

# **Дигибридное скрещивание: наследование двух признаков одновременно**

Как наследуются два признака сразу: закономерности Менделя

# Мендель и рождение генетики

Опытами на горохе Грегор Мендель показал, что наследование признаков подчиняется строгим закономерностям. Его работа с чистыми линиями и точным подсчётом потомства заложила основу для понимания дигибридного скрещивания.



# Основные генетические термины

## Аллель

Аллель — это один из вариантов одного и того же гена. Он определяет конкретную форму признака, например жёлтую или зелёную окраску семян, и передаётся потомству через гаметы.

## Доминирование

Доминантный аллель проявляется уже в гетерозиготе, тогда как рецессивный виден только при отсутствии доминантного варианта. Это различие позволяет предсказывать внешний вид потомков по их генотипу.

## Генотип

Генотип — это совокупность всех аллелей организма. В задачах на два признака его часто записывают как  $AaBb$ , чтобы показать, какие наследственные варианты присутствуют сразу по двум генам.

## Фенотип

Фенотип — это совокупность наблюдаемых признаков организма. Он формируется на основе генотипа и проявляется в конкретных внешних характеристиках, которые можно увидеть, сравнить и подсчитать у потомства.

# Условия классического дигибридного скрещивания

1

## **Полное доминирование**

Классическая схема предполагает, что по каждому из двух генов доминантный аллель полностью подавляет рецессивный. Именно поэтому фенотипы потомства можно свести к чётким категориям без промежуточных вариантов.

2

## **Чистые родительские линии**

Для анализа берут организмы с устойчивыми генотипами, например AABV и aabb. Такое скрещивание делает исходные данные однозначными и позволяет точно проследить, как наследуются оба признака одновременно.

3

## **Единообразие F1**

Все гибриды первого поколения получают одинаковый генотип AaBb. В их фенотипе проявляются доминантные признаки обоих генов, что подтверждает единообразие потомства и подготавливает анализ второго поколения.

4

## **Независимое расхождение**

Во время мейоза хромосомы с разными генами расходятся в гаметы независимо друг от друга. Это ключевое условие, которое приводит к появлению нескольких сочетаний аллелей и характерного расщепления в потомстве.

# Почему горох стал модельным объектом в генетике



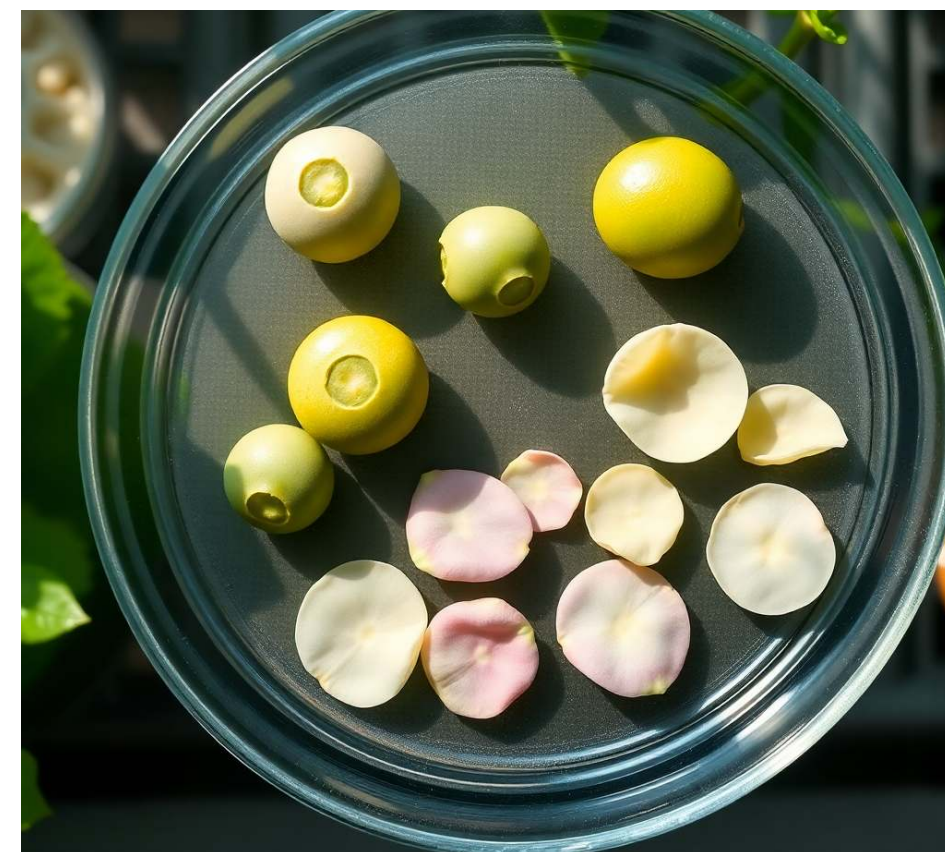
## Удобный организм для опыта

Горох легко выращивать, он быстро проходит жизненный цикл и даёт много потомков. Эти качества позволили Менделю проводить опыты в больших масштабах и получать надёжные результаты для подсчёта.



## Контроль опыления

У гороха удобно сочетать самоопыление и искусственное перекрёстное опыление. Это делает возможным точное планирование скрещиваний, в которых исследователь заранее знает родительские формы и может сравнить их потомство.



## Наглядные признаки

У растения есть множество контрастных признаков, хорошо заметных без специальной аппаратуры: форма и окраска семян, окраска цветков, высота стебля. Именно такие свойства сделали горох идеальным объектом для классической генетики.

# Первое поколение гибридов F1

1

## Скрещивание родителей

При соединении чистых линий AABV и aabb каждый потомок получает по одному аллелю от каждой пары генов. Поэтому все гибриды F1 имеют одинаковый генотип AaBb.

2

## Единый фенотип

У гибридов первого поколения проявляются оба доминантных признака. Внешнее сходство всех особей F1 подтверждает действие доминирования и делает это поколение удобной отправной точкой для дальнейшего анализа.

3

## Подготовка к расщеплению

Именно поколение F1 используется для проверки того, как сочетаются аллели при образовании гамет и что произойдет при последующем скрещивании. Так получают данные для изучения расщепления во F2.

# Образование гамет у дигетерозиготы

1

## Два гена в одной клетке

Организм с генотипом  $AaBb$  содержит по две альтернативы каждого гена. При образовании гамет в них попадает только по одному аллелю от каждой пары, поэтому возможны разные комбинации наследственного материала.

2

## Четыре варианта гамет

Из дигетерозиготы образуются гаметы  $AB$ ,  $Ab$ ,  $aB$  и  $ab$ . Каждая из них несёт уникальное сочетание аллелей, которое затем определяет возможные генотипы и фенотипы потомства.

3

## Равная вероятность

Если гены наследуются независимо, все четыре типа гамет возникают с одинаковой частотой. В классической модели каждая гамета составляет 25% от общего числа, что удобно для расчётов.

4

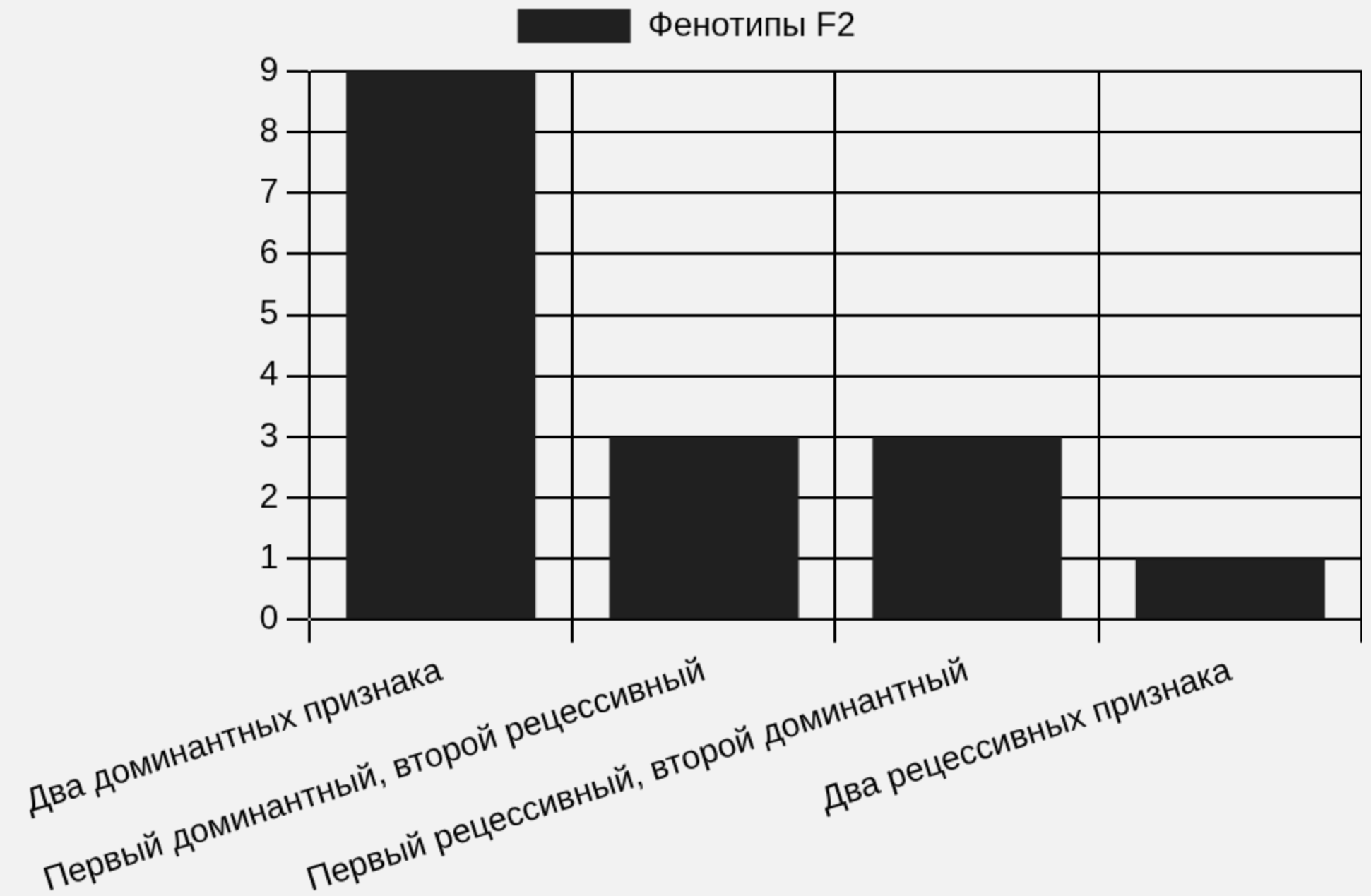
## Основа для прогноза

Набор гамет показывает, какие сочетания могут встретиться у потомков после скрещивания. Чем точнее определены типы гамет, тем проще предсказать распределение признаков в следующем поколении.

# Классическое фенотипическое расщепление 9:3:3:1

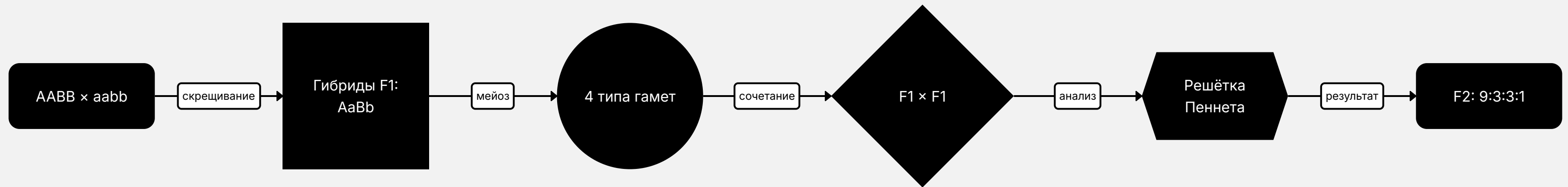
Такое соотношение возникает только при независимом наследовании и полном доминировании по обоим генам.

Соотношение 9:3:3:1 подтверждает, что четыре фенотипические группы формируются из равновероятных сочетаний гамет в F<sub>2</sub>.



# Последовательность дигибридного анализа

Схема показывает путь от родительских генотипов к прогнозу фенотипов потомства при независимом наследовании.



# Решётка Пеннета как способ подсчёта потомства

## Сетка 4×4

Для скрещивания  $AaBb \times AaBb$  строят квадрат Пеннета с шестнадцатью клетками. В каждой фиксируется одно сочетание гамет, что позволяет увидеть все возможные варианты потомства без пропусков.

## Подсчёт долей

После заполнения сетки легко подсчитать, какая часть потомков относится к каждому классу. Такой способ делает решение задач более наглядным и уменьшает риск ошибки при устном вычислении.

## Генотипы и фенотипы

Таблица помогает не только перечислить генотипы, но и сразу перевести их в фенотипические классы. Это особенно важно, когда один и тот же внешний признак может соответствовать нескольким генотипам.

## Проверка теории

Решётка Пеннета удобна для сопоставления расчётных и наблюдаемых результатов. Если данные совпадают с ожиданием, это подтверждает независимое наследование; если нет, требуется искать причину отклонений.

# Генотипическое разнообразие во втором поколении

1

## Девять генотипических классов

Во втором поколении дигибридного скрещивания появляются девять комбинаций генотипов, образованных из разных сочетаний двух пар аллелей. Это отражает независимое распределение наследственного материала в гаметы родителей.

2

## Наиболее частый вариант

Генотип AaBb встречается чаще других, потому что он может возникать при большем числе сочетаний гамет. Именно поэтому среди потомков он обычно занимает центральное место по численности.

3

## Роль гетерозиготности

Чем больше участков генотипа находится в гетерозиготном состоянии, тем выше число возможных вариантов потомства. Полная гетерозиготность по двум генам создаёт максимальное разнообразие генотипов.

4

## Связь с фенотипами

Хотя фенотипических классов всего четыре, за ними скрывается более богатая генотипическая структура. Это важно для точного анализа наследования и понимания скрытого носительства рецессивных аллелей.

# Вероятности в задачах на дигибридное скрещивание

## Правило умножения

Если два гена наследуются независимо, вероятность совместного события находят умножением вероятностей каждого признака. Поэтому расчёты можно вести по отдельным парам аллелей, не строя сразу полную таблицу.

## Доминантные фенотипы

При скрещивании гетерозигот вероятность проявления доминантного признака по каждому гену равна  $\frac{3}{4}$ . Тогда для двух доминантных признаков одновременно получается  $\frac{9}{16}$ , что соответствует классическому результату.

## Рецессивные сочетания

Вероятность появления потомков с двумя рецессивными признаками равна  $\frac{1}{16}$ . Этот же приём позволяет быстро находить доли промежуточных фенотипов, когда один признак доминантный, а другой рецессивный.

# Типы гамет при разных генотипах

Таблица показывает, как степень гетерозиготности влияет на набор гамет и разнообразие потомства.

Чем больше гетерозиготных пар аллелей, тем больше типов гамет образует организм и тем разнообразнее потомство. Полная дигетерозиготность даёт максимальный набор вариантов.

| Генотип | Гаметы         | Классы |
|---------|----------------|--------|
| AaBb    | AB, Ab, aB, ab | 4      |
| AABb    | AB, Ab         | 2      |
| Aabb    | Ab, ab         | 2      |
| aaBb    | aB, ab         | 2      |

# Закон независимого наследования и его условия

## Разные хромосомы

Закон Менделя проявляется наиболее чётко, когда гены расположены в разных парах хромосом. В мейозе такие хромосомы расходятся независимо, а вместе с ними независимо распределяются и аллели.

## Следствие для потомства

Независимое распределение аллелей увеличивает число возможных комбинаций признаков у потомков. Именно поэтому в дигибридном анализе появляется характерное расщепление и богатое фенотипическое разнообразие.

## Достаточная удалённость

Даже в одной хромосоме гены могут наследоваться почти независимо, если находятся далеко друг от друга. В этом случае кроссинговер часто разрывает их сцепление и создаёт новые сочетания.

# Ограничения классической модели дигибридного скрещивания

1

## Сцепление генов

Если гены расположены близко друг к другу в одной хромосоме, они часто наследуются совместно. Тогда привычное соотношение 9:3:3:1 нарушается, потому что гаметы не образуются в равных комбинациях.

2

## Влияние кроссинговера

Низкая частота обмена участками между хромосомами сохраняет сцепление и уменьшает число рекомбинантных сочетаний. Из-за этого наблюдаемое распределение потомков заметно отклоняется от менделевского ожидания.

3

## Неполное доминирование

Когда доминантный аллель не полностью подавляет рецессивный, у гетерозигот возникает промежуточный фенотип. В таком случае число фенотипических классов и их соотношения становятся сложнее классической схемы.

4

## Взаимодействие генов

Некоторые признаки определяются не одним геном, а их совместным действием. Эпистаз и другие формы взаимодействия меняют итоговые пропорции, поэтому результаты опыта нужно сравнивать не только с теорией, но и с реальными данными.

# Пример на признаках гороха

## Форма семян

Один из самых известных признаков — гладкость или морщинистость семян. Он удобен для анализа, потому что различия хорошо заметны и легко фиксируются при подсчёте потомства.

## Окраска семян

Второй признак — жёлтая или зелёная окраска семян. В сочетании с формой он позволяет рассмотреть сразу два наследуемых признака и получить четыре фенотипические группы.

## Четыре комбинации

В поколении F<sub>2</sub> появляются все возможные сочетания двух признаков: гладкие жёлтые, гладкие зелёные, морщинистые жёлтые и морщинистые зелёные семена. Это наглядно подтверждает независимое наследование.

## Учебная наглядность

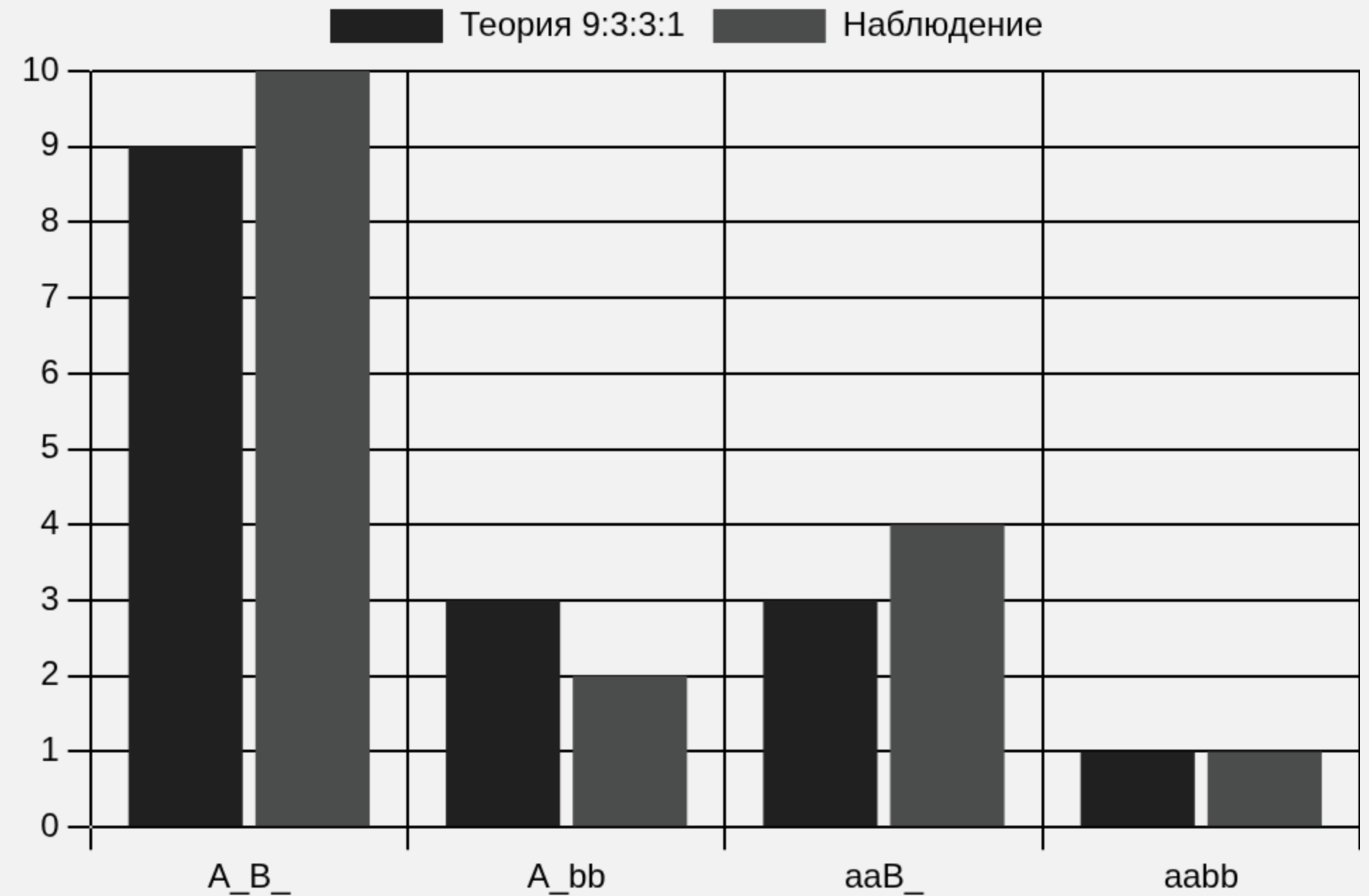
Горох особенно удобен для таких наблюдений, потому что признаки контрастны, а результаты легко сравнивать между поколениями. Поэтому именно на нём Мендель получил свои классические выводы.



# Сравнение ожидаемых и наблюдаемых результатов

На практике отклонения от идеального соотношения особенно заметны при небольшом числе потомков, когда случайные колебания сильнее влияют на итог подсчёта.

Наблюдения близки к теории, но не совпадают полностью: это нормальный эффект выборки и случайности. Для вывода нужны большие серии потомков.



# Решение типовой генетической задачи

| Класс       | Генотип | Доля |
|-------------|---------|------|
| доминантные | A_B_    | 9/16 |
| 1 дом.      | A_bb    | 3/16 |
| 2 дом.      | aaB_    | 3/16 |
| рецессивный | aabb    | 1/16 |

Для скрещивания  $AaBb \times AaBb$  приведены основные фенотипические классы потомства и их вероятности.

Вероятности фенотипов напрямую следуют из независимого наследования двух генов. Такая таблица помогает быстро переводить генотипическое расщепление в ожидаемые доли потомков.

# Практическое значение дигибридного анализа



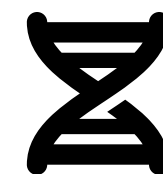
## Селекция растений

Метод помогает подбирать сочетания признаков, полезных для урожайности, качества плодов и устойчивости к неблагоприятным условиям. Это делает отбор более точным и предсказуемым.



## Практический отбор

В селекционных программах дигибридное скрещивание используют для проверки, сохраняются ли нужные сочетания в последующих поколениях. Это сокращает число бесперспективных вариантов.



## Прогноз наследования

Анализ потомства позволяет заранее оценить, какие комбинации признаков появятся у гибридов. Это особенно важно, когда селекционер работает сразу с двумя признаками.



## Животноводство и генетика

Подобные расчёты применяют и при работе с животными, чтобы учитывать наследование размера, окраски, продуктивности и других признаков. Это повышает эффективность племенного отбора.

# Итог: почему дигибридное скрещивание важно

Дигибридное скрещивание показывает, как два признака передаются вместе и почему у потомства возникает разнообразие. Классическая модель полезна, но её нужно проверять с учётом реальных генетических ограничений.