

Научные аспекты в игре

# Тенотин

Игра о генетике Менделя



# Научные аспекты в игре «Генотип»

## Грегор Мендель и тема игры

### ❖ НАУКА

Грегор Иоганн Мендель (1822—1884) родился в Гинчице, деревушке на севере Австрийской империи (территория современной Чехии). Его семья занималась сельским хозяйством, и Иоганн рано стал опытным садовником и пчеловодом. Позже он поступил на философское отделение университета Оломоуца, где изучал математику, физику, филологию, философию и этику.

Затем Мендель переехал в Брно, где изучал теологию и сельское хозяйство, в частности возделывание винограда и яблонь. Он постригся в монахи в августинском монастыре Св. Фомы, получив монашеское имя Грегор, затем начал преподавать, благодаря чему смог оплачивать дальнейшую учёбу и свои эксперименты. Изучая физику и математику в Венском университете, Мендель начал рассматривать мир как нечто упорядоченное, и это вдохновило его на описание природных явлений языком математики.

В монастырском саду Мендель построил теплицу и в 1854 году начал проводить опыты с посевным горохом (*Pisum sativum*). Это стало самой известной его работой, хотя он также проводил обширные метеорологические наблюдения и ставил опыты с другими растениями и пчёлами.

В 1865 году Мендель выступил со своим трудом «Опыты над растительными гибридами» (*Versuche über Pflanzenhybriden*) перед Обществом естествоиспытателей в Брно, члены которого позже опубликовали результаты его экспериментов в своём журнале. Позднее, в 1872 году, Мендель был награждён орденом Франца Иосифа — в то время одной из самых престижных наград Австро-Венгрии. Работая с гибридами растений, Мендель открыл основополагающие законы наследования: гены образуются из отдельных парных единиц, наследуемых по одной от каждого родителя. В течение 40 лет его работа оставалась непонятой и не была оценена по достоинству, но сегодня Мендель, чьё усердие и наблюдательность действительно опередили своё время, считается отцом генетики.

### ❖ ИГРА

Оформление и игровой процесс «Генотипа» призваны воссоздать атмосферу того самого сада в монастыре Св. Фомы, в котором работал Мендель. Как и ему, игрокам предстоит проводить опыты, вести записи результатов, нанимать помощников и грамотно распоряжаться своими возможностями. Участникам необходимо разумно распределить время между исследованиями и поиском финансирования — ведь австрийские флорины, увы, не растут в саду, как горох! В разных фазах игры участники не смогут успеть всё, и придётся выбирать, что для них важнее. И конечно же, как и в исследованиях Менделя, каждый раунд игроки будут собирать образцы гороха для изучения. Те, кто грамотно рассчитают действия, получат наибольшую отдачу от своей работы.

## Опыты Менделя с горохом

### ❖ НАУКА

Современники Менделя придерживались разных мнений по поводу наследственности: что признаки потомства являются результатом смешения родительских признаков, что признаки наследуются только по отцовской линии или что приобретаются уже после оплодотворения. Но ни одна из этих теорий не могла объяснить, почему определённые физические черты, например цвет волос, проявляются через поколение. Чтобы выяснить это, Мендель последовательно провёл серию генетических экспериментов.

Самыми успешными стали опыты с горохом — именно это растение отлично подошло для поиска ответов на многие вопросы Менделя. Горох размножается самоопылением, благодаря чему естествоиспытатель начал свою работу с выведения **чистых линий** (генетически идентичных растений). Затем он стал их перекрёстно опылять, получая растения-гибриды и выявляя закономерности наследования внешних черт. У гороха есть несколько признаков, каждый из которых присутствует лишь в двух разных формах, что имело ключевое значение в выявлении природы наследования. За восемь лет Мендель изучил 7 таких признаков примерно у 30 000 растений гороха.



### ❖ ИГРА

Для участников карты гороха символизируют объекты изучения. Изображённые на картах растения совмещают в себе внешние черты, которые экспериментатор в теории ожидает увидеть и которые действительно проявятся. Буквы на картах обозначают элементы генетической структуры, а изображение самого растения показывает, как эти элементы проявились во внешних признаках.

На протяжении игры участники будут собирать данные экспериментов, чтобы подтверждать признаки на картах гороха, тем самым показывая свои успехи в понимании природы растений. В фазе скрещивания родительские растения, выбранные игроками, дают потомство (его определяет бросок кубиков).

Опыты с растениями проводятся в саду, где, конечно же, нельзя обойтись без садового инвентаря. Предметы, которыми пользовался Мендель, представлены в игре картами инструментов. Некоторые из них позволяют применять те же приёмы, что и сам естествоиспытатель: например, при помощи кисточки он вручную проводил перекрёстное опыление. Карта «Кисточка для опыления» позволяет игроку подтвердить одинаковые признаки сразу на нескольких картах гороха.



## Основы генетического наследования

### ❖ НАУКА

Перекрёстно опыляя горох, Мендель открыл, что каждые отдельно взятые признаки родительских растений (такие как высота стебля или окраска цветков) у потомства не смешиваются, а наследуются целиком от одного или другого родителя. Так, если скрестить высокое и низкое растения (чистые линии), их потомство всегда будет высоким. Мендель назвал такие признаки доминантными, а «скрытые» признаки, которые могут проявиться у последующих поколений, — рецессивными. Все вместе эти признаки составляют **фенотип** или *наблюдаемые характеристики организма*.

Изучая закономерности наследования, Мендель предположил, что в основе природы растений лежат **генотипы** — элементы генетической структуры, определяющие внешние признаки. Генотип каждого растения состоит из уникального набора **аллелей** (разных вариантов одного гена), унаследованного от родителей. Как и у людей, у гороха двойной набор хромосом (горох — диплоид), то есть каждый ген представлен двумя аллелями. Всякое растение передаёт своему потомству один *случайный* аллель для каждого из признаков. Иными словами, потомство, чтобы сформировать признак, наследует по одному аллелю от каждого родителя. В процессе наследования определённый аллель может как передаваться дальше из поколения в поколение, так и исчезнуть.

Наблюдая за последующими поколениями растений, Мендель выявил вероятность закрепления определённых признаков и сформулировал свои знаменитые *принципы наследственности*. Позже он разработал способы точно предсказывать, как наследственная информация передаётся между поколениями. Это произошло почти за век до того, как учёные открыли, что носителями информации, закодированной в ДНК организма, являются гены.

Надо сказать, Менделю необыкновенно повезло, что для своих опытов он выбрал горох. Большинство сельскохозяйственных культур — не диплоиды: в их клетках присутствуют три, четыре, шесть или даже больше копий каждого гена. Если бы Мендель изучал полиплоидное растение, например пшеницу, он бы не совершил тех же открытий.

## ❖ ИГРА

Участники будут отслеживать признаки у потомства гороха, как это делал Мендель в своих опытах. В игру перенесены 4 ключевых признака из 7, которые он изучал:

- **форма семян (гладкие или морщинистые);**
- **окраска цветков (пурпурные или белые);**
- **окраска плодов (зелёные или жёлтые);**
- **высота стебля (высокий или низкий).**

Другие признаки, изученные Менделем, встречаются на иллюстрациях, но не имеют значения в процессе игры: окраска семян (жёлтые или зелёные), расположение цветков (пазушные или верхушечные) и форма плодов (выпуклые или с перетяжками).

В течение партии генотипы родительских растений уже известны (они представлены жетонами родительских генов). После скрещивания игроки изучают потомство, что позволяет им подтвердить признаки на своих картах гороха, закрывая их жетонами листьев.

Каждый признак представлен определённым цветом кубиков и рассматривается отдельно от других признаков, поэтому карты гороха (символизирующие потомство) «наследуют» гены для каждого своего признака от разных кубиков. Например, забрав жёлтый кубик, игрок получает образец растения с геном высоты стебля, а забрав зелёный, — с геном окраски плодов. Участники не могут с помощью одного кубика получить образцы разных признаков.



# Генотип и фенотип

## ❖ НАУКА

**Фенотип** каждого организма (его внешние признаки) определяется **генотипом** — аллелями, которые он унаследовал от родителей. Можно понять, какие аллели определяют окраску цветков у гороха, изучив взаимосвязь между фенотипом и генотипом растения. К примеру, окраска цветков — это признак, который определяется парой аллелей. **Доминантный** аллель  $F$  вырабатывает пурпурный пигмент, а **рецессивный** аллель  $f$  не активен и пигмент не вырабатывает. Если в генотипе присутствует доминантный аллель, проявится доминантный признак — пурпурная окраска, поэтому наличие одного или двух доминантных аллелей в генотипе растения всегда приводит к фенотипу с пурпурными цветками. Соответственно, белые цветки возможны, только если оба аллеля рецессивные.

Но важно понимать, что один и тот же наблюдаемый фенотип может быть проявлением разных генотипов. В примере с окраской цветков пурпурные лепестки будут иметь как растения с двумя доминантными аллелями ( $FF$ ), так и растения с одним доминантным и одним рецессивным аллелями ( $Ff$ ).

Генотип		Фенотип
Алель 1	Алель 2	
Пурпурные ( $F$ )	Пурпурные ( $F$ ) = $FF$ (гомозиготный)	
Белые ( $f$ )	Пурпурные ( $F$ ) = $Ff$ (гетерозиготный)	
Пурпурные ( $F$ )	Белые ( $f$ ) = $Ff$ (гетерозиготный)	
Белые ( $f$ )	Белые ( $f$ ) = $ff$ (гомозиготный)	

## ❖ ИГРА

Основная цель участников — подтверждать признаки на своих картах гороха, забирая кубики с совпадающим генотипом. Изображённые на поле **решётки Пеннета** (см. ниже) позволяют определить, какому генотипу соответствует тот или иной кубик. Родительские растения представлены в игре жетонами родительских генов: в процессе игры можно заменять их и тем самым влиять на вероятность появления генотипов на кубиках потомства.

Генотипы необходимы, чтобы изучать признаки на картах гороха, а фенотипы на уже изученных картах принесут дополнительные очки, если заявить **цель исследования**. При этом доминантные фенотипы более распространены, чем рецессивные, поэтому принесут меньше очков.

# Менделевские закономерности наследования

## ❖ НАУКА

Экспериментируя с горохом, Мендель обратил внимание, что некоторые признаки словно «пропускают» поколение. Проводя контролируемое скрещивание, он наблюдал сразу за несколькими признаками гороха, в том числе за формой семян, высотой стебля, окраской цветков и плодов. Свои эксперименты он начал с чистых линий: такие растения **гомозиготны** по тому или иному признаку, что означает наличие у них двух одинаковых аллелей (например,  $FF$  или  $ff$ ).

Мендель скрещивал гомозиготные растения и наблюдал за их потомством. К примеру, скрестив высокие растения с низкими, он обнаружил, что всё их потомство (а им стали **гетерозиготные** растения — с разными аллелями, например,  $Ff$ ) имело высокие стебли. Мендель не обнаружил ни одного растения средней высоты. Так он определил, что высокий стебель — это доминантный признак, а значит, если он унаследован от родителя, у потомства он всегда будет видимым. Доминантные аллели обозначаются заглавными буквами: в случае с высотой стебля — буквой  $T$ . Также Мендель определил, что низкий стебель — рецессивный признак. Рецессивные аллели «скрываются» за доминантными и обозначаются строчными буквами (например,  $t$ ). Доминантные и рецессивные признаки не смешиваются между собой, образуя некий промежуточный фенотип; вместо этого доминантный признак скрывает наличие рецессивного. Мендель тщательно планировал скрещивания и вёл записи результатов: так он обнаружил, что в каждой паре возможных признаков один всегда доминантный, а другой — рецессивный. Гладкая форма семян доминирует над морщинистой, пурпурная окраска цветков — над белой, а зелёная окраска плодов — над жёлтой.

## ❖ ИГРА

Участники наблюдают за тем, как 4 разных генетических признака передаются от родительских растений потомству, предопределяя их фенотип. Каждый из этих признаков подчиняется закономерностям доминантного и рецессивного наследования, которые сформулировал Мендель. На игровом поле и в таблице ниже приведены все фенотипы в связке с генотипами, которые к ним приводят.

	Доминантный признак	Генотип	Рецессивный признак	Генотип
Форма семян	Гладкие	$RR, Rr$	Морщинистые	$rr$
Окраска цветков	Пурпурные	$FF, Ff$	Белые	$ff$
Окраска плодов	Зелёные	$Gg, Gg$	Жёлтые	$gg$
Высота стебля	Высокий	$TT, Tt$	Низкий	$tt$

# Решётки Пеннета и распределение генотипов у потомства

## ❖ НАУКА

**Решётка Пеннета** — это научный инструмент, позволяющий рассчитать частоту появления генотипов у потомства после скрещивания двух родителей с известными генотипами. С помощью решётки можно также установить генотип родителей, подсчитав частоту появления потомства с определёнными фенотипами.

Простейшую решётку Пеннета легко построить — она демонстрирует наследование одного признака. Генотипы родителей указываются сверху и сбоку от решётки, после чего в ячейки вписываются комбинации родительских генов, которые могут передаться потомству.

Построим решётку Пеннета, чтобы определить окраску цветков у потомства от двух гетерозиготных родителей с пурпурными цветками. Такое скрещивание называется **моногибридным**, поскольку оба родителя гетерозиготны по одному и тому же гену.

Из-за того, что оба родителя гетерозиготны по окраске цветков, 50% их потомства будет гетерозиготным с пурпурными цветками, как и сами родители. Однако другая половина не будет гетерозиготной: 25% растений (четверть от общего числа) будут с доминантной гомозиготой (FF) и с пурпурными цветками, а другие 25% (ещё четверть) — с рецессивной гомозиготой (ff) и с белыми цветками. Таким образом, в потомстве соотношение особей с доминантным признаком и особей с рецессивным будет составлять 3:1.



Родитель 1  
(Ff)



Родитель 2  
(Ff)



Окраска цветков

## ИГРА

На поле изображены 4 решётки Пеннета, представляющие 4 признака гороха: форму семян, окраску цветков, окраску плодов и высоту стебля. Игрокам доступно действие, позволяющее заменить один жетон родительских генов. Это действие означает изменение генотипа родителя, что повлияет на генотипы потомства, поскольку решётка изменилась. Некоторые генотипы могут стать невозможными: например, у потомства никогда не будет гомозиготного рецессивного генотипа (ff), если хотя бы один из родителей имеет доминантную гомозиготу (FF).



Поскольку каждый результат в пределах решётки Пеннета равновероятен, бросок кубиков позволяет продемонстрировать случайное распределение генотипов у потомства, как это происходит в действительности. Для определения выпавших генотипов значения на кубиках соотносятся со значениями на решётке Пеннета. С двумя гетерозиготными родителями необходим кубик с результатом IV, чтобы получить рецессивный фенотип, тогда как доминантный фенотип более вероятен и соответствует результатам I, II и III. Чаще всего генотипы выпадают в соотношении 1:2:1, предсказанном Менделем (хотя в каждом случае это соотношение будет немного отличаться). Наблюдая за вероятностью появления генотипов на кубиках, игроки оценивают, как генетическая информация передаётся (или не передаётся) потомству.

## Анализирующее скрещивание

### НАУКА

**Анализирующее скрещивание** — это экспериментальное скрещивание особи с доминантным фенотипом, генотип которой неизвестен, и особи с рецессивным фенотипом. Такое скрещивание проводится для того, чтобы определить генотип особи с доминантным фенотипом.

Если доминантное растение гомозиготно ( $FF$ ), у всего его потомства после скрещивания будут пурпурные цветки, поскольку потомство гарантированно унаследует от доминантного растения аллель  $F$ , который «скроет» аллель  $f$ , полученный от рецессивного растения.

Если доминантное растение гетерозиготно ( $Ff$ ), его потомство может унаследовать от него аллель  $F$  либо  $f$ . От рецессивного растения можно унаследовать только аллель  $f$ , поэтому в потомстве будут особи как с белыми, так и с пурпурными цветками, поскольку их возможные генотипы —  $Ff$  и  $ff$ .

Процесс оплодотворения случаен, так что небольшое число анализирующих скрещиваний не гарантирует того, что в потомстве встретятся все возможные фенотипы. Нужно проделать множество анализирующих скрещиваний, чтобы выяснить неизвестный генотип родительского растения. К счастью, методы и технологии в генетике ушли далеко вперёд со времён Менделя. Вместо того чтобы полагаться исключительно на наблюдения за физическими свойствами, сейчас можно узнать генотип с помощью молекулярного анализа (поиска определённых последовательностей генов) или расшифровки полного генома (расшифровки ДНК организма).

### ИГРА

Участники стремятся забирать с поля кубики потомства, соответствующие генотипам, указанным на картах гороха. Это называется «подтверждением признака» и чем-то схоже с анализирующим скрещиванием, которое также подтверждает генотип по внешнему виду растения. В жизни гораздо легче определить генотип по рецессивному фенотипу (у всех особей с белыми цветками генотип  $ff$ ), в то время как отличить гомозиготное растение ( $FF$ ) от гетерозиготного ( $Ff$ ) среди особей с пурпурными цветками визуально попросту невозможно. Для упрощения игрового процесса участники могут забирать нужные им кубики без проведения дополнительных опытов.



Доминантный фенотип,  
неизвестный генотип:  
 $FF$  или  $Ff$ ?

Рецессивный  
фенотип, известный  
генотип:  $ff$

Ожидаемое потомство:

если у родителя  
с пурпурными  
цветками генотип  $FF$

или

если у родителя  
с пурпурными  
цветками генотип  $Ff$



всё потомство  
с пурпурными  
цветками



одна половина потомства  
с пурпурными цветками,  
другая — с белыми



# Полигенное наследование

## НАУКА

Организм, имея десятки тысяч генов, передаёт своему потомству по одному аллелю от каждого из них. Изучение сразу всех генов и их аллелей у организма — крайне сложная задача для традиционных методов скрещивания. Мендель, как правило, изучал признаки парами и высказал предположение, что наследование одного признака не влияет на наследование другого. Чтобы проверить это, он скрестил гомозиготное растение, имевшее гладкие семена и зелёные плоды, с другим гомозиготным растением, у которого были морщинистые семена и жёлтые плоды. По результатам предыдущих опытов Мендель уже знал, что гладкие семена и зелёные плоды — доминантные признаки. У всего первого поколения также были гладкие семена и зелёные плоды, как он и предполагал. Затем Мендель скрестил два растения из этого потомства и зафиксировал фенотипы второго поколения. Такое повторное скрещивание называется **дигибридным**, так как оба скрещиваемых организма гетерозиготны по двум генам.



Гаметы	$RG$	$Rg$	$rG$	$rg$
$RG$	$RRGG$	$RRGg$	$RrGG$	$RrGg$
$Rg$	$RRGg$	$RRgg$	$RrGg$	$Rrgg$
$rG$	$RrGG$	$RrGg$	$rrGG$	$rrGg$
$rg$	$RrGg$	$Rrgg$	$rrGg$	$rrgg$

Гладкие семена, зелёные плоды  $RrGg$

В фенотипе второго поколения наблюдалось примерное соотношение 9 (гладкие семена, зелёные плоды) : 3 (гладкие семена, жёлтые плоды) : 3 (морщинистые семена, зелёные плоды) : 1 (морщинистые семена, жёлтые плоды). Мендель заметил, что число растений с гладкими и морщинистыми семенами укладывается в соотношение 3 : 1 так же, как и число растений с зелёными и жёлтыми плодами, то есть закономерность наследования отдельных признаков не изменилась. Таким образом, наследование окраски плодов никак не влияет на наследование формы семян. Подобные соотношения наблюдались и с другими парами признаков. Это привело Менделя к открытию **закона независимого наследования**: аллели одного признака наследуются независимо от аллелей другого. Хотя Мендель исследовал только по два признака за раз, этот принцип применим к любому числу признаков.

Эти наблюдения легли в основу оформления обложки игры.

В 1910 году Томас Хант Морган открыл сцепленные гены, когда обнаружил, что некоторые признаки у дрозофил (плодовых мушек) наследуются несоразмерно, образуя исключение из закона Менделя. Сцепленные гены находятся на хромосоме так близко друг к другу, что наследуются как одно целое. Это открытие привело к построению генетических карт, позволяющих определить положение генов на хромосомах у разных биологических видов, что и заложило основы расшифровки генома. Менделю повезло, что в его исследованиях гены признаков располагались на хромосомах далеко друг от друга и наследовались независимо.

## ❖ ИГРА

В игре есть 4 ключевых признака, каждый из которых определён двумя аллелями. Для одновременного отслеживания всех 4 признаков понадобилась бы очень большая решётка Пеннета размером  $16 \times 16$ . Поскольку признаки гороха подчиняются закону Менделя и наследуются независимо, каждый из них можно отслеживать при помощи отдельной решётки Пеннета. На протяжении игры участники могут заменять пару родительских аллелей для каждого признака по отдельности. Бросок кубиков также определяет генотипы потомства для каждого отдельного признака. Чтобы упростить игровой процесс, признаки на картах гороха подтверждаются по одному за раз (что может занять несколько раундов). Это означает, что растение с одной карты гороха может «унаследовать» часть признаков от одной пары родителей, а часть — от другой.

## Неменделевские закономерности наследования

## ❖ НАУКА

Можно заметить, что у окружающих нас людей, животных и растений намного более сложное сочетание признаков, нежели морщинистый или гладкий, высокий или низкий и т. д. Это происходит из-за того, что не все признаки подчиняются открытым Менделем закономерностям наследования. Существует множество признаков, которые не контролируются строго одним геном, состоящим из полностью доминантных и полностью рецессивных аллелей.

Примером может служить окраска цветков львиного зева. Она определяется двумя аллелями и может быть красной ( $R$ ) или белой ( $r$ ). Но если растение с красными цветками ( $RR$ ) скрестить с растением с белыми цветками ( $rr$ ), всё гетерозиготное потомство ( $Rr$ ) окажется розовым, а не красным. Такой тип наследования называется **неполным доминированием**: одного доминантного аллеля недостаточно, чтобы цветки у потомства были полностью красными. Другой пример — тип шерсти у собак породы лабрадудль. Если у собаки присутствуют два аллеля, отвечающие за вьющуюся шерсть ( $K^cK^c$ ), то она будет очень кудрявой, как пудель. Собака с двумя аллелями, отвечающими за прямую шерсть ( $K^+K^+$ ), будет гладкошёрстной. При этом у собаки с кудрявой шерстью и гладкошёрстной собаки будет потомство с умеренно волнистой шерстью ( $K^+K^c$ ).

Существуют также признаки, при которых оба аллеля выражены полностью. Классический пример — группы крови А, В и 0 у человека (мы сознательно не учитываем резусы + и -). Для группы крови А аллели обозначаются как  $I^A$ , для группы В — как  $I^B$ , а для группы 0 — как  $i^0$ . Оба аллеля —  $I^A$  и  $I^B$  — доминантны по отношению к  $i^0$ . Человек с аллелями  $I^A$  и  $i^0$  обладает фенотипом А; подобным образом генотип  $I^B i^0$  приводит к фенотипу В. Однако если у человека есть аллели  $I^A$  и  $I^B$  (генотип  $I^A I^B$ ), его фенотип — АВ. Это называется **кодоминированием**. Оба аллеля доминантны, поскольку оба фенотипа (группы А и группы В) присутствуют в равной степени и не усредняются, как в случае с неполным доминированием.

Во многих случаях один фенотип контролируется более чем одним геном, яркий пример — рост человека. По оценкам одного исследования, за этот признак отвечают 700 различных генов, и не у всех из них схожие свойства. К тому же на рост также сильно влияют окружающая среда и питание.

## ❖ ИГРА

Все признаки, представленные на игровом поле, подчиняются менделевскому закону наследования с полным доминированием. В данное издание входят 2 промокарты фенотипов, иллюстрирующие *кодминирование* и *неполное доминирование*. В действительности ни то, ни другое у гороха не встречается, однако изображённые на промокартах закономерности известны для других видов растений. Например, у гетерозиготной камелии могут быть одновременно красные и белые лепестки в одном цветке (кодминирование), а у гетерозиготного львиного зева — все лепестки розовые (неполное доминирование). На промокарте фенотипа с неполным доминированием изображено гетерозиготное растение средней высоты — такая закономерность наследования встречается у множества растений, животных, а также у человека. Поскольку в таких случаях каждый генотип имеет уникальный фенотип, при игре с промокартами на поле появятся 2 дополнительные цели исследований.



## De Novo мутации



## ❖ НАУКА

Для всех вышеописанных закономерностей характерна передача потомству аллелей или последовательностей ДНК без каких-либо изменений. Однако из-за условий окружающей среды (например, ультрафиолетового излучения), химического воздействия (мутагенов) или просто ошибок копирования организмом собственной ДНК возможны случайные генетические изменения — мутации. Они могут возникать в ДНК любой клетки и обычно исправляются клеточными механизмами. Неисправленные мутации в большинстве клеток влияют только на сам организм. Однако если мутация происходит в клетке, являющейся частью репродуктивной системы (яйцеклетка, клетка спермы или пыльцы), она может передаться потомству. Иногда из-за мутации возникает новый аллель, и это называется **De Novo мутацией**.

Некоторые De Novo мутации вызывают значительные изменения свойств гена. Иногда это приводит к болезням, хотя чаще мутации не оказывают никакого влияния, а некоторые даже бывают полезны и дают потомству определённые преимущества. Частота De Novo мутаций у биологических видов варьируется. В горохе или пшенице мутации встречаются редко (примерно 5 на 1000 в гене за год), в то время как у любого из нас есть около 100 генетических мутаций, которых нет у наших родителей. В любом случае большинство этих мутаций незначительны и не влияют на общий фенотип.

Растениеводы издавна пользовались методами внедрения случайных мутаций в геном — это резко повышало частоту De Novo мутаций и позволяло получить желаемые признаки. За счёт селективного скрещивания можно было вывести необходимый фенотип, однако часто получались и нежелательные фенотипы, а процесс скрещивания был дорогим и трудоёмким. В последние десятилетия развитие генной инженерии и технологий редактирования генома позволило вводить направленные мутации и даже целые гены в ДНК организма. Это ускорило процесс создания растений с определёнными характеристиками. Теперь мутации перестали быть случайными, а вероятность получения нежелательных фенотипов значительно снизилась.

## ❖ ИГРА

Ради упрощения игрового процесса допускаются некоторые вольности относительно мутаций. Когда после броска на кубике потомства выпадает символ мутации **X**, этот кубик один раз перебрасывается. Если при повторном броске вновь выпал этот символ, то он остаётся в игре. Такая вероятность мутации (1 к 9 для кубика) несоизмеримо выше реальной. Даже используя химические мутагены, учёные стараются удерживать частоту мутаций в пределах 1%, поскольку большое число мутаций может погубить растение или затруднить его скрещивание.

В игре участники могут выбирать, какая мутация им больше подходит, в реальности же мутации случайны. Также игроки решают, как наиболее выгодно использовать кубик с мутацией: подтвердить возможный признак или признак, который с текущими родительскими генами получить было бы невозможно. На деле учёным, направленно использующим мутагены, из-за случайного характера мутаций приходится исследовать десятки тысяч растений, чтобы отыскать единственное интересующее их изменение.

Используя кубик мутации **K**, игрок может изменить сразу оба аллеля, однако в жизни мутации действуют иначе. У гороха в природе встречаются случайные мутации, но каждая из них влияет только на один аллель. В химически мутированных популяциях могут возникать мутации, влияющие на оба аллеля, но такое встречается очень редко, а если и происходит, то у каждого аллеля мутация будет разной.

## Словарь

- Аллели** Разные варианты одного и того же гена, передаваемые по наследству. Обозначаются заглавными или строчными буквами (*F* или *f*).
- Анализирующее скрещивание** Методика скрещивания, позволяющая установить неизвестный генотип растения по частоте распределения признаков у его потомства.
- Ген** Единица наследственности, передаваемая от родителя потомству.
- Генотип** Совокупность генов, определяющая внешние признаки (фенотип) организма.
- Гетерозиготность** Наличие двух разных аллелей в гене (например, *Ff*).
- Гомозиготность** Наличие двух одинаковых аллелей в гене (например, *FF* или *ff*).
- Доминантный** Аллель, наличие которого всегда физически проявляется (в фенотипе).
- De Novo мутация** Впервые возникшая мутация в организме (не унаследованная от родителей).
- Рецессивный** Аллель, наличие которого в присутствии доминантного аллеля не проявляется физически (в фенотипе), но может проявиться в будущих поколениях.
- Решётка Пеннета** Научный инструмент, демонстрирующий сочетаемость аллелей при скрещивании.
- Фенотип** Совокупность внешних признаков организма, которые определены его генетической структурой (генотипом).

### СОСТАВИТЕЛИ

Элиот Аттридж  
(доктор философии,  
дипломированный биолог,  
действительный член  
Королевского общества  
биологии)  
Алия М. Вайнштейн (доктор  
философии)  
Кейтлин Хазе (бакалавр  
естественных наук)  
Майкл И. Янг (доктор  
философии)

### КОНСУЛЬТАНТЫ

Энн Аткинс  
Келси Барком  
Тайлер Ф. Бек  
Эндрю Белл  
Макс Бернштейн  
Селия Боссо-Лефевр  
Кейт Гордон  
Кэти Игер  
Лорен Кларк  
Сюзан Козель  
Дженнифер Кэрролл  
Анна Летко  
Лорен Маркс  
Маттео Мартина  
Джейсон Мейерс  
Лиам Т. Миллард  
Кэмерон Мини  
Филлипп Мюллер  
Тара А. Пеллетье  
Памела А. Рибон  
Натали Родригес  
Холли Роулэндс  
Лааванья Санкаранараянан  
Эрин Сиверсон  
Скотт Д. Уэтерби  
Молли Чарларьелло  
Филип Чэпмен  
Мелисса Д. Шваллер  
Керрин Эллиотт