

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ИНСТИТУТ СОДЕРЖАНИЯ И МЕТОДОВ ОБУЧЕНИЯ

федеральное государственное
бюджетное научное учреждение

МЕТОДИЧЕСКИЙ КЕЙС

(БИОЛОГИЯ. 11 КЛАСС)

Решение задач на применение закона генетического равновесия Дж. Харди, В. Вайнберга

АВТОР:

ПАРШУТИНА

ЛЮДМИЛА АЛЕКСАНДРОВНА

к. п. н., заведующая лабораторией
естественно-научного образования

ФГБНУ «ИСМО»

РЕЦЕНЗЕНТ:

АСАНОВА ЛИДИЯ ИВАНОВНА

к. п. н., старший научный сотрудник
лаборатории естественно-научного

образования ФГБНУ «ИСМО»

Москва

2024

МЕТОДИЧЕСКИЙ КЕЙС

В кейсе рассматриваются общие принципы решения задач на применение закона генетического равновесия Дж. Харди, В. Вайнберга.

Приводятся необходимые теоретические сведения и примеры заданий с методическими комментариями, а также задания для самостоятельного выполнения.

Использование материалов кейса окажет помощь учителям в организации учебно-познавательной деятельности обучающихся по данной теме, в том числе во внеурочное время, и будет способствовать успешной подготовке обучающихся к единому государственному экзамену (ЕГЭ) по биологии.

Учебный предмет: БИОЛОГИЯ

Тема: Решение задач на применение закона генетического равновесия Дж. Харди, В. Вайнберга

Класс: 11 (углублённый уровень)

Раздел: Микроэволюция и её результаты

АКТУАЛЬНОСТЬ

В обновленном ФГОС среднего общего образования на углубленном уровне имеется следующее требование к результатам обучения: владеть системой биологических знаний, которая включает в себя законы единообразия потомков первого поколения, расщепления признаков, независимого наследования признаков Г. Менделя, сцепленного наследования признаков и нарушения сцепления генов Т. Моргана, гомологических рядов в наследственной изменчивости Н.И. Вавилова, генетического равновесия Дж. Харди и В. Вайнберга, зародышевого сходства К. Бэра, биогенетического закона Э. Геккеля, Ф. Мюллера.

В федеральную рабочую программу в 11 классе в тему «Микроэволюция и её результаты» в целях повышения доказательной базы микроэволюционных механизмов включено изучение закона генетического равновесия Дж. Харди и В. Вайнберга [2]. Знакомство с этим законом можно реализовать, например, на уроке по теме «Популяция – элементарная единица эволюции». Использование данного биологического закона подразумевает применение математического аппарата, а точнее, решение уравнения квадрата суммы.

В связи с этим в модели КИМ по биологии в 2024 году появилось новое задание на практическое применение закона Харди-Вайнберга как задание повышенного уровня сложности [1]. Закон Харди-Вайнберга позволяет рассчитать частоты аллелей и генотипов в популяции, что является важной её характеристикой, так как именно популяция рассматривается как единица эволюции. Практическое применение закона возможно, например, в селекции (оценка перспективности селекционного материала для закрепления признака), в экологии (оценка влияния антропогенных факторов на увеличение скорости мутации) и в медико-генетических исследованиях (изучение частот наследственных заболеваний человека).

ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ КОМПЕТЕНЦИИ

Предметная компетентность: свободное владение изучаемым материалом (популяция как элементарная единица эволюции, признаки идеальной популяции, условия выполнения закона Харди-Вайнберга); умение свободно решать задания ЕГЭ по теме «Закон генетического равновесия Дж. Харди, В. Вайнберга».

Методическая компетентность: умение организовать работу с учащимися с опорой на знания, полученные ими ранее при изучении других предметов; умение использовать разнообразный спектр материалов и заданий (книги, интернет-ресурсы), способных вызвать интерес к теме «Закон генетического равновесия Дж. Харди, В. Вайнберга»; умение разрабатывать (корректировать имеющиеся) дидактические и методические материалы, обеспечивающие достижение планируемых образовательных результатов по теме «Закон генетического равновесия Дж. Харди, В. Вайнберга».

Психолого-педагогическая компетентность: умение отбирать подходы и технологии к организации обучения и воспитания на основе включения всех обучающихся в образовательный процесс, в том числе с особыми образовательными потребностями; умение отбирать учебное содержание для организации совместной (индивидуальной) учебной деятельности обучающихся, в том числе с особыми образовательными потребностями, в соответствии с требованиями федеральных государственных образовательных стандартов.

Коммуникативная компетентность: умение устанавливать отношения сотрудничества и вести диалог с учащимися, другими участниками образовательного процесса при изучении темы «Закон генетического равновесия Дж. Харди, В. Вайнберга».

МЕТОДИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА

В школьном курсе биологии недостаточно внимания уделяется теме «Решение задач на применение закона генетического равновесия Дж. Харди, В. Вайнберга», однако она важна для понимания эволюционной теории, так как популяционная генетика связывает воедино и дарвинизм, и генетику. Также изучение данной темы имеет большое нравственное значение. Просчитывая процент гетерозигот по некоторым редким наследственным аутосомно-рецессивным болезням, обучающиеся обнаруживают, что количество носителей рецессивного гена неожиданно велико, что позволяет прийти им к выводу о бесполезности метода уничтожения гомозиготных рецессивов, поэтому лучше стараться не добавлять в окружающую среду новых мутагенов.

При изучении темы «Решение задач на применение закона генетического равновесия Дж. Харди, В. Вайнберга» необходимо продолжить формирование знаний о генетической стабильности и генетических процессах в популяциях; закрепить умения решать задачи разной сложности с применением уравнения Харди-Вайнберга; на примере практической значимости закона Харди-Вайнберга показать связь теории и практики;

продолжить формирование умения сравнивать биологические объекты (идеальные и реальные популяции) и делать выводы на основе сравнения.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Теоретическая часть

Закон Харди-Вайнберга отражает закономерности, важные для понимания генетических процессов в популяциях. Он был сформулирован британским генетиком Годфри Харди и немецким врачом Вильгельмом Вайнбергом в 1908 году. Закон играет ключевую роль в изучении распределения генетических аллелей в популяциях [5].

Предположим, что самцы и самки в популяции скрещиваются случайно, образуя зиготы:

♀	♂	
	$A(p)$	$a(q)$
$A(p)$	$AA(p^2)$	$Aa(pq)$
$a(q)$	$Aa(pq)$	$aa(q^2)$

Образование особей с генотипами AA обусловлено вероятностью получения аллеля A от матери и аллеля A от отца, то есть

$$p \cdot p = p^2.$$

Аналогично возникновение генотипа aa , частота встречаемости которого q^2 .

Генотип Aa может возникнуть двумя путями: организм получает аллель A от матери, аллель a от отца или, наоборот, вероятность того и другого события равна pq , а суммарная вероятность возникновения генотипа Aa равна $2pq$.

Таким образом, частоту трех возможных генотипов можно выразить уравнением

$$(p + q)^2 = p^2 + 2pq + q^2 = 1,$$

в котором:

p – частота встречаемости аллеля A ;

q – частота встречаемости аллеля a ;

q^2 – частота встречаемости генотипа aa ;

p^2 – частота встречаемости генотипа AA ;

pq – частота встречаемости генотипа Aa .

Таким образом, если скрещивание случайно, то частоты генотипов связаны с частотами аллелей простым квадратом двучлена. Приведённая выше формула получила название *уравнения Харди-Вайнберга*.

Предположим, что в популяции $p = 0,7A$, $q = 0,3a$, тогда частоты встречаемости генотипов будут равны $(0,7 + 0,3)^2 = 0,49 + 0,42 + 0,09 = 1$, или

внесём эти же данные о частотах встречаемости аллелей в решётку Пеннета.

♀	♂	
	$A(0,7p)$	$a(0,3q)$
$A(0,7p)$	$AA(0,49p^2)$	$Aa(0,21pq)$
$a(0,3q)$	$Aa(0,21pq)$	$aa(0,09q^2)$

Интересно, что в следующем поколении гаметы с аллелем A будут вновь возникать с частотой 0,7 (0,49 от AA и 0,21 от Aa), а с аллелем a с частотой 0,3 (0,09 от aa и 0,21 от Aa), то есть частоты генов и генотипов остаются неизменными из поколения в поколение – это и есть закон Харди-Вайнберга.

Закон Харди-Вайнберга носит вероятностный характер и соблюдается в так называемой «идеальной популяции». Она характеризуется следующими признаками:

- бесконечно большие размеры;
- в ней существует неограниченная панмиксия;
- в ней отсутствуют мутации;
- в ней не происходит миграция особей с иными генотипами из соседних популяций;
- в ней отсутствует естественный отбор.

Все эти процессы имеют место в природных популяциях, поэтому в них закон Харди-Вайнберга в чистом виде не выполняется. Но несмотря на это, данный закон отражает процессы, происходящие в генофондах природных популяций.

Практическая часть

Рассмотрим *общие принципы* решения задач на применение закона генетического равновесия Дж. Харди и В. Вайнберга, которые может рассмотреть учитель [3]:

1. Разобраться, какой признак по условию доминантный, а какой – рецессивный. Эти аллели в диплоидном наборе могут давать разные сочетания генотипов: AA (доминантная гомозигота), Aa (гетерозигота) и aa (рецессивная гомозигота).
2. Посчитать частоту встречаемости аллелей. Для этого используется уравнение

$$p + q = 1,$$

где p – частота доминантного аллеля, а q – рецессивного.

3. Рассчитать частоту генотипов. Чтобы получить гомозиготную особь по доминантному аллелю, необходима встреча двух гамет с аллелем A :

$$AA = p \cdot p = p^2.$$

Аналогично высчитывается вероятность появления рецессивного гетерозиготного организма:

$$aa = q \times q = q^2.$$

Для получения гетерозиготной особи необходимо, чтобы гамета с доминантным аллелем встретила гамету с рецессивным аллелем или, наоборот, гамета с рецессивным аллелем встретила гамету с доминантным аллелем. Получаем:

$$Aa = p \cdot q + q \cdot p = 2pq.$$

4. Рассчитать равновесные частоты генотипов. Для этого используется формула

$$p^2 + 2pq + q^2 = 1,$$

где, зная частоты аллелей в популяции, можно рассчитать равновесные частоты генотипов.

При решении задач на закон Харди-Вайнберга важно учитывать, что он соблюдается только для «идеальной популяции», в которой отсутствуют мутации, миграции особей, а скрещивание происходит случайным образом.

Примеры решения задач

Задача 1.

В популяции безродных собак города Владивостока было найдено 245 животных коротконогих и 24 с нормальными ногами. Коротконогость у собак – доминантный признак (A), нормальная длина ног – рецессивный (a). Определите частоту аллелей A и a и генотипов AA , Aa и aa в данной популяции.

Решение

- 1) Генотип собак с нормальной длиной ног – aa , можно определить частоту аллеля a , то есть q . Выразим частоту генотипа aa в долях единицы:

$$q^2 = (1 - p)^2.$$

Общее количество собак принимаем за 1:

$$245 + 24 = 269 = 1,$$

тогда

$$q^2 = (1 - p)^2 = 24/269 = 0,09$$

(частота генотипа aa), а частота рецессивного аллеля будет равна:

$$q = \sqrt{q^2} = \sqrt{0,09} = 0,3.$$

- 2) Определяем частоту доминантного аллеля A , то есть

$$p = 1 - q = 1 - 0,3 = 0,7.$$

- 3) Определяем частоту генотипа AA , то есть

$$p^2 : p^2 = 0,7^2 = 0,49.$$

- 4) Определяем частоту гетерозигот, то есть $2pq$:

$$2pq = 2 \cdot 0,7 \cdot 0,3 = 0,42.$$

- 5) Рассчитываем количество собак разных генотипов:

— определяем сумму частот доминантных гомозигот и гетерозигот:

$$49 AA + 0,42 Aa = 0,91;$$

— определяем количество собак с генотипом AA :

$$245 особей - 0,91;$$

$$x \text{ особей} - 0,49;$$

$$x = 132 \text{ особи};$$

— определяем количество собак с генотипом Aa :

$$245 \text{ особей} - 0,91;$$

$$x \text{ особей} - 0,42;$$

$$x = 113 \text{ особей}.$$

Ответ: 132 AA ; 113 Aa ; 24 aa .

Критерии оценивания выполнения задания	Баллы
Ответ включает все названные выше элементы, не содержит биологических ошибок	3
Ответ включает в себя пять из названных выше элементов, которые не содержат биологических ошибок	2
Ответ включает в себя 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

Задача 2.

В популяциях Европы на 20 000 человек встречается 1 альбинос. Определите генотипическую структуру популяции.

Решение

1) Находим частоту рецессивных гомозигот (q^2) и выражаем её в долях единицы:

$$q^2 = (1 - p)^2 = 1/(20\,000 + 1) = 0,00005,$$

тогда частота рецессивного аллеля a составит:

$$q = \sqrt{q^2} = \sqrt{0,00005} = 0,007.$$

2) Определяем частоту доминантного аллеля A (p):

$$p = 1 - 0,007 = 0,993.$$

3) Определяем частоту генотипа AA , то есть p^2 :

$$p^2 = 0,993^2 = 0,986.$$

4) Определяем частоту генотипа Aa , то есть $2pq$

$$2pq = 2 \cdot 0,993 \cdot 0,007 = 0,014.$$

5) Расписываем генотипическую структуру популяции европейцев:

$$0,986 \text{ } AA : 0,014 \text{ } Aa : 0,00005 \text{ } aa, \text{ или}$$

$$19720 \text{ } AA : 280 \text{ } Aa : 1 \text{ } aa$$

Ответ: 0,986 AA ; 0,014 Aa ; 0,00005 aa , или 19720 AA ; 280 Aa ; 1 aa .

Критерии оценивания выполнения заданий	Баллы
Ответ включает все названные выше элементы, не содержит биологических ошибок	3
Ответ включает в себя пять из названных выше элементов, которые не содержат биологических ошибок	2
Ответ включает в себя 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

Задача 3.

В популяции гороха посевного (*Pisum sativum*) из 700 особей 112 растений имеют зелёную окраску семян. Рассчитайте частоты аллелей жёлтой и зелёной окраски семян, а также частоты всех возможных генотипов, если известно, что популяция находится в равновесии Харди-Вайнберга. Ответ поясните.

Ответ:

1. Частота растений с зелёными семенами составляет $\frac{112}{700} = 0,16$
2. Зелёную окраску семян имеют растения с генотипом *aa*, в равновесной популяции доля таких растений составляет q^2 .
3. Частота аллеля *q* в популяции составляет 0,4.
4. Частота аллеля *p* в популяции составляет $1 - q = 0,6$.
5. Частота генотипа *Aa* (жёлтая окраска семян) в равновесной популяции равна $2pq = 0,48$.
6. Частота генотипа *AA* (жёлтая окраска) в равновесной популяции равна $p^2 = 0,36$.

Критерии оценивания выполнения задания	Баллы
Ответ включает в себя пять из названных выше элементов, которые не содержат биологических ошибок	2
Ответ включает в себя 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

Задача 4.

В популяции крупного рогатого скота 248 особей красной окраски, 558 особей белой и 744 особи чалые. Красная масть не полностью доминирует над белой. Рассчитайте частоты аллелей красной, белой окрасок, а также частоты всех возможных генотипов, если известно, что популяция находится в равновесии Харди-Вайнберга. Ответ поясните.

Ответ:

1. Красную окраску имеют особи с генотипом AA , чалую – особи с генотипом Aa , белую – особи с генотипом aa . Вся популяция составляет 1550 особей.

2. Частота животных красной окраски составляет $\frac{248}{1550} = 0,16$

3. Красную окраску имеют животные с генотипом AA , в равновесной популяции доля таких животных составляет p^2 .

4. Частота аллеля p в популяции составляет 0,4.

5. Частота аллеля q в популяции составляет $1 - p = 0,6$.

6. Частота генотипа Aa (чалая окраска животных) в равновесной популяции составляет $2pq = 0,48$.

7. Частота генотипа aa (белая окраска) в равновесной популяции составляет $q^2 = 0,36$.

ИЛИ

6. Частота генотипа Aa (чалая окраска животных) в равновесной популяции составляет $\frac{477}{1550} = 0,16$

7. Частота генотипа aa (белая окраска) в равновесной популяции составляет $\frac{558}{1550} = 0,16$

Критерии оценивания выполнения задания

Баллы

Ответ включает все названные выше элементы, не содержит биологических ошибок

3

Ответ включает в себя пять из названных выше элементов, которые не содержат биологических ошибок

2

Ответ включает в себя четыре из названных выше элементов, которые не содержат биологических ошибок

1

Все иные ситуации, не соответствующие правилам выставления 3, 2 и 1 балла

0

Максимальный балл

3

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задача 1.

В одной из популяций человека 16% людей имеют наследственную тугоухость, 84% имеют нормальный слух. Тугоухость наследуется по аутосомно-рецессивному типу. Определите частоты аллелей, отвечающих за тугоухость и нормальный слух, а также частоты всех возможных генотипов. Известно, что популяция находится в состоянии равновесия Харди-Вайнберга. Проведите необходимые расчеты и дайте пояснения к полученным результатам.

Ответ:

- 1) нормальный слух имеют люди с генотипами AA и Aa , у людей с тугоухостью генотип aa ;
- 2) в равновесной популяции доля людей с тугоухостью составляет $q^2 = 16\% = 0,16$;
- 3) частота аллеля q в популяции составляет 0,4;
- 4) частота аллеля p в популяции составляет $1 - q = 0,6$;
- 5) частота генотипа Aa (нормальный слух) в равновесной популяции составляет $2pq = 0,48$;
- 6) частота генотипа AA (нормальный слух) в равновесной популяции $p^2 = 0,36$.

Критерии оценивания выполнения задания

Баллы

Ответ включает все названные выше элементы, не содержит биологических ошибок	3
Ответ включает в себя пять из названных выше элементов, которые не содержат биологических ошибок	2
Ответ включает в себя 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

Задача 2.

В популяции земляники частота аллеля p (красный цвет плодов) составляет 0,7. В популяции из 500 растений красный цвет не полностью доминирует над белым. Необходимо вычислить частоту аллеля q , отвечающего за белый цвет плодов, количество растений с белыми плодами, а также частоты всех возможных генотипов. Известно, что популяция находится в равновесии Харди-Вайнберга. Проведите необходимые расчёты и дайте пояснения к полученным результатам.

Ответ:

- 1) красный цвет плодов имеют особи с генотипом AA , розовый цвет плодов у особей с генотипом Aa , белые плоды – aa ;
- 2) в равновесной популяции доля растений с красными плодами составляет $p^2 = 0,49$;

3) частота аллеля p в популяции составляет 0,7. Частота аллеля q в популяции составляет $1 - q = 0,3$;

4) частота генотипа Aa (розовая окраска плодов) в равновесной популяции составляет $2pq = 0,42$;

5) частота генотипа aa (белая окраска плодов) в равновесной популяции $q^2 = 0,09$;

6) количество в популяции растений с белой окраской плодов составляет $0,09 \cdot 500 = 45$.

Критерии оценивания выполнения задания	Баллы
Ответ включает все названные выше элементы, не содержит биологических ошибок	3
Ответ включает в себя пять из названных выше элементов, которые не содержат биологических ошибок	2
Ответ включает в себя 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

Задача 3.

В популяции лисиц частота аллеля q (чёрная окраска) составляет 0,3. В популяции 300 особей, рыжая окраска не полностью доминирует над чёрной. Необходимо определить частоту аллеля рыжей окраски, а также количество особей с промежуточной окраской и частоты всех возможных генотипов. Известно, что популяция находится в равновесии Харди-Вайнберга. Проведите необходимые расчёты и дайте пояснения к полученным результатам.

Ответ:

1. Рыжую окраску имеют особи с генотипом AA , промежуточную – с генотипом Aa , чёрную – с генотипом aa .

2. В равновесной популяции доля лис чёрной окраски составляет $q^2 = 0,09$.

3. Частота аллеля q в популяции составляет 0,3. Частота аллеля p в популяции составляет $1 - q = 0,7$.

4. Частота генотипа Aa (промежуточная окраска) в равновесной популяции составляет $2pq = 0,42$.

5. Количество в популяции особей промежуточной окраски составляет $0,42 \cdot 300 = 126$.

6. Частота генотипа AA (рыжая окраска) в равновесной популяции $p^2 = 0,49$.

Критерии оценивания выполнения задания	Баллы
Ответ включает все названные выше элементы, не содержит биологических ошибок	3
Ответ включает в себя пять из названных выше элементов, которые не содержат биологических ошибок	2
Ответ включает в себя 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

Задача 4.

В популяции норок тёмный окрас не полностью доминирует над белым, и она состоит исключительно из гомозиготных особей: 70 особей имеют темный окрас, 33 – белый окрас. Необходимо определить частоты генов, отвечающих за тёмный и белый окрас, в этой популяции. Если бы популяция находилась в состоянии равновесия, какие генотипы были бы представлены в ней? Какими были бы частоты всех генотипов, если бы популяция находилась в равновесии? Если предположить, что все условия равновесной популяции будут соблюдены, за какое количество поколений она достигнет равновесия? Какой процент особей с серым окрасом появится в популяции в первом поколении? Проведите необходимые расчёты и дайте пояснения к полученным результатам [4].

Ответ:

- 1) частота особей с темной окраской (частота генотипа AA) составляет: 0,68 (70/103);
- 2) частота особей с белой окраской (частота генотипа aa) составляет: 0,32 (33/103);
- 3) аллель A в популяции представлен только у темных норок, аллель a – только у белых;
- 4) частота аллеля $A = p = 0,68$ ($70 \times 2 = 140 / 206$ аллелей (так как всего 103 диплоидных особей));
- 5) частота аллеля $a = q = 0,32$; ($33 \times 2 = 66 / 206 = 0,32$);
- 6) равновесные частоты генотипов: $f(AA) = p^2 = 0,4624$; $f(aa) = q^2 = 0,1024$; $f(Aa) = 2pq = 0,4352$;
- 7) за одно поколение;
- 8) серые норки гетерозиготные, поэтому их количество составит 43,52%.

Критерии оценивания выполнения задания	Баллы
Ответ включает все названные выше элементы, не содержит биологических ошибок	3

Ответ включает в себя пять из названных выше элементов, которые не содержат биологических ошибок	2
Ответ включает в себя 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

Задача 5.

В популяции тритонов 64% особей имеют равномерный окрас, а 36% – пятнистый. Равномерный окрас преобладает над пятнистым. Необходимо определить частоты аллелей, отвечающих за равномерный и пятнистый окрас, а также частоты всех возможных генотипов. Известно, что популяция находится в равновесии Харди-Вайнберга. Проведите необходимые расчеты и дайте пояснения к полученным результатам.

Ответ:

- 1) равномерный окрас имеют тритоны с генотипами AA и Aa , у тритонов пятнистой окраски генотип aa ;
- 2) в равновесной популяции доля тритонов с пятнистой окраской составляет $q^2 = 36\% = 0,36$;
- 3) частота аллеля q в популяции составляет 0,6;
- 4) частота аллеля p в популяции составляет $1 - q = 0,4$;
- 5) частота генотипа Aa (равномерный окрас) в равновесной популяции составляет $2pq = 0,48$;
- 6) частота генотипа AA (равномерный окрас) в равновесной популяции $p^2 = 0,16$.

Критерии оценивания выполнения задания	Баллы
Ответ включает все названные выше элементы, не содержит биологических ошибок	3
Ответ включает в себя пять из названных выше элементов, которые не содержат биологических ошибок	2
Ответ включает в себя 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

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рохлов В.С., Петросова Р.А.* Методические рекомендации для учителей, подготовленные на основе анализа типичных ошибок участников ЕГЭ 2024 года по биологии. – М.: ФИПИ, 2024. – 44 с. URL: [Электронный ресурс] Режим доступа: https://doc.fipi.ru/ege/analiticheskie-i-metodicheskie-materialy/2024/bi_mr_2024.pdf?ysclid=m4estwz3ex29991715 (дата обращения: 02.12.2024).
2. Федеральная рабочая программа среднего общего образования: биология (углубленный уровень) [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://edsoo.ru> (дата обращения: 07.12.2024).
3. *Гончаров О.В.* Генетика. Задачи. – Саратов: Лицей, 2005. – 352 с. (Серия «Биология»).
4. *Паршутина Л.А.* Естествознание. Биология. Практикум: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / Л.А. Паршутина. -М.: Издательский центр «Академия», 2021. – 131 с.
5. *Пименов А.В.* Уроки биологии в 11 классе. Развернутое планирование/Академия развития, Академия Холдинг, 2003. – 272 с.
6. *Петунин О.В.* Уроки биологии в 11-м классе. Развернутое планирование – Ярославль: Академия развития, Академия Холдинг, 2003. – 304 с.: ил. – (учитель года России).