

Особенности выполнения заданий линии 27 на ЕГЭ 2025 по закону Харди- Вайнберга

Лях С.В, учитель биологии МБОУ СОШ №43
х. Бараниковского Славянского района

ЧТО НУЖНО ДЛЯ УСПЕШНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАНИЙ НА ЗАКОН ХАРДИ-ВАЙНБЕРГА?

1) Выучить наизусть два уравнения: $p+q=1$ и $p^2 (AA) + 2pq (Aa) + q^2 (aa) = 1$

2) Выучить все основные понятия и символы в формулах Харди-Вайнберга

$p(A)$ — частота доминантного аллеля,

$q(a)$ — частота рецессивного аллеля,

$p^2 (AA)$ — частота особей, гомозиготных по доминантному аллелю (частота генотипа AA)

$q^2 (aa)$ — частота особей с рецессивным признаком (частота генотипа aa)

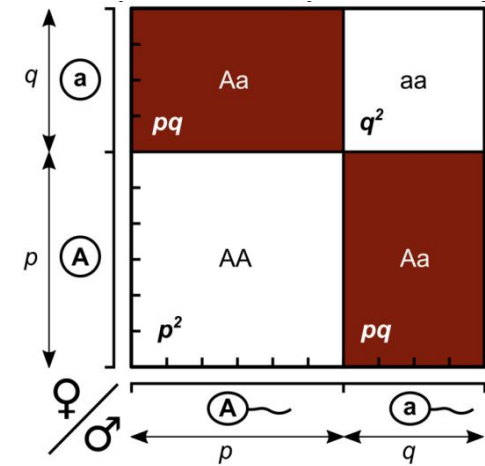
$2pq$ — частота гетерозиготных особей (частота генотипа Aa)

$p^2 (AA) + 2pq (Aa)$ — частота особей в генотипе которых имеется доминантный аллель.

$2pq (Aa) + q^2 (aa)$ — частота особей, в генотипе которых имеется рецессивный аллель.

Идеальная популяция имеет следующие признаки:

- ✓ неограниченно большая численность;
- ✓ свободное скрещивание - панмиксия;
- ✓ отсутствие мутационного процесса;
- ✓ отсутствие естественного отбора;
- ✓ отсутствие миграции особей;
- ✓ все аллели равно влияют на жизнеспособность гамет;
- ✓ потомки от всех возможных скрещиваний имеют равную выживаемость.



Различные способы выражения частоты аллеля или генотипа	Расчет частоты, выраженной в долях единицы
В исследуемой популяции 330 особей из 440 имели доминантный признак.	$330: 440 = 0,75$
В популяции кроликов белая окраска (рецессивный признак) составляет 12 %.	$12: 100 = 0,12$
Частота заболеваемости равна 10^{-3} .	$10^{-3} = 1: 1000 = 0,001$
В популяции заболеваемость составляет 0,1 на 1000 новорожденных	$0,1: 1000 = 0,0001$
Заболеваемость встречается с частотой 1: 25 000	$1: 25\,000 = 0,00004$

Общий алгоритм решения заданий на применение закона Харди-Вайнберга

1. По условиям задачи запишите какие гены доминантные, какие рецессивные, какие у них могут быть генотипы.
2. Определите: о численном значении какого символа формул закона Харди-Вайнберга говорится в условиях задания
3. Представьте эту информацию в долях единицы, используя десятичные числа.
4. Определите: численные значения каких символов в формулах закона Харди-Вайнберга необходимо найти.
5. Составьте наглядный план действий (на основе каких известных частот какие можно найти, используя для этого формулы закона Харди-Вайнберга).
6. Выполните запланированные действия в установленной вами последовательности.
7. Проверьте еще раз, все ли вы нашли, что требовалось найти по условию задачи.

Окраска цвета у скалистых прыгунов (*Chaetodipus intermedius*) контролируется одним геном. Доминантные гомозиготы имеют черный цвет; рецессивные гомозиготы - песочный. Гетерозиготы имеют промежуточную окраску.

В равновесной популяции скалистых прыгунов на 1000 особей приходится 100 песочных. Популяция попала в новые условия, в которых в результате интенсивного отлова хищниками погибло 40% черных особей.

Рассчитайте частоту особей с черной окраской и частоты аллелей в изначальной популяции, а также частоты всех фенотипов в популяции после отлова хищниками. Поясните ход решения. При расчётах округляйте значения до четвертого знака после запятой.

ДАНО	Изначальная популяция	Популяция в новых условиях
аллель $p(A)$ -		
аллель $q(a)$ -		
$p^2 (AA)$ -		
$2pq(Aa)$ -		
$q^2(aa)$ -		

ДАНО	Изначальная популяция	Популяция после отлова
аллель $p(A)$ -черной окр.	?	
аллель $q(a)$ - песочной окр.	?	
$p^2 (AA)$ -черная окр.	? (40% погибло)	?
$2pq(Aa)$ - промежуточная окр.		?
$q^2(aa)$ - песочная окр.	100/1000	?

Алгоритм решения:

1. Находим частоту рецессивных гомозигот в изначальной популяции:
-Частота рецессивных гомозигот (aa — особей с песочной окраской) в изначальной популяции:

$$q^2(aa) = 100/1000 = 0,1$$

2. Находим частоту рецессивного аллеля:

Частота рецессивного аллеля $q(a)$ в изначальной популяции:

$$q(a) = \sqrt{0,1} = 0,3162$$

3. Находим частоту доминантного аллеля в изначальной популяции:

Частота доминантного аллеля $p(A)$ в изначальной популяции:

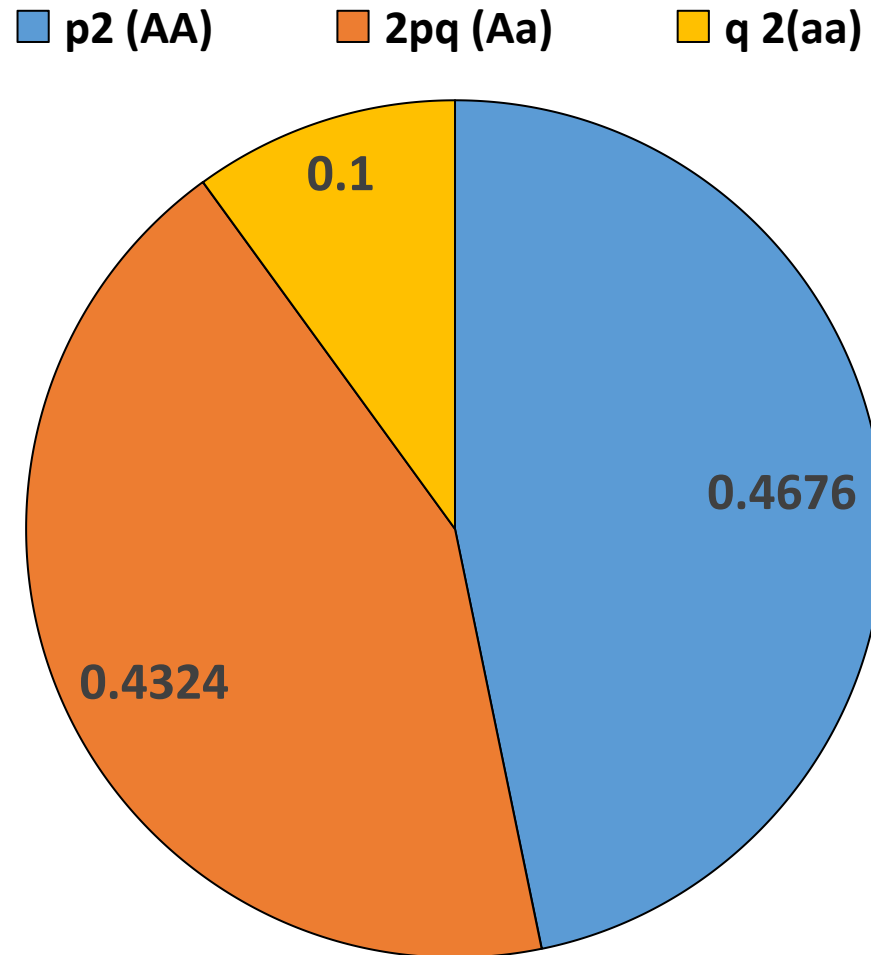
$$p(A) = 1 - 0,3162 = 0,6838$$

4. Находим частоту доминантных гомозигот в изначальной популяции:

Частота доминантных гомозигот (AA — особей с черной окраской) в изначальной популяции составляет:

$$p^2(AA) = 0,6838^2 = 0,4676$$

Частота генотипов(фенотипов) в изначальной популяции.



Для дальнейшего решения необходимо узнать долю особей с промежуточной окраской (Aa) в изначальной популяции(данный пункт не отмечен в критериях):

1-й способ:

$$2pq(Aa) = 2 \times 0,3162 \times 0,6838 = 0,4324$$

2-й способ:

$$1 - 0,4676 - 0,1 = 0,4324$$

Чтобы рассчитать частоты всех фенотипов(генотипов) после отлова 40% черных. Нужно узнать долю оставшихся черных (данный пункт отсутствует в критериях)

Находим частоту доминантных гомозигот в изменившейся популяции после гибели 40% черных особей:

1 вариант: находим 60% (выживших) от частоты доминантных гомозигот в изначальной популяции

Частота доминантных гомозигот (АА — особей с черной окраской) в новой популяции составляет:

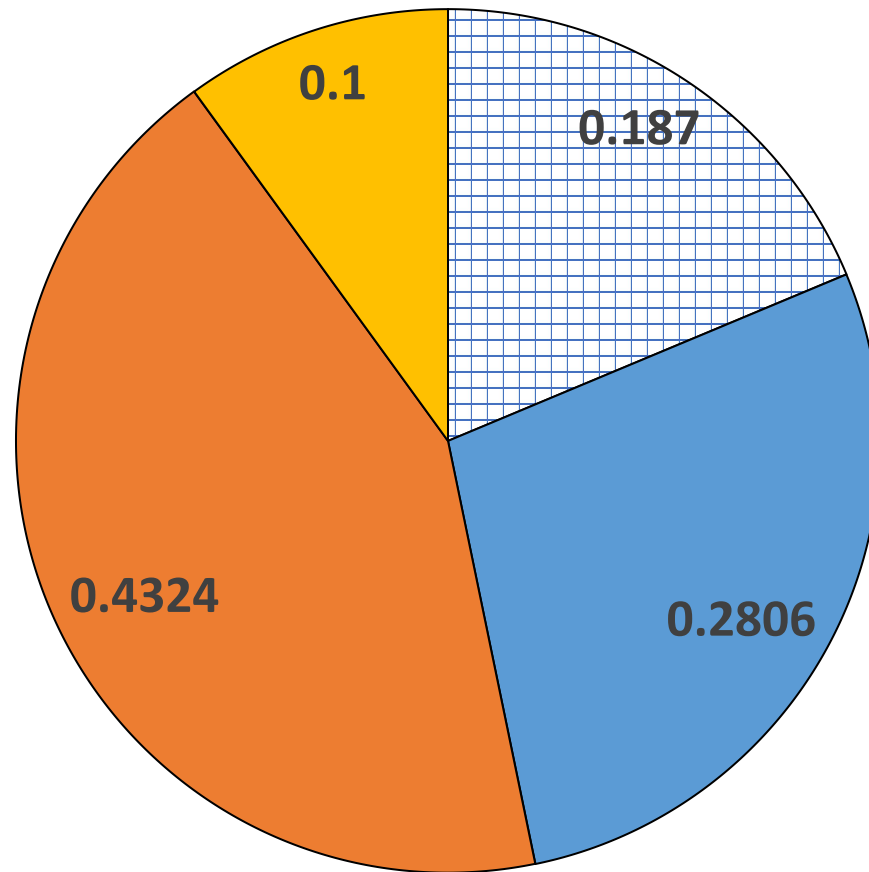
$$0,4676 \times 0,6 = 0,2806$$

2 вариант: находим 40% (погибших) от частоты доминантных гомозигот в изначальной популяции, затем из частоты доминантных гомозигот в изначальной популяции вычитаем полученный результат.

$$0,4676 - (0,4676 \times 0,4) = 0,2806$$

Частота генотипов (фенотипов) после отлова хищниками

 $p^2(AA)$ погибшие  $p^2(AA)$ оставшиеся  $2pq(Aa)$  $q^2(aa)$



5.Находим сумму долей всех фенотипов (генотипов) в новой популяции сразу после гибели 40% доминантных гомозигот:

Общая сумма долей в новой популяции:

1-й способ

$$0,1(aa) + 0,4324(Aa) + 0,2806(AA) = 0,8130$$

ИЛИ

2-й способ

$$1 - (0,4676 \times 0,4) = 0,813$$

Находим частоты всех фенотипов (генотипов) в новой популяции:

6. Частота фенотипа (генотипа AA) у особей с черной окраской в новых условиях:

$$0,2806 / 0,8130 = 0,3451$$

7. Частота фенотипа (генотипа Aa) у особей с промежуточной окраской в новых условиях:

$$0,4324 / 0,8130 = 0,5319$$

8. Частота фенотипа (генотипа aa) у особей с песочной окраской в новых условиях :

$$0,1 / 0,8130 = 0,1230$$

$$\text{Или } 1 - 0,5319 - 0,3451 = 0,1230$$

Критерии оценки

Содержание верного ответа и указания по оцениванию (правильный ответ должен содержать следующие позиции)	Баллы
Ответ включает в себя семь-восемь названных выше элементов и не содержит биологических ошибок	3
Ответ включает в себя пять - шесть из названных выше элементов, которые не содержат биологических ошибок	2
Ответ включает в себя три-четыре из названных выше элементов, которые не содержат биологических ошибок	1
Все иные ситуации, не соответствующие правилам выставления 3, 2 и 1 балла	0
<i>Максимальный балл</i>	3

Допускается иная генетическая символика

**При любых вычислениях допускается
погрешность в 0,01 !!**

Предполагаемые способы вычисления с погрешностями:

1000 особей -100%

x черных - 46,76 %

$$x = (468 * 1000) / 100 = 468$$

ИЛИ

1000 особей - 100%

x черных - 46,76 % (47%)

x= 470 особей

Число выживших черных после отлов хищниками (60 %)

468- 100 %

470-100 %

X - 60 %

x-60 %

$$X = (60 \times 468) / 100 = 281$$

$$X = 282$$

Число особей с промежуточной окраской :

1000 - 100 %

X - 43,24 % (43 %)

$$x = 432 \text{ или } 430$$

Общая численность особей после отлова хищниками:

$$1\text{-й: } 100 + 281 + 432 = 813$$

$$2\text{-й : } 100 + 282 + 432 = 814$$

$$3\text{-й: } 100 + 281 + 430 = 811$$

$$aa = 100 / 811 = 0,1233$$

$$aa = 100 / 814 = 0,1228$$

$$Aa = 430 / 811 = 0,5302$$

$$Aa = 432 / 811 = 0,5327$$

$$Aa = 430 / 814 = 0,5283$$

$$Aa = 432 / 814 = 0,5307$$

$$AA = 281 / 811 = 0,3465$$

$$AA = 281 / 814 = 0,3452$$

$$AA = 282 / 811 = 0,3477$$

$$AA = 282 / 814 = 0,3464$$

У листовых жуков устойчивость к инсектициду определяется рецессивным аллелем m .

Только гомозиготы mm проявляют устойчивость. В равновесной популяции из 1800 особей 162 оказались устойчивыми. После распыления инсектицида погибло 50% восприимчивых особей. Рассчитайте частоты аллелей и генотипов в исходной популяции. Рассчитайте частоты генотипов после отбора. Найдите долю устойчивых жуков после отбора. Укажите тип отбора, действующий в популяции. Предполагается, что популяция находится в равновесии Харди–Вайнберга до отбора, и ген находится в аутосоме.

ДАНО	Изначальная популяция	Популяция в новых условиях
аллель $p(M)$ - неустойч.	?	
аллель $q(m)$ - устойчив.	?	
$p^2 (MM)$ -неустойч.	? (50% погибло)	?
$2pq(Mm)$ -неустойч.	? (50% погибло)	?
$q^2(mm)$ - устойчивые	? 162_1800	?

- 1) Частота устойчивых особей в начальной популяции $q^2(mm) = 162 / 1800 = 0,09$.
- 2) Частота рецессивного аллеля $q(m) = \sqrt{0,09} = 0,3$
- 3) Частота доминантного аллеля $p(M) = 1 - 0,3 = 0,7$
- 4) Частота доминантных гомозигот $p^2(MM) = 0,7^2 = 0,49$
- 5) Частота гетерозиготных особей $2pq(Mm) = 0,42$
- 6) Частота рецессивных гомозигот $p^2(mm) = 0,09$
- 7) Восприимчивые: $MM + Mm = 0,91 \times 0,5 \rightarrow$ осталось 0,455 после гибели.
- 8) Устойчивые mm не пострадали: осталось 0,09.
- 9) Общая сумма всех долей $= 0,455 + 0,09 = 0,545$.
- 10) Доля устойчивых после отбора $= 0,09 / 0,545 = 0,1651$.
- 11) Частота доминантных гомозигот после отбора $p^2(MM) = (0,49 \times 0,5) / 0,545 = 0,4495$
- 12) Частота гетерозиготных особей после отбора $2pq(Mm) = (0,42 \times 0,5) / 0,545 = 0,3853$
- 11) Тип отбора: движущий отбор против доминантного фенотипа.

27. В популяции растений ночной красавицы (*Mirabilis jalapa*) 96 растений имеют ярко-красную окраску венчика, а 54 – белую. Рассчитайте частоты аллелей красной и белой окрасок в популяции. Какими были бы частоты генотипов всех генотипов, если бы популяция находилась в равновесии? Если представить, что все условия равновесной популяции начнут выполняться, то за сколько поколений популяция придёт в равновесие?

Элементы ответа:

- 1) частота растений с ярко-красной окраской венчика (генотип AA) составляет: $96/150 = 0,64$;
- 2) частота растений с белой окраской венчика (генотип aa) составляет: $54/150 = 0,36$;
- 3) аллель A в популяции представлен только в красных растениях, а аллель a – только в белых;
- 4) частота аллеля $A = p = 0,64$;
- 5) частота аллеля $a = q = 0,36$;
- 6) равновесные частоты генотипов: $f(AA) = p^2 = 0,4096$, $f(aa) = q^2 = 0,1296$, $f(Aa) = 2pq = 0,4608$;
- 7) за одно поколение.

При решении задач по популяционной генетике необходимо учитывать, находится ли популяция в равновесии или нет. Если находится, то можно использовать уравнение Харди-Вайнберга. Однако в данной задаче популяция не находится в таком равновесии – это можно заметить по отсутствию гетерозигот, а также по фразе «если бы популяция находилась в равновесии». Таким образом, использовать квадраты частот для расчета генотипов нельзя.

Их можно рассчитать только напрямую. Всего в популяции 300 аллелей (150 диплоидных особей). Из них доминантные аллели только в доминантных гомозиготах: $96 \cdot 2 = 192$. Получаем частоту доминантного аллеля $192/300$ (или $96/150$) = 0.64. Аналогично считаем частоту рецессивного аллеля. Зная частоты, мы можем предположить, какими были бы равновесные частоты в популяции при соблюдении всех условий идеальной популяции. Это пункт 6.

Последний вопрос (седьмой пункт) – это следствие из закона Харди-Вайнберга. Иногда это следствие называют законом Пирсона, но это название избыточно. Можно его так сформулировать: при любом исходном соотношении генотипов в популяции при первом свободном скрещивании внутри популяции установится равновесие. Этот закон можно проверить следующим образом: выписать все возможные скрещивания и рассчитать, какие потомки и в каком количестве образуются из нашей неравновесной популяции. Увидим, что за одно поколение частоты генотипов приблизятся к равновесным.

Резюме: уравнение Харди-Вайнберга надо применять только в случае равновесия. В другом случае надо считать частоты напрямую.

С уважением, В.С. Рохлов

Проверочная задача 1:

Популяция бабочек дневной красавицы (*Nuzachem takslozhno*) представлена 30 гомозиготами по доминанте и 70 гетерозиготами. Рассчитайте частоты аллелей и генотипов в исходной популяции. Какой будет частота всех генотипов в следующем поколении при свободном скрещивании (и соблюдении всех остальных положений закона Харди-Вайнберга)?

Ответ: $p^2=0,4225$, $q^2=0,1225$, $2pq=0,455$

ДАНО	Изначальная популяция	Популяция в следующем поколении
аллель $p(A)$ -	?	
аллель $q(a)$ -	?	
$p^2 (AA)$? 30	?
$2pq(Aa)$? 70	?
$q^2(aa)$	нет	?

- 1) Частота гомозиготных особей в начальной популяции $(AA) = 30 / 100 = 0,3$
- 2) Частота гетерозиготных особей в начальной популяции $(Aa) = 70/100 = 0,7$
- 3) Частота рецессивного аллеля $q(a) = 70/200 = 0,35$ (рецессивный аллель представлен только у гетерозигот)
- 4) Частота доминантного аллеля $p(A) = (30 \times 2) + 70 / 200 = 0,65$ или $1 - 0,35 = 0,65$ (доминантный аллель представлен у гомозиготных (AA) особей $30 \times 2 = 60$ и гетерозиготных $(Aa) = 70$)
- 5) Частота доминантных гомозигот в последующем поколении $p^2(AA) = 0,65 \times 0,65 = 0,4225$
- 6) Частота рецессивных гомозигот в последующем поколении $q^2(aa) = 0,35 \times 0,35 = 0,1225$
- 7) Частота гетерозиготных особей в последующем поколении $2pq(Aa) = 2 \times 0,35 \times 0,65 = 0,455$ или $1 - 0,4225 - 0,1225 = 0,455$

Проверочная задача 2:

У каракульских овец аллель нормальной длины ушей неполно доминирует над аллелем безухости. Стадо сформировано из 68 безухих овец и 132 животных с укороченными ушами. Рассчитайте частоты аллелей и генотипов в исходной популяции. Какими будут частоты всех генотипов, когда популяция придет в состояние равновесия Харди-Вайнберга?

Ответ: $p^2 = 0,1089$, $q^2 = 0,4489$, $2pq = 0,4422$

ДАНО	Изначальная популяция	Популяция в следующем поколении
аллель $p(A)$ - норм.	?	
аллель $q(a)$ - безух.	?	
$p^2 (AA)$ - норм.длина	? нет	?
$2pq(Aa)$ - укороч.	? 132	?
$q^2(aa)$ - безухие	68	?

1) Частота гомозиготных безухих особей в начальной популяции $(aa) = 68 / 400 = 0,17$

2) Частота гетерозиготных с укороченными ушами особей в начальной популяции $(Aa) = 132/400 = 0,33$

3) Частота рецессивного аллеля $q(a) = (68 \times 2 + 132) / 400 = 0,67$ (рецессивный аллель представлен у гомозиготных (aa) и у гетерозиготных особей)

4) Частота доминантного аллеля $p(A) = 132 / 400 = 0,33$ или $1 - 0,67 = 0,33$ (доминантный аллель представлен только у гетерозиготных особей (Aa))

5) Частота доминантных гомозигот с нормальными ушами в последующем поколении $p^2(AA) = 0,33 \times 0,33 = 0,1089$

6) Частота рецессивных гомозигот безухих в последующем поколении $q^2(aa) = 0,67 \times 0,67 = 0,4489$

7) Частота гетерозиготных особей с укороченными ушами в последующем поколении $2pq(Aa) = 1 - 0,1089 - 0,4489 = 0,4222$