетка активируется только при синхронной активации обоих столбцов возбуждающих фоторецепторов (всего 6 фоторецепторов)..

**Входы в RGC1 (медленно движущиеся → направления - селективная клетка):**

- Крайний левый столбец фоторецепторов (возбуждающий, +): длительная задержка
- Средний столбец фоторецепторов (возбуждающий, +): без задержки

- Крайний правый столбец фоторецепторов (тормозящий, -): длительная задержка



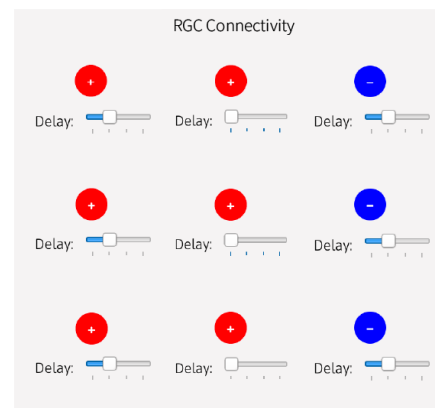
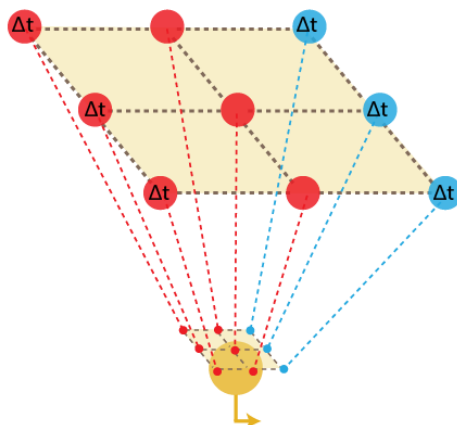
RGC threshold = 6

Урок 3, Задание 3: Входы и подключение к RGC1 (медленная клетка с выборочным направлением движения вправо)

**Входы в RGC2 (быстро движущиеся □ направления - селективная клетка):**

- Крайний левый столбец фоторецепторов (возбуждающий, +): короткая временная задержка
- Средний столбец фоторецепторов (возбуждающий, +): без временной задержки
- Крайний правый столбец фоторецепторов (тормозящий, -): короткая временная задержка

Более короткая задержка создаёт меньшее временное окно для суммирования входных сигналов, поэтому стимул должен двигаться быстрее, чтобы активировать ганглиозную клетку. И наоборот, более длительная задержка создаёт более широкое окно суммирования, позволяя клетке реагировать на более медленное движение. Подробное объяснение согласованного по времени суммирования входных сигналов см. в решении задания №1.



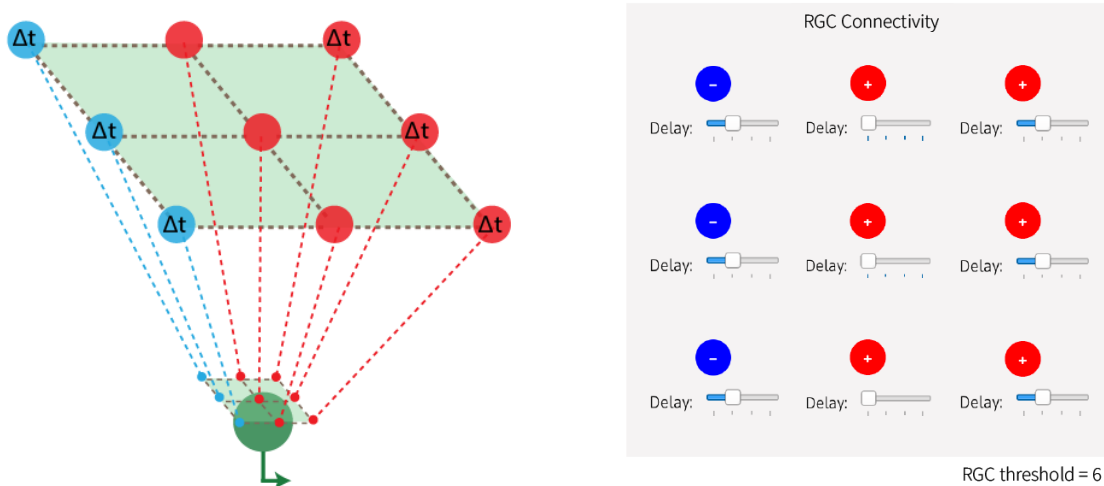
RGC threshold = 6

Урок 3, Задание 3: Входы и подключение к RGC2 (быстро движущейся вправо селективной ячейке)

## Задача: Разрушение блоков с помощью схем, избирательных по направлению

**Входы в RGC1 ←:** Ганглиозная клетка получает сигнал от двух полных столбцов возбуждающих фоторецепторов (положительная полярность) и одного полного столбца тормозных фоторецепторов (отрицательная полярность). Установите порог ганглиозной клетки на 6.

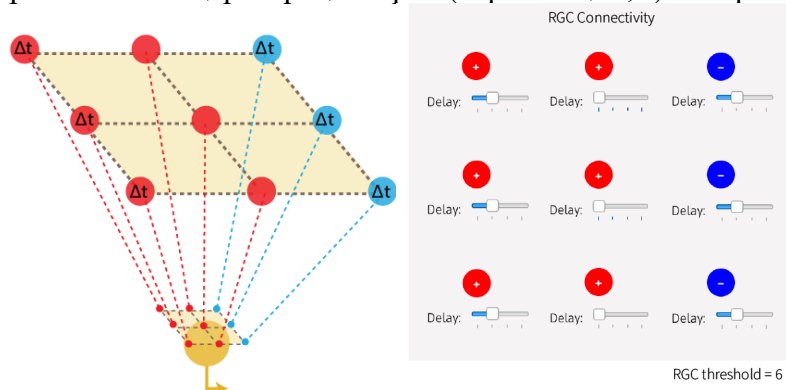
- Крайний левый столбец фоторецепторов (тормозящий, -): короткая задержка
- Средний столбец фоторецепторов (возбуждающий, +): без задержки
- Крайний правый столбец фоторецепторов (возбуждающий, +): короткая задержка



Урок 3, Задача 1: Входы и подключение к RGC1 (селективная клетка, движущаяся влево)

**Входы в RGC1 → :** Ганглиозная клетка получает сигнал от двух полных столбцов возбуждающих фоторецепторов (положительная полярность) и одного полного столбца тормозных фоторецепторов (отрицательная полярность). Установите порог ганглиозной клетки на 6.

- Крайний левый столбец фоторецепторов (возбуждающий, +): с короткой задержкой
- Средний столбец фоторецепторов (возбуждающий, +): без задержки
- Крайний правый столбец фоторецепторов (тормозящий, -): с короткой задержкой



Урок 3, Задание 4: Входы и подключение к RGC2 (селективная клетка, движущаяся вправо)

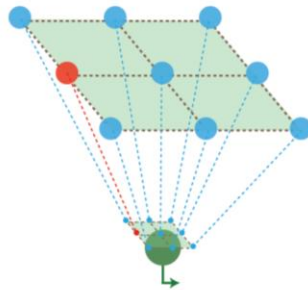
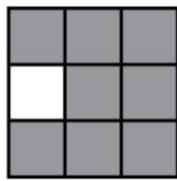
# Режим обнаружения

## Легкий

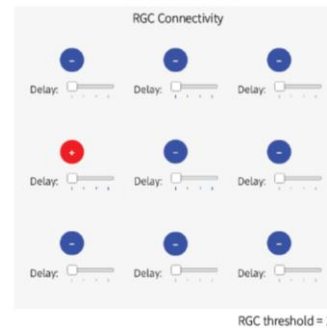
### Простой вариант 1: клетка «центр-окружение»

- Предпочтительный стимул: статическое пятно света на левом краю рецептивного поля
- Порог ганглиозных клеток: 1

Preferred stimulus



Circuit

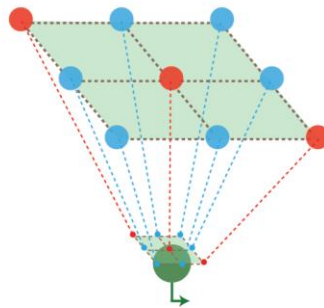
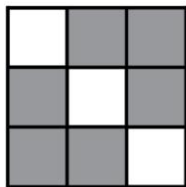


Урок 4, Простой 1: Предпочтительный стимул (слева) и подключение (справа) к загадочной схеме Простого 1

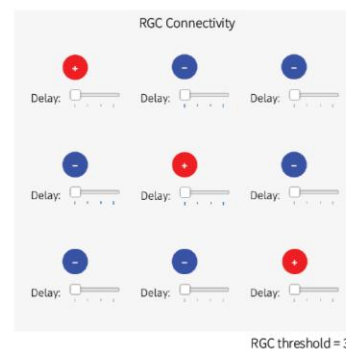
### Легкий 2: клетка с избирательной ориентацией

- Предпочтительный стимул: статическая диагональная линия (135°) в центре рецептивного поля
- Порог ганглиозных клеток: 3

Preferred stimulus



Circuit



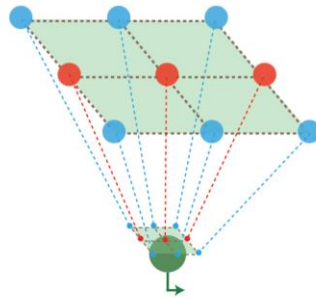
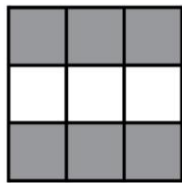
Урок 4, Легкий 2: Предпочтительный стимул (слева) и подключение (справа) к загадочной схеме Легкий 2



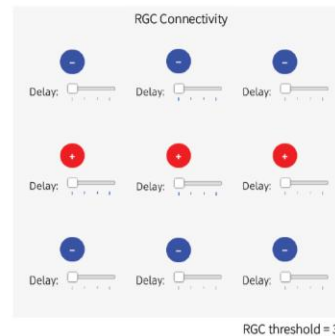
Простой 3: ориентационная селективная клетка

- Предпочтительный стимул: статическая горизонтальная линия в центре поля
- Порог ганглиозных клеток: 3

Preferred stimulus



Circuit

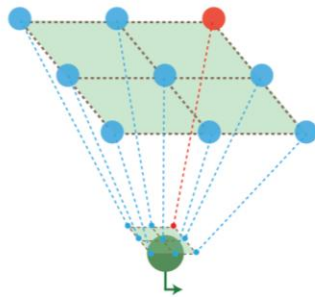
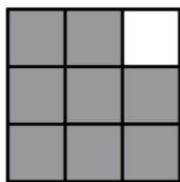


Урок 4, Простой 3: Предпочтительный стимул (слева) и подключение (справа) к загадочной схеме Простого 3

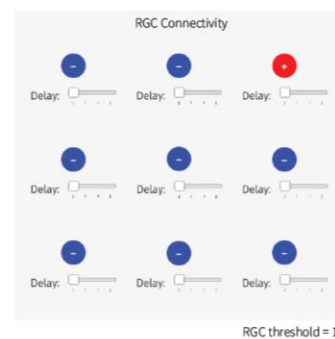
Простой 4: клетка «центр-окружение»

- Предпочтительный стимул: статическое пятно света в правом верхнем углу рецептивного поля
- Порог ганглиозных клеток: 1

Preferred stimulus



Circuit

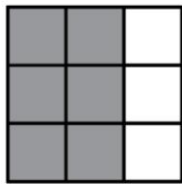


Урок 4, Простой 4: Предпочтительный стимул (слева) и подключение (справа) к загадочной схеме Простого 4

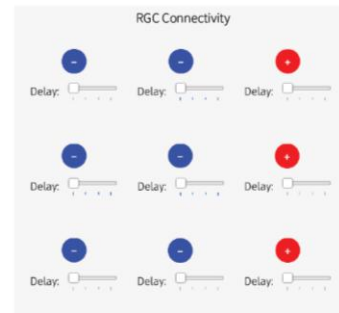
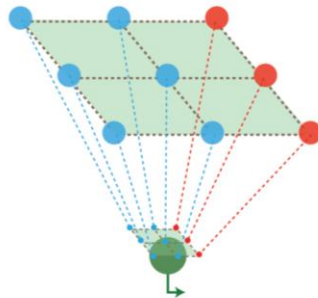
### Простой 5: Ориентация селективной ячейки

- Предпочтительный стимул: статическая вертикальная линия на правом краю рецептивного поля
- Порог ганглиозных клеток: 3

Preferred stimulus



Circuit



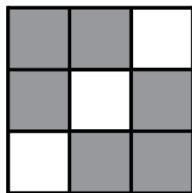
RGC threshold = 3

Урок 4, Простой 5: Предпочтительный стимул (слева) и подключение (справа) к загадочной схеме Простого 5

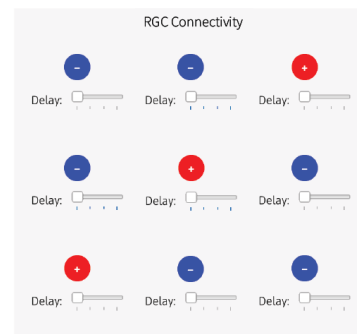
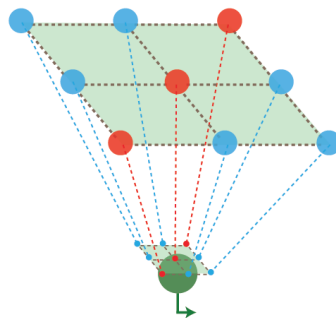
### Простой 6: Ориентация селективной ячейки

- Предпочтительный стимул: статическая диагональная линия (45°) в центре рецептивного поля
- Порог ганглиозных клеток: 3

Preferred stimulus



Circuit



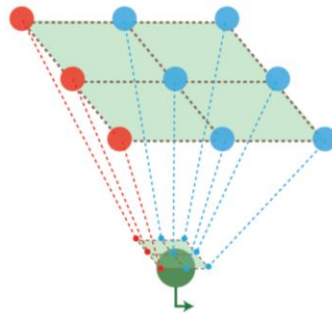
RGC threshold = 3

Урок 4, Простой 6: Предпочтительный стимул (слева) и подключение (справа) к загадочной схеме Простого 6

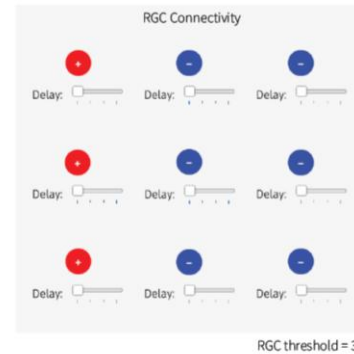
### Простой 7: Ориентация селективной ячейки

- Предпочтительный стимул: статическая вертикальная линия на левом краю рецептивного поля
- Порог ганглиозных клеток: 3

Preferred stimulus



Circuit

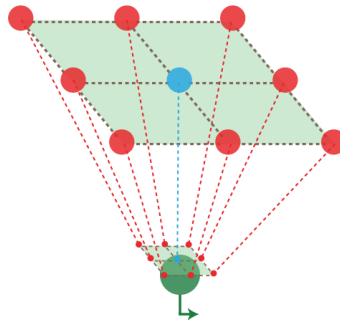
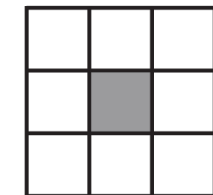


Урок 4, Простой 7: Предпочтительный стимул (слева) и подключение (справа) к загадочной схеме Простого 7

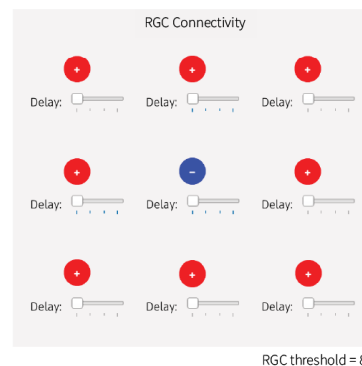
## Средний

### Средний 1: Кольцевая селективная клетка

- Предпочтительный стимул: световое кольцо (в центре рецептивного поля света нет)
- Порог чувствительности ганглиозных клеток: 8



Circuit

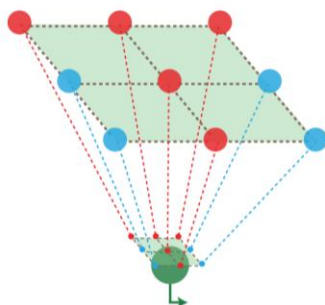
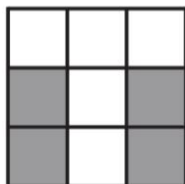


Урок 4, Средний 1: Предпочтительный стимул (слева) и подключение (справа) к загадочной цепи Средний 1.

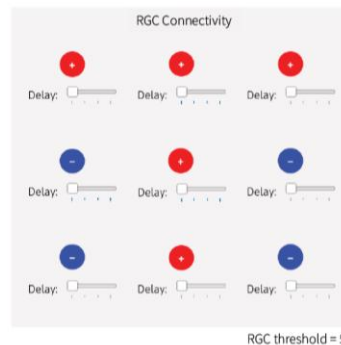
### Средний 2: Форма (Т) селективная клетка

- Предпочтительный стимул: Т-образная форма
- Порог ганглиозных клеток: 5

Preferred stimulus



Circuit

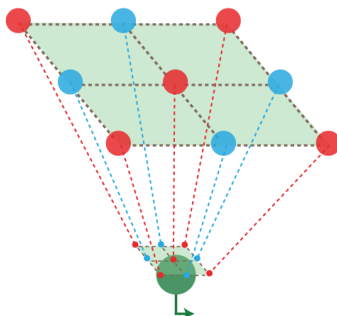
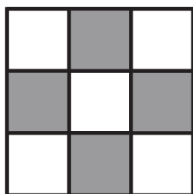


Урок 4, Средний 2: Предпочтительный стимул (слева) и подключение (справа) к загадочной цепи Среднего 2.

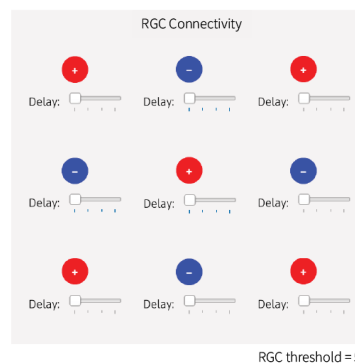
### Средний 3: Форма (X) селективная клетка

- Предпочтительный стимул: X-образная форма в центре рецептивного поля
- Порог чувствительности ганглиозных клеток: 5

Preferred stimulus



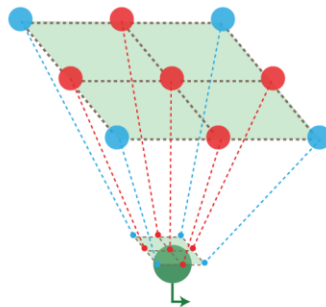
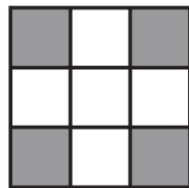
Circuit



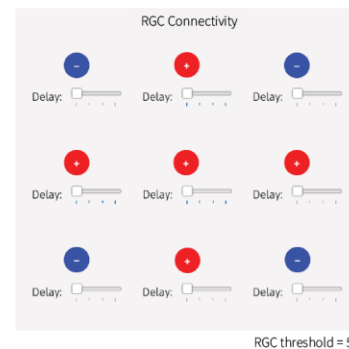
Урок 4, Средний 3: Предпочтительный стимул (слева) и подключение (справа) к загадочной цепи Среднего 3.

#### Средний 4: Форма (+) селективная

- Предпочтительный стимул: +-образная форма (или пятно света среднего размера) в центре рецептивного поля.
  - Порог ганглиозных клеток: 5
- Preferred stimulus



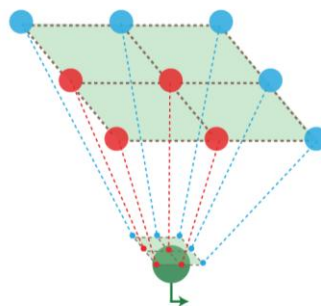
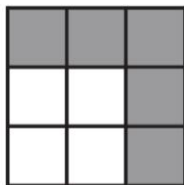
Circuit



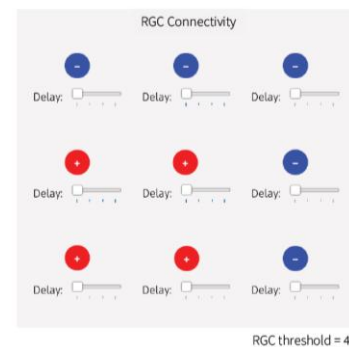
Урок 4, Средний 4: Предпочтительный стимул (слева) и подключение (справа) к загадочной цепи Среднего 4.

#### Средний 5: Клетка центр-окружение

- Предпочтительный стимул: пятно света среднего размера с рецептивным полем в левом нижнем углу.
  - Порог ганглиозных клеток: 4
- Preferred stimulus



Circuit

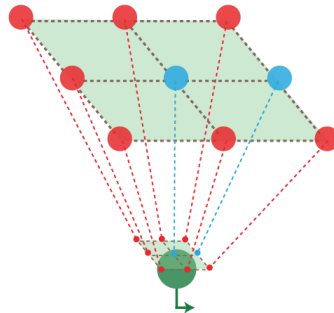
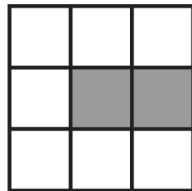


Урок 4, Средний 5: Предпочтительный стимул (слева) и подключение (справа) к загадочной цепи Среднего 5.

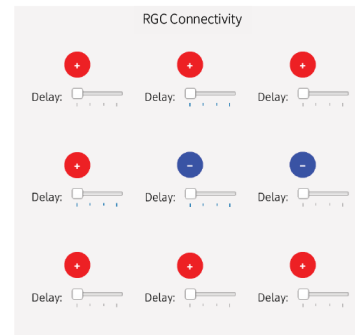
### Средний 6: Форма (С) селективная клетка

- Предпочтительный стимул: С-образная форма
- Порог ганглиозных клеток: 7

Preferred stimulus



Circuit



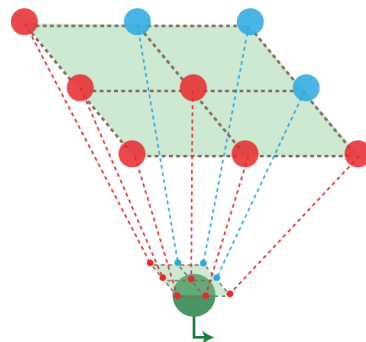
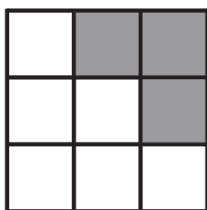
Урок 4, Средний 6: Предпочтительный стимул (слева) и подключение (справа) к загадочной цепи Среднего 6.

## СЛОЖНЫЙ

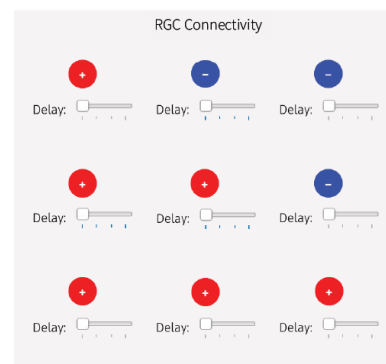
### Сложный 1: Клетка, селективная по форме (треугольник)

- Предпочтительный стимул: прямой угол в левом нижнем углу рецептивного поля
- Порог чувствительности ганглиозных клеток: 6

Preferred stimulus



Circuit

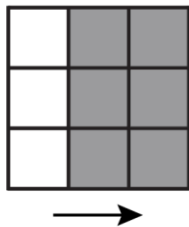


Lesson 4, Сложный 1: Preferred stimulus (left) and wiring (right) to Сложный 1 mystery circuit

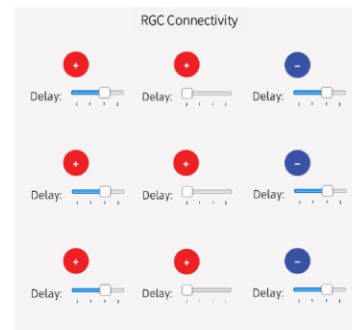
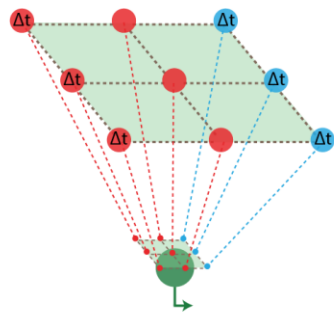
### Сложный 2: Клетка избирательного направления

- Предпочтительный стимул: движущаяся вправо вертикальная полоса света.
- Фоторецепторы в левом и правом столбцах должны быть настроены на средние временные задержки (подробное объяснение согласованного по времени суммирования входных сигналов см. в решении Урока 3, Задания № 1). Ganglion cell threshold: 6

Preferred stimulus



Circuit

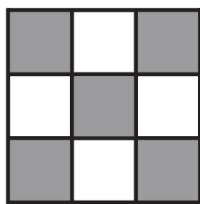


Урок 4, Сложный 2: Предпочтительный стимул (слева) и подключение (справа) к загадочной схеме Сложный 2. \*обратите внимание, поскольку скорость Селективность РетнаБокс направленных селективных ячеек широка, мы принимаем любой ввод задержки по времени как правильный в задачах направленных селективных задач режима Discovery.

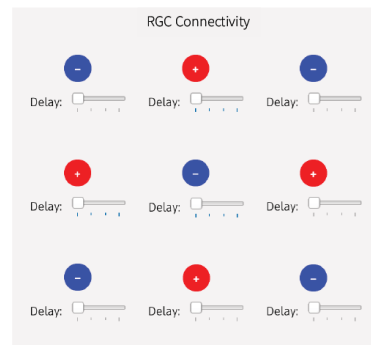
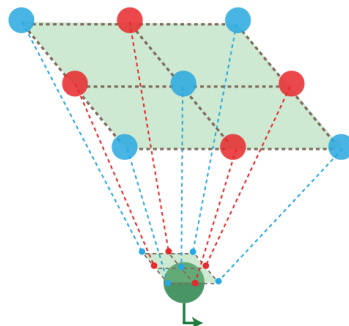
### Сложный 3: Выборочная клетка формы (ромба)

- Предпочтительный стимул: кольцо света среднего размера/ромб (исключая центр)
- Порог чувствительности ганглиозных клеток: 4

Preferred stimulus



Circuit

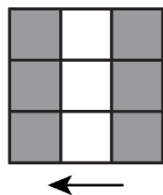


Урок 4, Сложный 3: Предпочтительный стимул (слева) и подключение (справа) к загадочной схеме Сложный 3.

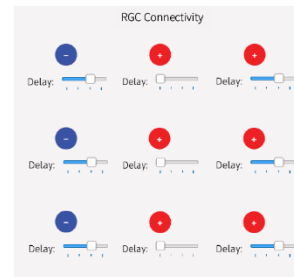
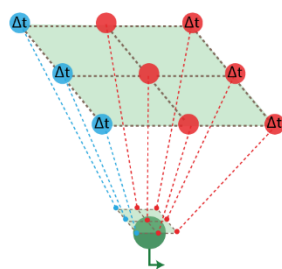
#### Сложный 4: Клетка избирательного направления

- Предпочтительный стимул: движущаяся влево вертикальная полоса света.
- Фоторецепторы в левом и правом столбцах должны быть настроены на среднюю временную задержку (подробное объяснение согласованной по времени суммации входных сигналов см. в Уроке 3, Задании № 3).
- Порог чувствительности ганглиозных клеток: 3

Preferred stimulus



Circuit



Урок 4, Сложный 4: Предпочтительный стимул (слева) и подключение (справа) к Сложный 4 Mystery Circuit. \*обратите внимание, поскольку скорость Селективность РетнаБокс направленности селективных клеток широка, мы принимаем любой ввод задержки по времени как правильный в задачах направленности селективных задач режима Discovery.