

# ОБНОВЛЁННЫЙ ЕГЭ

Задания линии 27

Решение задач на закон

Харди-Вайнберга

Коновалова Оксана Семеновна –  
учитель биологии высшей категории  
ГБОУ школа № 579 Санкт-Петербурга,  
эксперт ЕГЭ по биологии

# Общие особенности ЕГЭ – Биология - 2024:

1. Разрешается непрограммируемый **калькулятор**.
2. Исключено задание 20 (последовательность процессов), т.о. уменьшилось число заданий с 29 до 28.
3. Максимальный первичный балл изменен на 57.
4. Время осталось прежним - 3 часа 55 минут
5. Во второй части изменен порядок выставления баллов - все задания второй части с 22 по 28 оцениваются максимально в 3 балла

## Усложнения:

1. Добавление в линию заданий № 27 сюжета «Решение задач на применение закона **Харди-Вайнберга**» (популяционная генетика)
2. Значительно расширился и углубился кодификатор в части «Проверяемый элемент содержания» (*Курсивом* – в ЕГЭ 2024 проверяться не будет, но, видимо, с 2025 и далее – ПЛАНИРУЕТСЯ!)

# Закон Харди-Вайнберга

«В идеальной популяции концентрация аллелей и частота генотипов из поколения в поколение остается неизменной».



Годффри Харди  
(1877-1947)



Вильгельм Вайнберг  
(1862-1937)

Аллель	Частота	P:	AA x aa
A	p	F1:	Aa
a	q	F2:	1 AA
			2 Aa
			1 aa
$p + q = 1$		Генотип	Частота
		AA	$p^2$
		aa	$q^2$
		Aa	$2pq$

Если частота аллеля **A** равна  $p$ , а частота аллеля **a** —  $q$ , то частота генотипа **AA** —  $p^2$ , генотипа **aa** —  $q^2$ , генотипа **Aa** —  $2pq$ .

# Идеальная популяция по Харди-Вайнбергу

1. Бесконечно большая
2. Со свободным скрещиванием
3. Нет мутаций и миграций
4. Все генотипы обладают одинаковой приспособленностью

## Системы скрещивания

### ПАНИКСИЯ

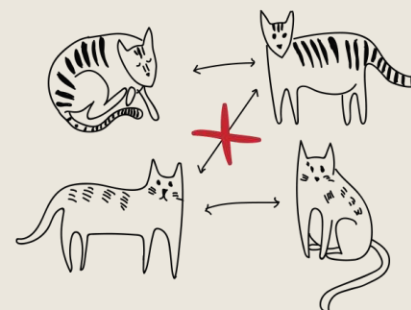
случайное скрещивание



Вероятность скрещивания не зависит от фенотипа

### ГОМОГАМИЯ

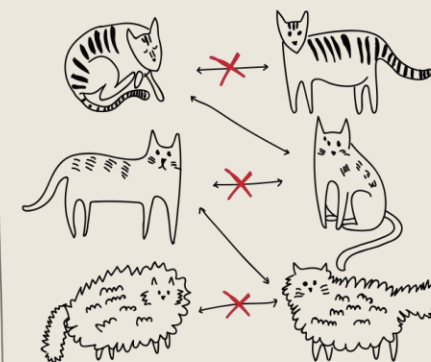
положительное ассортативное скрещивание



Вероятность скрещивания разных особей меньше, чем вероятность скрещивания одинаковых

### ГЕТЕРОГАМИЯ

отрицательное ассортативное скрещивание



Вероятность скрещивания одинаковых особей меньше, чем вероятность скрещивания разных

# Математическое выражение закона Х-В:

$$p^2 + 2pq + q^2 = 1 (100\%) \quad \text{и} \quad p + q = 1$$

## Следствия:

- 1. Частоты аллелей не меняются из поколения в поколение без внешнего воздействия на них.
- 2. Зная частоты аллелей и предполагая их случайное скрещивание, можно предсказать равновесные частоты (**f**) генотипов.
- 3. Если на гены не действуют факторы эволюции и при этом частоты генотипов не находятся в состоянии равновесия, определяемым уравнением Х-В, то популяция достигнет равновесия ЗА ОДНО ПОКОЛЕНИЕ.

# Типы задач:

- 1. Дано количество особей в виде числа
- 2. Дано количество особей или генотипов в %
- 3. Дано соотношение особей/указана частота
- 4. Дана пенетрантность
- 5. Неизвестно, является ли популяция равновесной, это требуется проверить.

# Тип 1. Дано количество особей в виде числа

**Задача 1:** В выборке, состоящей из 84 000 растений ржи, 210 растений оказались альбиносами, т.к. у них рецессивные гены находятся в гомозиготном состоянии. Определите частоты аллелей  $A$  и  $a$ , а также частоту гетерозиготных растений. Известно, что популяция находится в равновесии Харди-Вайнберга.

## Решение:

1. Альбиносы – особи с генотипом  $aa$  – рецессивные гомозиготы.
2. Согласно закону Харди-Вайнберга:  $p^2 + 2pq + q^2 = 1$ , где  $q^2$  - частота рецессивных гомозигот,  $q^2 = 210 : 8400 = 0,0025$
3. Частота рецессивного гена  $a$  –  $q = \sqrt{0,0025} = 0,05$
4. Частота доминантного гена  $A$  –  $p = 1 - 0,05 = 0,95$
5. Частота гетерозиготных растений  $Aa$  по закону Харди-Вайнберга –  $2pq$ .  
 $2pq = 2 * 0,05 * 0,95 = 0,095$

Ответ: частота аллели  $a$  – 0,05 (5%), частота аллели  $A$  – 0,95 (95%), частота гетерозигот  $Aa$  – 0,095 (9,5%)

## Тип 2. Дано количество особей/генотипов в процентах

**Задача 2.** При сортоиспытании устойчивого к ржавчине овса было обнаружено, что 4% растений поражаются ржавчиной (рецессивный признак). Рассчитайте частоты аллелей устойчивости к ржавчине и поражаемости ржавчиной, а также частоты всех возможных генотипов, если известно, что популяция находится в равновесии Харди-Вайнберга. Ответ поясните.

### Решение:

1. Поражаются ржавчиной особи с генотипом **bb** – рецессивные гомозиготы.
2. Согласно закону Харди-Вайнберга:  $p^2 + 2pq + q^2 = 1$ , где  $q^2$  - частота рецессивных гомозигот,  $q^2 = 0,04$  (4%)
3. Частота рецессивного гена **b** –  $q = \sqrt{0,04} = 0,2$  (20 %)
4. Частота доминантного гена **B** –  $p = 1 - 0,2 = 0,8$  (80 %)
5. Частота доминантных гомозигот **BB** –  $p^2 = 0,8 * 0,8 = 0,64$  (64%)
6. Частота гетерозиготных растений **Bb** по закону Харди-Вайнберга –  $2pq = 2 * 0,2 * 0,8 = 0,32$  (32%)

**Проверка:**  $BB + Bb + bb = 64 + 32 + 4 = 100\%$

**Ответ:** частота аллели **b** – 20 %, частота аллели **B** – 80 %, частота гетерозигот **Bb** – 32 %, частота доминантных гомозигот **BB** – 64 %.

## Тип 3. Дано соотношение особей/указана частота

**Задача 4.** Врождённый нефротический синдром — рецессивное моногенное заболевание, возникающее в результате нарушения формирования почечного фильтра в нефронах. В финской популяции заболевание встречается в среднем 1 раз на 820 рождений. Известно, что частота мутантного аллеля в целом по человеческой популяции составляет 0,01. Рассчитайте равновесные частоты нормального и мутантного фенотипа в человеческой популяции, а также частоту мутантного аллеля в финской популяции. Поясните ход решения. При расчёте округляйте значения до четвёртого знака после запятой.

### Решение.

1. Равновесная частота мутантного фенотипа **aa** составляет  $q^2 = 0,01^2 = 0,0001$
2. Нормальный фенотип представлен доминантными гомозиготами **AA** и гетерозиготами **Aa**.
3. Равновесная частота нормального фенотипа составляет **1- p<sup>2</sup> = 1 - 0,0001=0,9999**  
**ИЛИ**  $p^2 + 2pq = 0,99^2 + 2 * 0,99 * 0,01 = 0,999$
4. Частота мутантного фенотипа **aa** в финской популяции составляет  $q^2 \frac{1}{820} = 0,0012$
5. Частота мутантного аллеля **a** в финской популяции  $q = \sqrt{0,0012} = 0,0346$

# Тип 4. Дана пенетрантность

**Пенетрантность - это количественный показатель фенотипической изменчивости проявления гена.**

Пенетрантность измеряется в процентном отношении числа особей, у которых данный ген проявился в фенотипе к общему числу особей, в генотипе которых этот ген присутствует в необходимом для его проявления состоянии (гомозиготном — в случае рецессивных генов или гетерозиготном — в случае доминантных генов).

Проявление гена у 100% особей с соответствующим генотипом называется полной пенетрантностью, а в остальных случаях — неполной пенетрантностью.

$P = (ПВ/ТВ) \times 100\%$ , где П – пенетрантность, ПВ – практическая вероятность, ТВ – теоретическая вероятность.

## Задача 4.

Врожденный вывих бедра наследуется доминантно. Средняя пенетрантность составляет 25%. Заболевание встречается с частотой 6:10000.

Определите число гомозиготных особей в популяции по рецессивному признаку.

## Тип 4. Дана пенетрантность

### Задача 4.

Врожденный вывих бедра наследуется доминантно. Средняя пенетрантность составляет 25%. Заболевание встречается с частотой 6:10000.

Определите число гомозиготных особей в популяции по рецессивному признаку.

### Решение.

1. За изучаемый признак отвечает доминантный аллель **V**. Значит организмы, имеющие данное заболевание имеют генотипы **VV** и **Vb**.
2. Известно, что фенотипически вывих бедра выявляется у 6 организмов из всей популяции (10000 обследованных), но это лишь одна четвертая часть из всех людей, реально имеющих генотипы **VV** и **Vb** (так как сказано, что пенетрантность составляет 25%).
3. Значит на самом деле людей с генотипами **VV** и **Vb** в 4 раза больше, то есть  $6 \cdot 4 = 24$  из 10000 или 0,0024 часть.
4. Тогда людей с генотипом **bb**:  $1 - 0,0024 = 0,9976$  часть или 9976 человек из 10000.

## Тип 5. Нужно проверить является ли популяция равновесной.

### Особенности решения:

1. Нельзя сразу использовать формулу закона Х-В, т.к. неизвестно , что популяция равновесна.
2. Рассчитать частоты генотипов БЕЗ применения формул.
3. Найти частоты с применением формул.
4. Сравнить совпадают ли фактические частоты с равновесными (по формулам);
5. Сделать вывод: находится ИЛИ не находится популяция в состоянии равновесия

**Задача 7.** Из 14345 лисиц в популяции 12 имеют чёрную окраску, 678 – промежуточную, 13655 – рыжую. Определите частоту аллелей черной и рыжей окраски, генетическую структуру популяции. Соответствуют ли частоты генотипов ожидаемым из уравнения Харди-Вайнберга? Полученные данные округлите до третьего знака после запятой.

## Тип 5. Нужно проверить является ли популяция равновесной.

**Задача 7.** Из 14345 лисиц в популяции 12 имеют чёрную окраску, 678 – промежуточную, 13655 – рыжую. Определите частоту аллелей черной и рыжей окраски, генетическую структуру популяции. Соответствуют ли частоты генотипов ожидаемым из уравнения Харди-Вайнберга? Полученные данные округлите до третьего знака после запятой.

### Решение:

1. Частота лисиц с чёрной окраской (генотип **aa**) –  $12/14345 = 0,001$
2. Частота лисиц с промежуточной окраской (**Aa**) –  $678/14345 = 0,047$
3. Частота особей с рыжей окраской (**AA**) –  $13655/14345 = 0,952$
4. Аллель **A** есть в генотипах лис с рыжей и промежуточной окраски: в генотипе **AA** – 2 раза, в генотипе **Aa** – 1 раз, аллель **a** – в генотипе **aa** 2 раза и в **Aa** 1 раз
5. Частота аллеля **A** =  $p = (2 \cdot 13655 + 678) / (2 \cdot 14345^1) = 0,976$  (<sup>1</sup> общее количество аллелей в два раза больше числа особей, т.к. особи диплоидны)
6. Частота аллеля **a** =  $q = (2 \cdot 12 + 678) / (2 \cdot 14345) = 0,024$
7. Равновесные частоты генотипов:  $f(AA) = p^2 = 0,976^2 = 0,952$  ;  
 $f(Aa) = 2pq = 2 \cdot 0,976 \cdot 0,024 = 0,047$ ;  $f(aa) = q^2 = 0,024 \cdot 0,024 = 0,001$
8. Равновесные частоты генотипов, рассчитанные по формуле Х-В, совпадают с фактическими, следовательно популяция находится в состоянии генетического равновесия.

## Тип 5. Нужно проверить является ли популяция равновесной.

**Задача 8.** За время кругосветного плавания на корабле расплодились крысы, образовав популяцию следующего состава: 140 животных с нормальной длиной хвоста (доминантный признак), 105 с укороченным хвостом и 5 без хвоста. Рассчитайте частоты всех генотипов в данной популяции и частоты аллелей нормальной длины хвоста и бесхвостости. Определите, находится ли данная популяция в равновесии Харди-Вайнберга. Если нет, то через сколько поколений популяция достигнет равновесия?

### Решение.

1. Частота генотипа **AA** (с нормальной длиной хвоста):  $140/(140 + 105 + 5) = 140/250 = 0,56$ ;
2. Частота генотипа **Aa** (с укороченным хвостом):  $105/(140 + 105 + 5) = 105/250 = 0,42$ ;
3. Частота генотипа **aa** (крысы без хвоста) составляет:  $5/(140 + 105 + 5) = 5/250 = 0,02$ ;
4. Аллель **A** в популяции будет передаваться во всех гаметах крыс с нормальным хвостом и в половине гамет короткохвостых крыс, аллель **a** - во всех гаметах бесхвостых крыс и в половине гамет короткохвостых крыс. Используем закон Х-В:  $p^2 + 2pq + q^2 = 1$ , где **A** - **p**, **a** - **q**
5. Частота аллеля нормальной длины хвоста **A** :  $p = 0,56 + 0,42/2 = 0,77$ ;
6. Частота аллеля бесхвостости **a** =  $q = 0,02 + 0,42/2 = 0,23$ ;
7. Равновесные частоты генотипов:  $f(AA) = p^2 = 0,77^2 = 0,5929$ ,  $f(aa) = q^2 = 0,23^2 = 0,0529$ ,  $f(Aa) = 2pq = 2 * 0,77 * 0,23 = 0,3542$ ;
8. Популяция **не находится в равновесии** Харди-Вайнберга, так как фактические частоты генотипов не соответствуют равновесным.
9. Популяция достигнет генетического равновесия **через одно поколение**

## Тип 6. Нужно проверить является ли популяция равновесной.

**Задача 9.** Алкаптонурия - метаболическое моногенное, аутосомно-рецессивное заболевание, которое возникает из-за нарушения обмена тирозина в организме человека. Известно, что частота заболевания в большинстве человеческих популяций составляет 1: 250 000. Однако среди коренных жителей Доминиканской Республики заболевание встречается с частотой 1 : 19 000. Рассчитайте равновесные частоты нормального и мутантного фенотипа в человеческой популяции. Поясните ход решения. Покажите, что популяция не находится в равновесии Харди-Вайнберга. За счёт действия какого эволюционного фактора наблюдается отклонение от равновесия?

### Решение.

1. Мутантный фенотип представлен рецессивными гомозиготами **aa**. Нормальный фенотип представлен доминантными гомозиготами **AA** и гетерозиготами **Aa**;
2. Частота мутантного фенотипа составляет  $f(aa) = 1/250000 = 0,000004$  ;
3. Частота нормального фенотипа составляет  $1 - q^2 = 1 - 0,000004 = 0,999996$ ;
4. Частота гена **a** в популяции коренных доминиканцев:  $q = \sqrt{1/19000} = 0,007255$ ;
5. Такая частота существенно отклоняется от равновесных (предсказанных по уравнению Харди - Вайнберга) частот;
6. Причиной отклонения от равновесия является **дрейф генов** (эффект основателя).