Урок 11. Взаимодействие генов

Аллельные и неаллельные взаимодействия: от работы продуктов генов до решения задач ЕГЭ.

70+ — обязательное ядро; 80+ — объяснение механизмов; 90+ — углубление и перенос знаний. Это ориентиры сложности, а не обещание экзаменационного балла.

Содержание

01. Аллели, локус и три модели проявления гетерозиготы · 70+

02. Множественный аллелизм: больше двух аллелей в популяции, но не у особи · 70+

03. Система групп крови ABO: генотип, антиген и антитело · 70+

04. Почему взаимодействуют не гены как объекты, а их продукты · 80+

05. Комплементарность: два продукта дополняют друг друга · 80+

06. Эпистаз: один локус маскирует проявление другого · 80+

07. Полимерия и количественные признаки · 80+

08. Плейотропия: одна молекулярная причина - несколько признаков · 80+

09. Летальные аллели и расщепление среди живых потомков · 80+

10. Как восстанавливать тип взаимодействия по потомству · 90+

11. Комбинированные задачи и независимые вероятности · 90+

12. Молекулярная природа доминирования: почему одного работающего аллеля иногда достаточно · 80+

13. Как выводятся отношения 12 : 3 : 1 и 15 : 1 · 90+

14. Частичная жизнеспособность, неполный отбор и нормировка потомства · 90+

15. Самопроверка: от фенотипа к механизму · 80+

16. ABO в семейной задаче: множество аллелей, кодоминирование и проверка гипотез · 80+

17. От биохимической цепи к фенотипическому расщеплению · 90+

18. Финальная проверка готовности · 90+

Уровень	Навыки после урока
70+	Различать полное и неполное доминирование, кодоминирование и множественный аллелизм; решать задачи по системе АВО.
80+	Объяснять комплементарность, эпистаз, полимерию и плейотропию через работу продуктов генов; группировать генотипы в фенотипические классы.
90+	Восстанавливать модель по потомству, учитывать летальные генотипы, объединять несколько систем наследования и проверять генетическую гипотезу.

01. Аллели, локус и три модели проявления гетерозиготы · 70+

Аллели - варианты одного гена, занимающие одинаковый локус в гомологичных хромосомах. У диплоидной особи по аутосомному локусу обычно два аллеля: один пришёл от материнского организма, другой - от отцовского. Аллели не являются двумя разными генами: это альтернативные версии одной и той же наследственной единицы.

Доминирование описывает только фенотип гетерозиготы. Оно не показывает, какой аллель чаще встречается в популяции, полезнее для организма или образует больше продукта. Поэтому выражения «сильный ген» и «слабый ген» в решении генетической задачи неверны.

- Полное доминирование: фенотип Aa совпадает с фенотипом AA; при Aa × Aa генотипы расщепляются 1AA : 2Aa : 1aa, а фенотипы - 3 : 1.
- Неполное доминирование: гетерозигота имеет промежуточный фенотип; генотипическое и фенотипическое расщепления F2 совпадают и равны 1 : 2 : 1.
- Кодоминирование: продукты обоих аллелей обнаруживаются одновременно и различимо; гетерозигота не является усреднённым вариантом двух гомозигот.

Три модели аллельного взаимодействия

Одинаковые генотипы могут по-разному соотноситься с фенотипами.

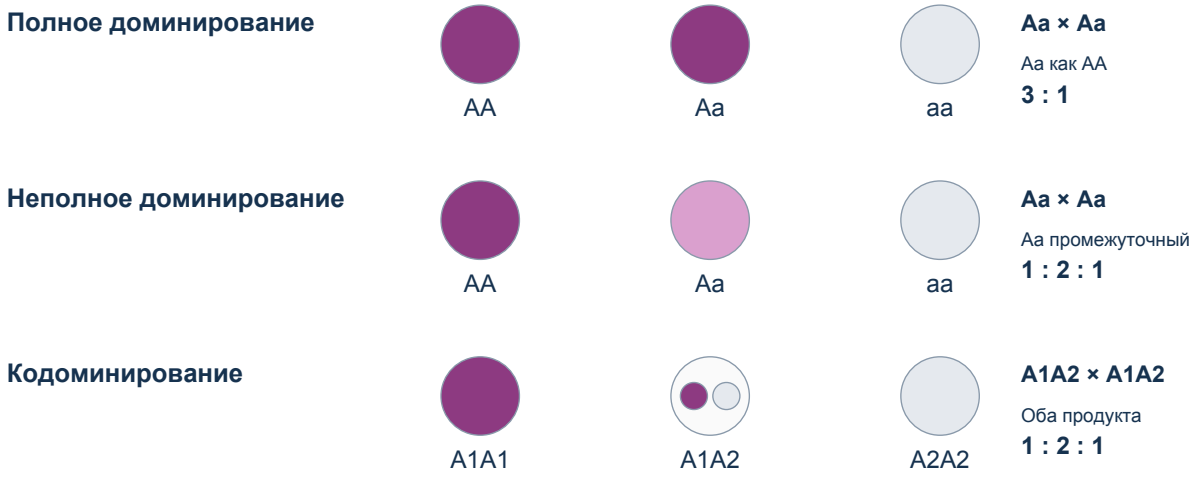


Рисунок 1. Полное доминирование, неполное доминирование и кодоминирование Оригинальная учебная схема портала.

Модель	Фенотип Aa	Фенотипы при Aa × Aa	Что доказывает модель
Полное	Как у AA	3 : 1	Aa и AA фенотипически неразличимы
Неполное	Промежуточный	1 : 2 : 1	У гетерозиготы отдельный промежуточный класс
Кодоминирование	Оба продукта	1 : 2 : 1	В гетерозиготе выявляются продукты обоих аллелей

Разобранная задача. Неполное доминирование у львиного зева

Условие. Красная окраска задаётся генотипом A_1A_1, белая - A_2A_2, розовая - A_1A_2. Розовое растение скрестили с белым. Определите генотипы и фенотипы потомков.

1. Записываем скрещивание: $A_1A_2 \times A_2A_2$.
2. Первый родитель образует гаметы A_1 и A_2 по 1/2, второй - только A_2.
3. Потомки: 1/2 A_1A_2 и 1/2 A_2A_2.
4. Переводим генотипы в фенотипы: A_1A_2 - розовые, A_2A_2 - белые.

Ответ. 1/2 розовых и 1/2 белых растений; расщепление 1 : 1.

Ловушка ЕГЭ. Отношение 1 : 2 : 1 само по себе не доказывает неполное доминирование. Нужно уточнить, описаны генотипы или фенотипы, и проверить продукты аллелей.

02. Множественный аллелизм: больше двух аллелей в популяции, но не у особи · 70+

Множественный аллелизм означает, что в генофонде популяции существует более двух аллелей одного локуса. Отдельная диплоидная особь всё равно получает только два аллеля этого локуса. Например, в системе АВО в популяции присутствуют I^A, I^B и i, но генотип одного человека содержит только два из них.

Если у локуса n аллелей, число возможных диплоидных генотипов равно n(n + 1)/2. Из них n - гомозиготы, а n(n - 1)/2 - гетерозиготы. Формула нужна не для механического запоминания: она показывает, как быстро растёт генетическое разнообразие популяции при появлении новых аллелей.

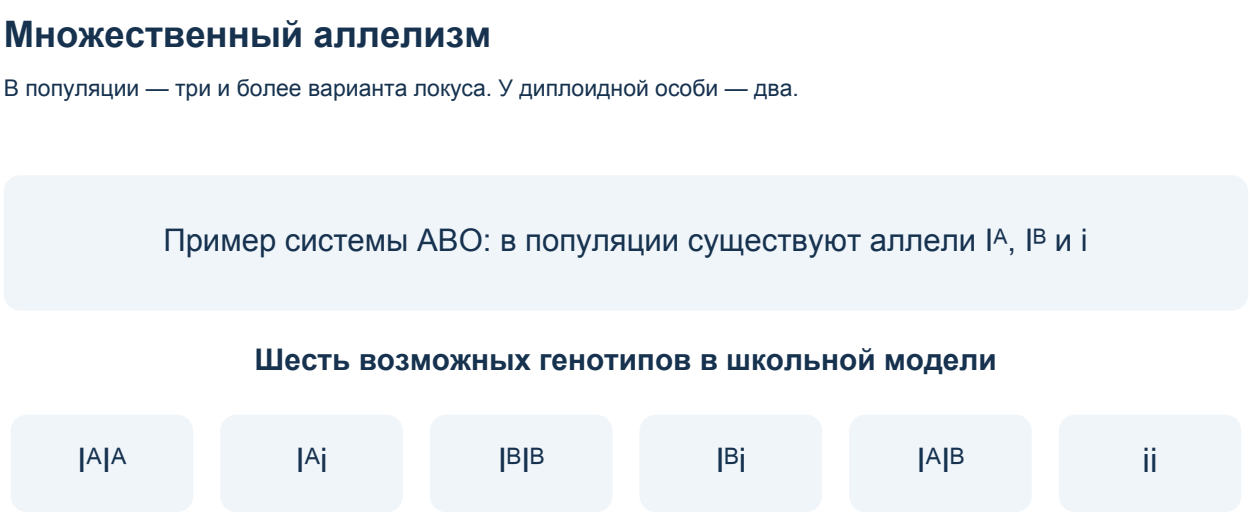


Рисунок 2. Множественный аллелизм: три аллеля АВО в популяции и шесть возможных генотипов. Оригинальная учебная схема портала.

Разобранная задача. Сколько генотипов образуют четыре аллеля

Условие. В популяции у одного аутосомного локуса существуют аллели A_1, A_2, A3 и A4. Сколько различных генотипов возможно?

1. Гомозигот четыре: A_1A_1, A_2A_2, A3A3, A4A4.
2. Гетерозигот C(4,2) = 4 × 3 / 2 = 6.
3. Всего 4 + 6 = 10 генотипов. Тот же результат даёт формула n(n + 1)/2 = 4 × 5 / 2.

Ответ. 10 генотипов.

Ловушка ЕГЭ. Нельзя записывать у одного человека три аллеля системы АВО. Три аллеля существуют в популяции; у диплоидного человека в локусе АВО две копии.

03. Система групп крови АВО: генотип, антиген и антитело · 70+

Аллели I^A и I^B кодоминантны, а i рецессивен по отношению к каждому из них. Аллели I^A и I^B задают разные варианты фермента, модифицирующего углеводные структуры на поверхности эритроцитов. Поэтому при I^AI^B на мембране одновременно присутствуют антигены A и B.

В школьной модели у людей группы A в плазме имеются анти-B, у группы B - анти-A, у группы O - анти-A и анти-B, у группы AB естественных антител против A и B нет. В генетической задаче эти сведения используют для связи молекулярного продукта, фенотипа и генотипа; клинические правила переливания в такой задаче не подменяют генетический расчёт.

Группы крови АВО

Антигены A и B — структуры поверхности эритроцитов; антитела находятся в плазме.

Группа	Генотипы	Антигены	Антитела плазмы
O (I)	ii	Нет A и B	Анти-A и анти-B
A (II)	I^AI^A или I^Ai	A	Анти-B
B (III)	I^BI^B или I^Bi	B	Анти-A
AB (IV)	I^AI^B	A и B	Нет анти-A и анти-B

I^A и I^B кодоминантны; каждый из них доминирует над i.

БИОЛОГИЯ ЕГЭ • УРОК 11 • Учебная схема «ШКОЛЫ РОССИИ»

Рисунок 3. Генотипы, антигены и антитела системы АВО Оригинальная учебная схема портала.

Группа	Генотипы	Антигены эритроцита	Антитела плазмы
A	I^AI^A, I^Ai	A	анти-B
B	I^BI^B, I^Bi	B	анти-A
AB	I^AI^B	A и B	нет анти-A и анти-B
O	ii	нет A и B	анти-A и анти-B

Разобранная задача. Четыре фенотипа в одном браке

Условие. Женщина имеет генотип I^Ai, мужчина - I^Bi. Найдите вероятности групп крови детей.

1. Гаметы женщины: I^A и i; гаметы мужчины: I^B и i.
2. Четыре равновероятных сочетания: I^AI^B, I^Ai, I^Bi, ii.
3. Соответствующие фенотипы: AB, A, B и O.

Ответ. Каждая из групп AB, A, B и O имеет вероятность 1/4.

- Родитель ii передаёт всем детям только аллель i.
- Ребёнок AB обязательно получил I^A от одного родителя и I^B от другого.
- У пары O × AB возможны дети A или B, но в обычной модели невозможны O и AB.
- Если у человека фенотип A, а один из его родителей имеет O, генотип этого человека обязательно I^Ai.

Проверка записи. Символ I пишут один раз на каждый аллель: I^AI^B, I^Ai, I^Bi. Фенотип A нельзя автоматически приравнивать к I^AI^A, потому что возможен I^Ai.

04. Почему взаимодействуют не гены как объекты, а их продукты · 80+

Аллельное взаимодействие описывает отношения вариантов одного локуса. Неаллельное взаимодействие возникает между разными локусами, когда их белки или РНК входят в один биохимический путь, регулируют одну клеточную систему либо совместно формируют количественный признак.

В развёрнутом ответе недостаточно назвать отношение 9 : 7 или 9 : 3 : 4. Нужно построить причинную цепь: генотип - продукт каждого гена - состояние пути - фенотип. Именно эта цепь объясняет, почему разные генотипы объединяются в один фенотипический класс.

Модель	Логика продуктов генов	Типичный вопрос
Комплементарность	Для результата нужны продукты разных локусов	Какие стадии пути должны работать одновременно?
Эпистаз	Один локус блокирует или перенаправляет проявление другого	Какой генотип маскирует второй локус?
Полимерия	Несколько локусов дают однонаправленный вклад	Суммируется ли число доминантных аллелей?
Плейотропия	Один продукт работает в нескольких тканях или процессах	Какая общая молекулярная причина связывает признаки?

Ключ. Неаллельное взаимодействие не нарушает расхождение аллелей в мейозе. Меняется группировка генотипов по фенотипу, а не механизм образования гамет.

05. Комплементарность: два продукта дополняют друг друга · 80+

При комплементарности продукты разных генов необходимы для формирования одного результата. В простой двухступенчатой модели фермент A превращает исходное вещество в промежуточный продукт, а фермент B - промежуточный продукт в пигмент. Окраска возникает только у A_B_, где работают обе стадии.

В скрещивании AaBb × AaBb вероятность A_ равна 3/4, вероятность B_ также 3/4. При независимом наследовании вероятность одновременного события A_B_ равна 3/4 × 3/4 = 9/16. Остальные 7/16 объединяются как неокрашенные. Отсюда фенотипическое расщепление 9 : 7.



Рисунок 4. Биохимическая модель комплементарности и образование отношения 9 : 7 Оригинальная учебная схема портала.

Разобранная задача. Комплементарность без решётки на 16 клеток

Условие. У растения пигмент образуется только при наличии доминантных аллелей двух генов A и B. Скрестили AaBb × AaBb. Найдите долю окрашенных и неокрашенных потомков.

1. Для работающего локуса A нужен генотип A_: вероятность 3/4.
2. Для работающего локуса B нужен генотип B_: вероятность 3/4.
3. События независимы: P(A_B_) = 3/4 × 3/4 = 9/16.
4. Неокрашенные составляют дополнение: 1 - 9/16 = 7/16.

Ответ. 9/16 окрашенных и 7/16 неокрашенных; отношение 9 : 7.

Комплементарность не обязана всегда давать 9 : 7. Если промежуточный продукт имеет собственный фенотип или оба гена по-разному меняют форму органа, классов может быть больше. Поэтому отношение - ориентир, а биологический механизм - доказательство.

Ловушка ЕГЭ. Фраза «два доминантных гена усиливают друг друга» слишком расплывчата. Укажите, какие продукты нужны одной системе и почему при отсутствии одного продукта путь прерывается.

06. Эпистаз: один локус маскирует проявление другого · 80+

Эпистатический ген подавляет или изменяет проявление гипостатического. Подавление обычно связано не с физическим уничтожением другого гена, а с отсутствием субстрата, блокировкой переноса вещества, изменением регулятора или прекращением более ранней стадии пути.

В модели окраски лабрадоров локус B/b определяет тип тёмного пигмента: B_ - чёрный, bb - коричневый. Локус E/e контролирует отложение пигмента в волосе. Генотип ее прекращает

отложение, поэтому B_ee и bbee дают светлый фенотип. Рецессивная гомозигота ee эпистатична локусу B/b.



Рисунок 5. Рецессивный эпистаз в модели окраски шерсти Оригинальная учебная схема портала.

Разобранная задача. Как получить отношение 9 : 3 : 4

Условие. В BbEe × BbEe генотипы B_E_ дают чёрную окраску, bbE_ - коричневую, __ee - светлую. Найдите фенотипическое расщепление.

1. Класс B_E_ имеет вероятность 3/4 × 3/4 = 9/16.
2. Класс bbE_ имеет вероятность 1/4 × 3/4 = 3/16.
3. Для светлой окраски достаточно ee независимо от B/b: вероятность ee = 1/4 = 4/16.
4. Сумма 9/16 + 3/16 + 4/16 равна единице.

Ответ. 9 чёрных : 3 коричневых : 4 светлых.

При доминантном эпистазе маскирующее действие имеет A_. Тогда типичная группировка может давать 12 : 3 : 1: двенадцать генотипических долей A___ образуют один класс, а среди aa различаются B_ и bb. Как и в других моделях, соотношение возникает из конкретной группировки генотипов.

Ловушка ЕГЭ. Запись B_E_, bbE_, __ee удобна только после определения ролей локусов. Не переносите буквы из одной модели в другую без описания фенотипов.

07. Полимерия и количественные признаки · 80+

При полимерии несколько неаллельных генов влияют на один признак в одном направлении. В кумулятивной модели важен общий вклад аллелей: чем больше аллелей, повышающих значение признака, тем сильнее его проявление. Для двух диплоидных локусов возможны пять классов по числу таких аллелей: 0, 1, 2, 3 и 4.

Если вклад каждого доминантного аллеля одинаков, в F2 от AaBb × AaBb частоты классов 0-4 соответствуют 1 : 4 : 6 : 4 : 1. Средние варианты встречаются чаще крайних, потому что получить два доминантных аллеля можно большим числом генотипических сочетаний, чем ноль или четыре.

Кумулятивная полимерия: два локуса

AaBb × AaBb; каждый доминантный аллель даёт одинаковый суммирующийся вклад.

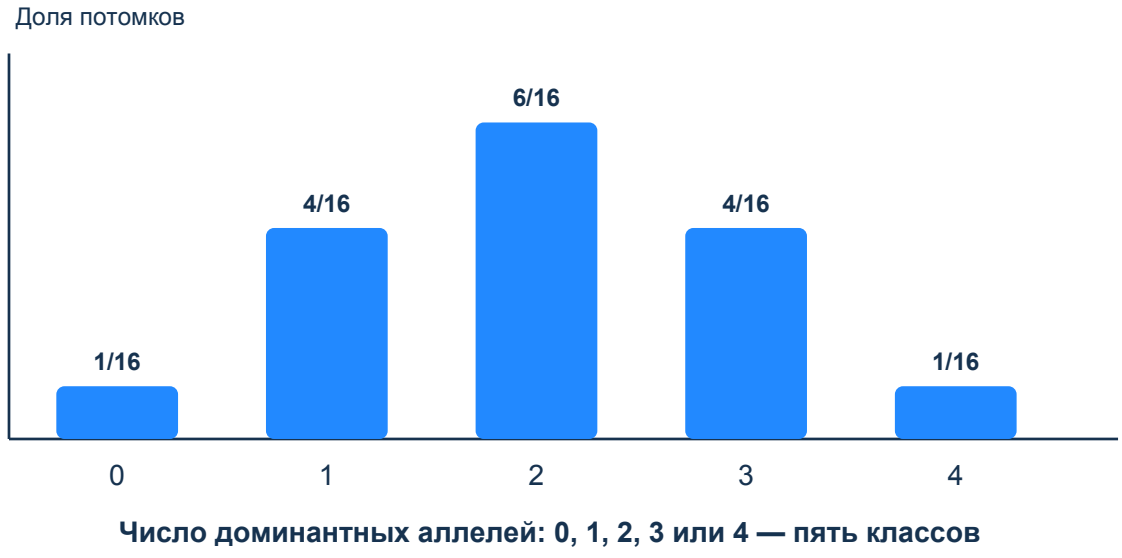


Рисунок 6. Два независимых локуса: пять классов кумулятивной полимерии в соотношении 1 : 4 : 6 : 4 : 1. Оригинальная учебная схема портала.

Разобранная задача. Число фенотипических классов при полимерии

Условие. Три пары полимерных генов дают одинаковый суммирующийся вклад. Сколько классов возможно по числу доминантных аллелей?

1. У диплоидной особи по каждому из трёх локусов две копии, всего шесть учитываемых аллелей.
2. Число доминантных аллелей может принимать значения от 0 до 6 включительно.
3. Число целых значений в этом диапазоне равно 6 + 1.

Ответ. 7 классов.

При некумулятивной полимерии несколько доминантных генов обеспечивают сходный результат, но их эффекты не суммируются. Если признак возникает при A_ или B_, отсутствует он только у aabb. В AaBb × AaBb это 1/16, поэтому расщепление равно 15 : 1.

Реальные количественные признаки обычно полигенны и чувствительны к среде. Генотип задаёт потенциальный диапазон, а питание, температура, возраст и другие факторы смещают конкретное фенотипическое значение. Поэтому дискретные генотипические классы могут образовывать почти непрерывное распределение.

Ловушка ЕГЭ. Непрерывная изменчивость не означает отсутствие наследственной основы. Большое число локусов и влияние среды сглаживают границы между классами.

08. Плейотропия: одна молекулярная причина - несколько признаков · 80+

Плейотропия - влияние одного гена на несколько фенотипических признаков. Один белок может работать в разных тканях, участвовать в общем метаболическом пути или запускать каскад вторичных изменений. Наблюдаемые признаки связаны общей причиной, а не случайным совпадением.

Например, изменение структуры бета-цепи гемоглобина меняет свойства молекулы гемоглобина. При определённых условиях молекулы агрегируют, деформируют эритроцит, ухудшают прохождение по капиллярам и доставку кислорода. Из одной молекулярной причины возникают клеточные, тканевые и организменные последствия.



Рисунок 7. Плейотропная причинная цепь от варианта гена до нескольких системных проявлений Оригинальная учебная схема портала.

- Плейотропия: один ген - несколько признаков.
- Полимерия: несколько генов - один количественный признак.
- Комплементарность: несколько генов - один результат, требующий совместной работы продуктов.

Формат развёрнутого ответа. Стройте цепь «изменение гена -> изменённый белок -> изменение клетки или процесса -> несколько фенотипических последствий». Перечень симптомов без общей причины слабее причинного объяснения.

09. Летальные аллели и расщепление среди живых потомков · 80+

Некоторые генотипы несовместимы с завершением эмбрионального развития или выживанием до момента учёта. Тогда отношение среди зигот отличается от отношения среди родившихся или взрослых особей. Генетическая задача должна явно указывать, на какой стадии посчитано потомство.

Разобранная задача. Летальная доминантная гомозигота

Условие. У мышей аллель A в гетерозиготе вызывает жёлтую окраску, AA летален, aa даёт обычную окраску. Скрестили двух жёлтых мышей. Найдите расщепление среди зигот и среди живых детёнышей.

1. Жёлтые родители имеют генотип Aa, потому что AA не выживает.
2. Среди зигот: 1/4 AA, 1/2 Aa, 1/4 aa.
3. Класс AA исключается до учёта. Остаются 1/2 Aa и 1/4 aa; общая доля живых равна 3/4.
4. Нормируем: (1/2)/(3/4) = 2/3 жёлтых; (1/4)/(3/4) = 1/3 обычных.

Ответ. Среди зигот 1AA : 2Aa : 1aa; среди живых 2Aa : 1aa.

Если погибает не весь класс, а только часть, нужно умножить исходную долю генотипа на его выживаемость, затем заново нормировать все сохранившиеся классы. Нельзя просто вычесть погибшую долю из конечного процента одного фенотипа.

Ловушка ЕГЭ. Отношение 2 : 1 не является отдельным законом наследования. Оно часто получается после исключения одного из четырёх генотипических вкладов в моногибридном скрещивании.

10. Как восстанавливать тип взаимодействия по потомству · 90+

Характерные отношения помогают предложить гипотезу, но не доказывают её автоматически. Сначала определяют число фенотипических классов, затем приводят данные к простому отношению и сравнивают с ожидаемыми долями. После этого проверяют биологический механизм, жизнеспособность классов, фазу скрещивания и достаточность выборки.

Как объединение классов меняет расщепление

Для AaBb × AaBb при независимом наследовании: A_B_ : A_bb : aaB_ : aabb = 9 : 3 : 3 : 1.

9 : 7	**A_B_ / (A_bb + aaB_ + aabb)** Нужны продукты A и B
9 : 3 : 4	**A_B_ / A_bb / (aaB_ + aabb)** aa маскирует B/b
12 : 3 : 1	**(A_B_ + A_bb) / aaB_ / aabb** A_ маскирует B/b
15 : 1	**(A_B_ + A_bb + aaB_) / aabb** Достаточен A_ или B_

Одно численное отношение не доказывает механизм: нужна связь генотипа с фенотипом.

БИОЛОГИЯ ЕГЭ • УРОК 11 • Учебная схема «ШКОЛЫ РОССИИ»

Рисунок 8. Ориентиры по расщеплениям и обязательная проверка модели Оригинальная учебная схема портала.

1. Сложите все наблюдения и оцените число фенотипических классов.
2. Проверьте простые модели: 3 : 1; 1 : 2 : 1; 9 : 7; 9 : 3 : 4; 12 : 3 : 1; 15 : 1.
3. Для дигибридного скрещивания AaBb × AaBb разложите 16 долей по генотипическим классам.
4. Объясните, какие продукты генов объединяют разные генотипы в один фенотип.
5. Проверьте, не исчез ли летальный класс и не зависит ли признак от пола или среды.

Разобранная задача. Модель по численностям потомства

Условие. В потомстве дигетерозигот получено 180 особей первого фенотипа, 62 второго и 78 третьего. Предложите наиболее вероятную модель.

1. Всего 320 особей. Одна шестнадцатая выборки равна 20.
2. Ожидание для 9 : 3 : 4: 180, 60 и 80 особей.
3. Наблюдения 180, 62 и 78 близки к этому ожиданию; малые отклонения возможны из-за случайного образования ограниченного числа потомков.
4. Отношение 9 : 3 : 4 поддерживает рецессивный эпистаз, если рецессивная гомозигота одного локуса маскирует второй.

Ответ. Наиболее вероятен рецессивный эпистаз с ожидаемым отношением 9 : 3 : 4.

При малой выборке наблюдаемые числа почти никогда не совпадают с идеальным отношением точно. Но фраза «это случайность» не должна заменять проверку: отклонения должны быть умеренными, взаимные классы - биологически осмысленными, а схема скрещивания - совместимой с предложенной моделью.

Ловушка ЕГЭ. Не называйте тип взаимодействия только по одному числовому отношению. В ответе нужны генотипические классы и механизм объединения этих классов по фенотипу.

11. Комбинированные задачи и независимые вероятности · 90+

В одной задаче разные признаки могут подчиняться разным моделям: группа крови - множественному аллелизму, окраска - комплементарности, заболевание - простому аутосомно-рецессивному наследованию. Каждый локус или блок локусов сначала решают отдельно.

Если события независимы и должны произойти одновременно, вероятности перемножают. Если подходят несколько взаимоисключающих вариантов, их вероятности складывают. Перед умножением нужно убедиться, что локусы действительно наследуются независимо и условие не содержит сцепления.

Разобранная задача. АВО и комплементарный признак

Условие. Родители I^Ai и I^Bi. Независимые локусы A/a и B/b формируют признак только при A_B_; оба родителя AaBb. Найдите вероятность ребёнка группы О с проявившимся признаком.

1. В $I^Ai \times I^Bi$ вероятность группы О (ii) равна 1/4.
2. В AaBb × AaBb вероятность A_B_ равна 9/16.
3. Системы независимы, поэтому вероятности перемножаются: 1/4 × 9/16.

Ответ. 9/64.

Для экспериментальной проверки взаимодействия используют линии с известными генотипами, одинаковые условия среды и достаточное число потомков. Независимая переменная - генотип или схема скрещивания; зависимая - измеряемый фенотип либо количество продукта; контролируемые факторы - возраст, питание, температура, освещение и способ измерения.

Экспериментальная логика. Чтобы отличить кодоминирование от неполного доминирования, исследуйте продукты аллелей. Два различимых белка или антигена у гетерозиготы поддерживают кодоминирование; промежуточное количество одного продукта может поддерживать неполное доминирование.

12. Молекулярная природа доминирования: почему одного работающего аллеля иногда достаточно · 80+

Фенотип гетерозиготы зависит от того, сколько функционального продукта образует один аллель и как клеточная система отвечает на его количество. Если одной нормальной копии гена достаточно для прохождения метаболического пути, гетерозигота фенотипически похожа на нормальную гомозиготу. Такое состояние называют достаточностью одной копии; в школьной задаче оно проявляется как полное доминирование.

При неполном доминировании количество или активность продукта одной нормальной копии не достигает уровня гомозиготы. Гетерозигота занимает промежуточное положение. Это не обязательно означает, что молекулы аллелей «смешались»: чаще меняется концентрация одного пигмента, фермента или структурного белка.

При кодоминировании продукты аллелей различимы. В I^AI^B синтезируются два варианта ферментативной активности, поэтому на поверхности эритроцита возникают оба антигена. Аналогично два варианта белка могут разделяться при электрофорезе как две полосы у гетерозиготы.

Наблюдение у гетерозиготы	Наиболее вероятная модель	Что измерить для проверки
Фенотип как у AA	полное доминирование	дозу продукта и порог функции
Промежуточное значение	неполное доминирование	количество одного продукта
Одновременно два продукта	кодоминирование	варианты белка, антигена или РНК

Разобранная задача. Фенотип промежуточный, а белков два

Условие. У гетерозиготы внешний количественный признак имеет промежуточное значение, но молекулярный анализ обнаруживает оба варианта белка. Как описать результаты?

1. Отдельно описываем уровень продукта: оба белковых варианта проявляются, что соответствует кодоминированию продуктов.
2. Отдельно описываем интегральный фенотип: его промежуточное значение может возникать из суммарной активности белков.
3. Один термин не обязан одинаково описывать все уровни организации; нужно указать, что именно измерено.

Ответ. На молекулярном уровне продукты кодоминируют; промежуточный внешний фенотип является отдельным результатом их совместного действия.

Обратите внимание. Доминирование - отношение аллелей относительно конкретного признака. Один и тот же генотип может выглядеть как полное доминирование по одному показателю и как кодоминирование по различимым продуктам.

13. Как выводятся отношения 12 : 3 : 1 и 15 : 1 · 90+

При AaBb × AaBb базовые вероятности генотипических классов не меняются: A_B_ = 9/16, A_bb = 3/16, aaB_ = 3/16, aabb = 1/16. Разные типы взаимодействия отличаются тем, какие из этих четырёх классов имеют одинаковый фенотип.

При доминантном эпистазе A_ маскирует локус B/b. Тогда A_B_ и A_bb объединяются: 9/16 + 3/16 = 12/16. Среди aa локус B проявляется, поэтому остаются aaB_ = 3/16 и aabb = 1/16. Получается 12 : 3 : 1.

Разобранная задача. Доминантный эпистаз без полной решётки

Условие. Генотип A_ даёт белую окраску независимо от B/b; при aa локус B определяет жёлтую окраску B_ и зелёную bb. Найдите расщепление AaBb × AaBb.

1. Белые: все A___ = 3/4 = 12/16.
2. Жёлтые: aaB_ = 1/4 × 3/4 = 3/16.
3. Зелёные: aabb = 1/4 × 1/4 = 1/16.

Ответ. 12 белых : 3 жёлтых : 1 зелёный.

При некумулятивной полимерии наличие хотя бы одного доминантного аллеля A или B создаёт один фенотип. Поэтому классы A_B_, A_bb и aaB_ объединяются: 9 + 3 + 3 = 15 частей. Только aabb не имеет признака - одна часть.

Разобранная задача. Вероятность отсутствия признака в модели 15 : 1

Условие. Признак формируется при A_ или B_. Скрестили AaBb × AaBb. Какова вероятность отсутствия признака?

1. Признак отсутствует только при одновременном aa и bb.
2. P(aa) = 1/4, P(bb) = 1/4.
3. Локусы независимы: P(aabb) = 1/4 × 1/4 = 1/16.

Ответ. 1/16 без признака и 15/16 с признаком.

Отношение	Объединение классов из 9 : 3 : 3 : 1	Возможная модель
9 : 7	9 / (3 + 3 + 1)	комплементарность
9 : 3 : 4	9 / 3 / (3 + 1)	рецессивный эпистаз
12 : 3 : 1	(9 + 3) / 3 / 1	доминантный эпистаз
15 : 1	(9 + 3 + 3) / 1	некумулятивная полимерия

Главная идея. Характерные отношения не нужно заучивать изолированно: они выводятся объединением четырёх классов 9 : 3 : 3 : 1 по общему фенотипу.

14. Частичная жизнеспособность, неполный отбор и нормировка потомства · 90+

Летальный генотип - крайний случай различной жизнеспособности. В задачах может погибать только часть одного класса. Тогда исходные менделевские доли сначала умножают на вероятность выживания, после чего делят на сумму всех выживших. Этот алгоритм совпадает с пересчётом отбора в популяционной генетике.

Разобранная задача. Погибает половина AA

Условие. В скрещивании Aa × Aa половина зигот AA погибает, а Aa и aa выживают полностью. Найдите доли генотипов среди родившихся.

1. До отбора: AA = 1/4, Aa = 1/2, aa = 1/4.
2. После учёта выживания: AA остаётся 1/4 × 1/2 = 1/8; Aa = 1/2; aa = 1/4.
3. Общая доля родившихся: 1/8 + 1/2 + 1/4 = 7/8.
4. Нормируем: AA = (1/8)/(7/8) = 1/7; Aa = (1/2)/(7/8) = 4/7; aa = (1/4)/(7/8) = 2/7.

Ответ. AA : Aa : aa = 1 : 4 : 2, то есть 1/7, 4/7 и 2/7.

Если классы различаются по выживаемости после оплодотворения, частоты среди родившихся нельзя использовать для прямого восстановления частот гамет без учёта отбора. Редкий класс может быть редким не потому, что соответствующая гамета возникала редко, а потому, что потомки хуже выживали.

В эксперименте полезно считать потомство на нескольких стадиях: семена или зиготы, эмбрионы, родившиеся особи и взрослые. Снижение числа конкретного генотипа между стадиями локализует момент отбора и помогает отличить нарушение оплодотворения от эмбриональной летальности.

Ловушка ЕГЭ. После частичной гибели знаменатель меняется для всех классов. Нельзя оставить доли жизнеспособных генотипов прежними и уменьшить только погибающий класс.

15. Самопроверка: от фенотипа к механизму · 80+

При разборе новой задачи сначала выделите фенотипические классы, затем отметьте обязательные генотипы и только после этого предложите молекулярный механизм. Такой порядок предотвращает угадывание по знакомому отношению.

1. Сколько локусов необходимо по условию и сколько типов гамет образуют родители?
2. Какие генотипы дают разные фенотипы при отсутствии взаимодействия?
3. Какие классы в наблюдении объединены и какой общий продукт или блокировка их связывает?
4. При полной жизнеспособности сумма вероятностей равна 1? Если используете равновероятные доли при Aa × Aa или AaBb × AaBb, их числители в сумме дают соответственно 4 или 16?
5. Есть ли указание на гибель, пол, неполную пенетрантность или влияние среды?
6. Какое скрещивание, молекулярное измерение или контроль различит две оставшиеся гипотезы?

Для формата части 2 ответ оформляют причинно: называют тип взаимодействия, записывают схему скрещивания и гаметы, перечисляют генотипические классы, связывают их с продуктами генов и только затем указывают численное отношение.

Критерий готовности. Вы умеете выводить отношение из генотипов. Одного запоминания отношений 9 : 7 и 9 : 3 : 4 недостаточно.

16. АВО в семейной задаче: множество аллелей, кодоминирование и проверка гипотез · 80+

Фенотип группы крови не всегда однозначно задаёт генотип. Группа A соответствует I^AI^A или I^Ai, группа B — I^BI^B или I^Bi, группа AB — только I^AI^B, группа O — только ii. Поэтому семейную задачу решают не по названиям групп, а перечислением гамет каждого допустимого генотипа.

Разобранная задача. Какие группы возможны у детей A × B

Условие. Один родитель имеет группу A, другой — группу B. В семье уже родился ребёнок с группой O. Какие генотипы родителей установлены и какие группы возможны у следующего ребёнка?

1. Ребёнок O имеет ii и получил аллель i от каждого родителя.
2. Следовательно, родитель A имеет I^Ai, а родитель B — I^Bi.
3. Гаметы: I^A или i и I^B или i.
4. Потомки: I^AI^B — AB, I^Ai — A, I^Bi — B, ii — O; каждый вариант по 1/4.

Ответ. Родители I^Ai и I^Bi; возможны A, B, AB и O по 25% в стандартной модели.

Разобранная задача. Почему AB × O не даёт O

Условие. Родитель I^AI^B и родитель ii. Перечислите потомство и объясните отсутствие групп AB и O.

1. Родитель AB образует гаметы I^A и I^B, но не i.
2. Родитель O образует только гаметы i.
3. Потомки I^Ai имеют группу A, I^Bi — группу B.

4. Для ii ребёнку нужны два i, а для I^AI^B — одновременно I^A и I^B; ни одно условие в данном скрещивании невыполнимо.

Ответ. Ожидаются только группы A и B в отношении 1 : 1.

По системе ABO иногда можно исключить конкретную комбинацию родителей и ребёнка, но нельзя надёжно устанавливать родство: один фенотип разделяют многие люди и часто несколько генотипов. Для идентификации используют множество полиморфных маркеров, а ABO служит лишь ограниченным генетическим признаком.

Фенотип родителя	Возможные генотипы	Какие аллели точно отсутствуют в гаметах
O	ii	I^A и I^B
AB	I^AI^B	i
A	I^AI^A или I^Ai	I^B
B	I^BI^B или I^Bi	I^A

Ловушка ЕГЭ. Наличие аллеля i у человека с группой A или B — гипотеза, пока её не подтверждает потомство или генотипирование. Не записывайте гетерозиготу автоматически.

17. От биохимической цепи к фенотипическому расщеплению · 90+

Удобный способ не заучивать модифицированные отношения — нарисовать минимальную цепь превращений. Каждый доминантный аллель обозначает работающий продукт, рецессивная гомозигота — отсутствие функции. Затем для каждого из девяти генотипических классов дигибридного скрещивания определяют, где остановится путь и какой фенотип получится.

Разобранная задача. Последовательный путь с двумя окрашенными продуктами

Условие. Ген A превращает бесцветный предшественник в жёлтый продукт, ген B — жёлтый продукт в красный. Аллели a и b не дают активного фермента. Скрещены AaBb × AaBb. Найдите фенотипы и отношение F2.

1. A_B_ имеет оба фермента: путь доходит до красного продукта — 9/16.
2. A_bb имеет только первый фермент: накапливается жёлтый продукт — 3/16.
3. aaB_ и aabb не выполняют первый шаг, поэтому остаются бесцветными: 3/16 + 1/16 = 4/16.
4. Итоговое отношение красные : жёлтые : бесцветные = 9 : 3 : 4.

Ответ. 9 красных : 3 жёлтых : 4 бесцветных; модель соответствует рецессивному эпистазу первого звена.

Та же численная пропорция может возникать у разных конкретных молекул, поэтому термин подтверждают не одним числом, а объединением генотипических классов. Если aa маскирует действие B/b, оба класса aaB_ и aabb должны иметь общий фенотип и общую причинную остановку пути.

Разобранная задача. Как отличить 9 : 7 от 9 : 3 : 4 по механизму

Условие. Для синтеза пигмента нужны два белка A и B. В первой модели отсутствие любого белка даёт белый цвет. Во второй A создаёт промежуточный цвет, который B изменяет в конечный. Какие отношения ожидаются в F2?

1. В первой модели окрашены только A_B_; остальные семь шестнадцатых объединяются: 9 : 7 — комплементарность.
2. Во второй модели A_B_ даёт конечный цвет, A_bb — промежуточный, а aa__ — белый: 9 : 3 : 4.
3. Различие определяется судьбой класса A_bb и функцией первого продукта.

Ответ. Первая модель даёт 9 : 7, вторая — 9 : 3 : 4.

Механизм	Какие классы объединяются	Типичное F2
оба продукта обязательны	A_bb + aaB_ + aabb	9 : 7
aa блокирует путь раньше B	aaB_ + aabb	9 : 3 : 4
A_ маскирует локус B	A_B_ + A_bb	12 : 3 : 1
любой доминантный продукт достаточен	A_B_ + A_bb + aaB_	15 : 1

Критерий 90+. Сначала укажите функцию каждого продукта и фенотип четырёх классов A_B_, A_bb, aaB_, aabb; численное отношение станет следствием, а не догадкой.

Дополнительный углублённый разбор

Как распознавать взаимодействие генов по механизму

Начинайте с вопроса, сколько локусов влияет на признак и что делают их продукты. При комплементарности два разных продукта нужны для одного конечного результата. При эпистазе продукт одного гена блокирует или перенаправляет проявление другого. При полимерии несколько локусов вносят однонаправленный вклад в количественный признак. Плейотропия — обратная логика: один ген влияет на несколько признаков через общий белок или клеточный процесс.

Числовое расщепление служит подсказкой, но не заменяет механизма. Одинаковое отношение может возникнуть при разных биологических моделях, если фенотипические классы объединены по-разному. Поэтому в ответе сначала объясняют путь «ген → продукт → процесс → фенотип», затем связывают его с объединением генотипических классов.

В системе ABO кодоминирование относится к аллелям I^A и I^B одного локуса, а множественный аллелизм — к существованию в популяции более двух вариантов этого локуса. У отдельного диплоидного человека при этом остаются только два аллеля. Не смешивайте эти два уровня описания.

Для количественных признаков различайте число генов и влияние среды. Полигенная основа создаёт множество генотипических сочетаний, а среда расширяет распределение фенотипов. Непрерывная вариационная кривая сама по себе не доказывает исключительно средовую природу признака.

18. Финальная проверка готовности · 90+

- По фенотипу гетерозиготы различаю полное доминирование, неполное доминирование и кодоминирование.
- Для системы АВО записываю все возможные генотипы родителей и детей, не смешивая фенотип и генотип.
- Для комплементарности и эпистаза объясняю биохимическую роль каждого локуса.
- При полимерии различаю суммирование аллельных вкладов и модель 15 : 1.
- При отношении 2 : 1 сначала проверяю летальность одного генотипа и стадию учёта потомства.
- В комбинированной задаче разделяю локусы, считаю частные вероятности и только затем объединяю их.

Главный вывод. Расщепление - это следствие группировки генотипов по биологическому механизму. Сильный ответ связывает генотип, продукт гена, фенотип и наблюдаемое отношение.

Закрепите материал: тест к уроку 11.