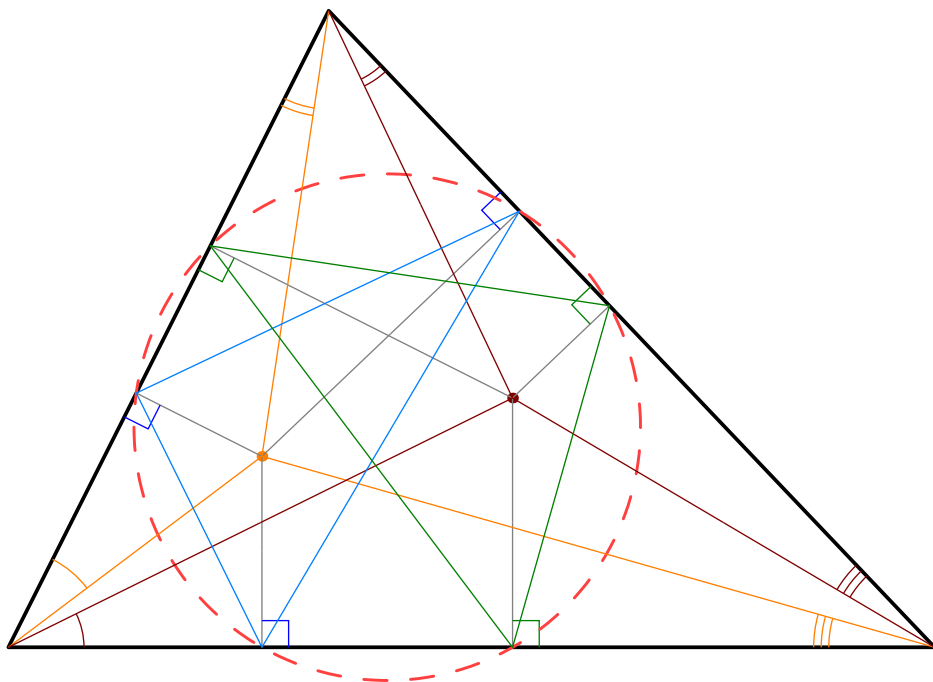


# Топ-5 теорем, которые не помогут построить дом (с решениями)

Направление точных наук

Лунёв Егор (@egorrshuk)



Место под соснами  
Лето, 2024



## Аннотация

Доказательство перпендикулярности – это очень частое явление в задачах. Поэтому на этом факультативе мы будем учиться проверять перпендикулярность прямых разными способами: счет углов, поиск ортоцентра, свойства ортоцентра, прямая Симсона, задача 255, ортодиагональные четырехугольники, радикальные оси, ортологичные треугольники и другие..

Чтобы понять каждую тему, нужно лишь владеть знаниями о вписанных четырехугольниках, т.е. после окончания восьмого класса вы сможете понять данный материал, если изучили эту тему. В каждой главе есть секция с задачами на эту тему. Сложность задач примерно ( $\approx$ ) возрастает ( $\uparrow$ ). Задачи, разделенные горизонтальной коричнево-зеленой чертой, относятся к разным темам. Все хорошие, всех люблю, приходите! ♥



Содержание

<b>1</b>	<b>Счет углов</b>	<b>2</b>
	Задачи . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Свойства ортоцентра</b>	<b>7</b>
	2.1 Симметрии ортоцентра . . . . .	7
	2.2 Остальные свойства ортоцентра . . . . .	9
	2.3 Окружность Эйлера . . . . .	10
	Задачи . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Ортодиагональные четырёхугольники</b>	<b>16</b>
	Задачи . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Радикальная ось и линия центров</b>	<b>20</b>
	4.1 Степень точки . . . . .	20
	4.2 Радикальная ось . . . . .	21
	Задачи . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Известные конструкции</b>	<b>30</b>
	5.1 Прямая Симсона . . . . .	30
	5.2 Задача №255 . . . . .	31
	Задачи . . . . .	32
<b>A</b>	<b>Анкета</b>	<b>i</b>
<b>B</b>	<b>Заметки</b>	<b>ii</b>

# 1 Счет углов

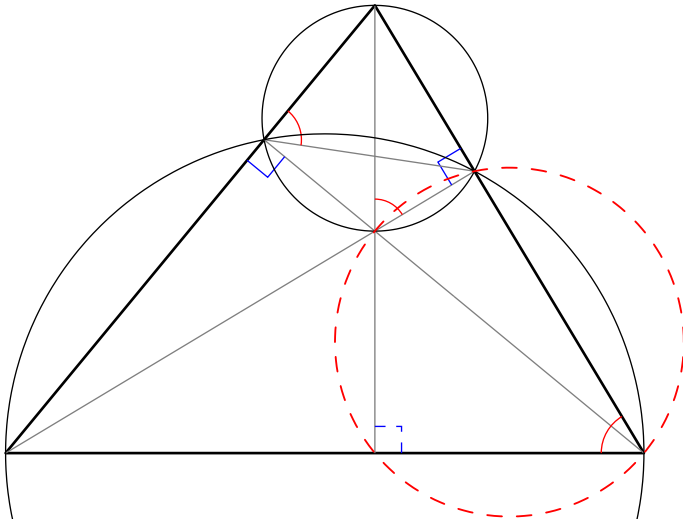
скажи им, что нужно быть  
счастливыми и что главное стать  
хорошим человеком

---

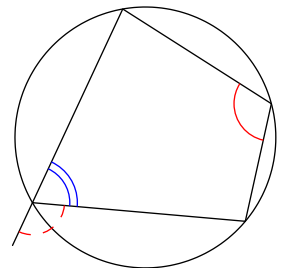
дед всегда прав

Это самое базовое, что можно сделать, чтобы доказать перпендикулярность: просто посчитать углы, и из этого сделать вывод (какой-то угол будет равен  $90^\circ$ ).

**Теорема 1.1.** *Высоты треугольника конкурентны<sup>1</sup>.*



**Лемма 1.2.** *Четырехугольник  $ABCD$  является вписанным, если  $\angle ABC$  равен смежному углу  $\angle ADC$ .*




---

<sup>1</sup>Пересекаются в одной точке.

## Задачи

Было тяжело подобрать задачи, в которых требуется исключительно доказательство перпендикулярности; поэтому тут задачи, которые в целом хорошо делаются счетом углов, а не только на ортогональность.

1. (Лемма Фусса) Окружности  $\omega_1$  и  $\omega_2$  пересекаются в точках  $A$  и  $B$ . Через точку  $A$  проведена прямая вторично пересекающая окружность  $\omega_1$  в точке  $A_1$  и окружность  $\omega_2$  в точке  $A_2$ . Точки  $B_1$  и  $B_2$  для прямой через точку  $B$  определяются аналогично. Докажите, что  $A_1B_1 \parallel A_2B_2$ .  $\bigcirc$

**Решение:** По лемме 1.2  $\angle B_1A_1A = \angle ABB_2 = 180^\circ - \angle B_2A_2A \Rightarrow \angle B_1A_1A_2 + \angle B_2A_2A_1 = 180^\circ \Rightarrow A_1B_1 \parallel A_2B_2$ .

2. В равнобедренном треугольнике  $ABC$  ( $AB = AC$ ) на меньшей дуге  $AB$  окружности  $(ABC)$  взята точка  $D$ . На продолжении отрезка  $AD$  за точку  $D$  выбрана точка  $E$  так, что точки  $A$  и  $E$  лежат по одну сторону относительно прямой  $BC$ . Окружность  $(BDE)$  пересекает прямую  $AB$  в точке  $F$ . Докажите, что  $EF \parallel BC$ .

**Решение:** По задаче 1  $E$  и  $F$  – вторые точки пересечения окружности  $(BDE)$  с прямыми  $AD$  и  $AB$  соответственно. Тогда прямая  $EF$  параллельна касательной к  $(ABC)$  в точке  $A$ . И уже эта касательная параллельна  $BC$ , тогда и  $EF$  тоже.

3. В трапеции  $ABCD$  проведена окружность, проходящая через точки  $A$  и  $D$ . Окружность пересекает боковые стороны  $AB$  и  $CD$  (или их продолжения) в точках  $N$  и  $M$  соответственно. Докажите, что если точка пересечения прямых  $BM$  и  $CN$  равноудалена от точек  $A$  и  $D$ , то она лежит на окружности.  $\bigcirc$

**Решение:**  $AD \parallel BC$ , тогда по обратной задаче 1  $NBCM$  – вписанный. Тогда  $\angle BNC = \angle BMC$ . По обратной лемме 1.2 для четырехугольников  $ANPD$  и  $APMD$   $\angle BNC = \angle PDA$  и  $\angle BMC = \angle PAD$ . Отсюда следует, что треугольник  $APD$  – равнобедренный, а значит  $P$  равноудалена от  $A$  и  $D$ .

4. В остроугольном треугольнике  $ABC$  на высоте, проведенной из вершины  $A$ , выбрана точка  $P$ . Пусть  $B_1$  и  $C_1$  – проекции точки  $P$  на прямые  $AC$  и  $AB$  соответственно.

(а) Докажите, что точки  $B, C, B_1, C_1$  концикличны.  $\bigcirc$

**Решение:** Пусть точка  $D$  – основания высоты из вершины  $A$ . Тогда  $BDPC_1$  и  $AC_1PB_1$  – вписанные четырехугольники. По лемме 1.2  $\angle ABC = \angle APC_1$  и  $\angle APC_1 = \angle AB_1C_1$ . Тогда по обратной лемме 1.2  $BCC_1B_1$  – вписанный четырехугольник.

- (b) Докажите, что отрезок, соединяющий проекции точек  $B_1$  и  $C_1$ , на прямые  $AB$  и  $AC$  соответственно, параллелен стороне  $BC$ .

**Решение:** По задаче 4a  $BCC_1B_1$  – вписанный, а также  $B_1C_1C_2B_2$  ( $B_1C_1$  – диаметр). Тогда по лемме 1.2  $\angle ABC = \angle AB_1C_1 = \angle AC_2B_2 \Rightarrow B_2C_2 \parallel BC$ .

5. В остроугольном треугольнике  $ABC$  проведена высота  $AD$ . Пусть точки  $K$  и  $L$  – проекции точки  $D$  на стороны  $AB$  и  $AC$  соответственно. Известно, что  $\angle BAC = 72^\circ$ ,  $\angle ABL = 30^\circ$ . Чему равен угол  $\angle DKC$ ?

**Решение:** По задаче 4a  $BCLK$  – вписанный, тогда  $\angle ABL = \angle LCK$ .  $\angle DKC = \angle BDK - \angle DCK$ .  $\angle BDK = \angle BAD$  (углы при высоте прямоугольного треугольника).  $\angle DCK = \angle ACD - \angle LCK = 90^\circ - \angle CAD - \angle LCK = 90^\circ - \angle CAD - \angle ABL$ .  $\angle DKC = \angle BAD - 90^\circ + \angle CAD + \angle ABL = \angle BAC + \angle ABL - 90^\circ = 72^\circ + 30^\circ - 90^\circ = 12^\circ$ .

6. (Окружность Тейлора) Докажите, что шесть точек в виде шести проекций трёх оснований высот треугольника, пересекающих каждую сторону, на две оставшиеся стороны лежат на одной окружности.

**Решение:** Пусть точки  $H_a$ ,  $H_b$  и  $H_c$  – основания высот из соответствующих вершин треугольника  $ABC$ . Пусть  $B_a$  и  $C_a$  – проекции точки  $H_a$  на прямые  $AB$  и  $AC$  соответственно. Точки  $A_b$ ,  $C_b$ ,  $A_c$  и  $B_c$  определяются аналогично. Тогда по задаче 4a  $BCB_aC_a$  – вписанный. Тогда по лемме 1.2  $\angle ACB = \angle AC_aB_a$ . По задаче 4b  $AB \parallel A_bB_a \Rightarrow \angle AC_aB_a = \angle A_bB_aC_a$ , и  $AC \parallel A_cC_a \Rightarrow \angle ACB = \angle A_cC_aB$ . Тогда по обратной лемме 1.2  $A_cA_bB_aC_a$  – вписанный. Аналогично  $B_aB_cC_bA_b$  и  $C_bC_aA_cB_c$  – вписанные. Тогда и  $A_cA_bB_aB_cC_bC_a$  – вписанный, т.к. точки лежат на сторонах треугольника (строго позже).

7. (a) (Точка Микеля треугольника) На сторонах  $AB$ ,  $BC$  и  $AC$  треугольника  $ABC$  или их продолжениях, выбраны точки  $C_1$ ,  $B_1$  и  $A_1$  соответственно. Докажите, что окружности  $(AB_1C_1)$ ,  $(A_1BC_1)$  и  $(A_1B_1C)$  пересекаются в одной точке.  $\bigcirc$

**Решение:** Пусть  $(AB_1C_1) \cap (A_1BC_1) = P$ . Будем доказывать, что  $P \in (A_1B_1C)$ . По лемме 1.2  $\angle BC_1P = \angle CA_1P = \angle AB_1P$ . Отсюда по обратной лемме 1.2 точки  $A_1, B_1, C$  и  $P$  концикличны.

- (б) (Точка Микеля четырехсторонника) На плоскости даны четыре прямые общего положения. Эти прямые образуют 4 треугольника. Докажите, что описанные окружности этих треугольников пересекаются в одной точке. ○

**Решение:** Пусть на первой прямой лежат точки  $A, F$  и  $B$ , на второй  $B, D$  и  $C$ , на третьей  $C, A$  и  $E$  и на четвертой  $E, D$  и  $F$ . Тогда по задаче 7а для  $\triangle ABC$  и точек  $F, D$  и  $E$

$$(AFE) \cap (BFD) \cap (CDE) = M. \quad (1)$$

По задаче 7а для  $\triangle AFE$  и точек  $B, D$  и  $C$

$$(ABC) \cap (FBD) \cap (EDC) = G. \quad (2)$$

Но по уравнениям (1) и (2)  $G \equiv M$ . Отсюда следует, что все нужные окружности пересекаются в одной точке.

8. В треугольнике  $ABC$  точки  $B_1$  и  $C_1$  – основания высот, проведенных из вершин  $B$  и  $C$  соответственно. Точка  $D$  – проекция точки  $B_1$  на сторону  $AB$ , точка  $E$  – пересечения перпендикуляра, опущенного из точки  $D$  на сторону  $BC$ , с отрезком  $BB_1$ . Докажите, что  $EC_1 \perp BB_1$ .

**Решение:** Нужно доказать, что  $DC_1EB_1$  – вписанный, тогда утверждение верно.  $B_1EFC$  – вписанный, тогда по лемме 1.2  $\angle B_1CF = \angle B_1ED$ . Также  $BCC_1B_1$  – вписанный, тогда, опять же, по лемме 1.2  $\angle BCB_1 = \angle B_1C_1D$ . Тогда, раз  $\angle B_1ED = \angle B_1ED = \angle B_1C_1D$ , то  $DC_1EB_1$  – вписанный.

9. На гипотенузе  $AC$  прямоугольного треугольника  $ABC$  во внешнюю сторону построен квадрат с центром в точке  $O$ . Докажите, что  $BO$  – биссектриса угла  $ABC$ . ○

**Решение:**

**Лемма 1.3.** Если в четырехугольнике  $ABCD$ ,  $AC$  – биссектриса угла  $A$  и  $BC = CD$ , то этот четырехугольник либо вписанный, либо дельтоид.

$ABCO$  – вписанный, т.к.  $\angle B = \angle O = 90^\circ$ .  $AO = OC$ , т.к. это половины диагоналей квадрата. Тогда  $BO$  – биссектриса угла  $ABC$ .

10. В треугольнике  $ABC$  угол  $A$  равен  $60^\circ$ . Биссектрисы треугольника  $BB_1$  и  $CC_1$  пересекаются в точке  $I$ . Докажите, что  $IB_1 = IC_1$ . ○



**Решение:**

**Лемма 1.4.** Если в треугольнике  $ABC$ , точка  $I$  – инцентр, то

$$\angle AIC = 90^\circ + \frac{1}{2}\angle ABC$$

По лемме 1.4  $\angle BIC = 90^\circ + \frac{1}{2}\angle BAC = 90^\circ + 30^\circ = 120^\circ$ . Тогда  $AB_1IC_1$  – вписанный.  $AI$  – биссектриса, поэтому  $IB_1 = IC_1$ .

11. Прямая  $\ell$  касается описанной окружности треугольника  $ABC$  в точке  $B$ . Точки  $A_1$  и  $C_1$  – проекции точки  $P \in \ell$  на прямые  $AB$  и  $BC$  соответственно. Докажите, что  $A_1C_1 \perp AC$ .  $\bigcirc$

**Решение:**

**Лемма 1.5.** Угол между касательной и хордой окружности, равен половине градусной меры дуги, стягиваемой данной хордой.

**Следствие 1.5.1.** Если к окружности  $(ABC)$  провели касательную  $BK$ , то:  $\angle BAC = \angle CBK$ .

По следствию 1.5.1  $\angle PBA_1 = \angle BAC$ .  $PC_1BA_1$  – вписанный, поэтому  $\angle PC_1A_1 = \angle PBA_1$ .

$\angle PC_1A_1 + \angle A_1C_1B = 90^\circ = \angle BAC + \angle(AB, A_1C_1) \Rightarrow AC \perp A_1C_1$ .

12. Окружности  $\omega_1$  и  $\omega_2$  пересекаются в точках  $A$  и  $B$ . Прямая  $\ell$  касается окружностей  $\omega_1$  и  $\omega_2$  в точках  $P$  и  $Q$  соответственно (точка  $B^1$  лежит внутри треугольника  $APQ$ ). Прямая  $BP$  вторично пересекает  $\omega_2$  в точке  $T$ . Докажите, что  $AQ$  – биссектриса угла  $\angle PAT$ .  $\bigcirc$

**Решение:** По следствию 1.5.1 для прямой  $PQ$  и окружностей  $\omega_1$  и  $\omega_2$   $\angle BPQ = \angle BAP$  и  $\angle BQP = \angle BAQ$ . Тогда угол  $TBQ = \angle BAQ + \angle BAP = \angle PAQ$  (внешний в треугольнике  $BPQ$ ).

Так как  $BQTA$  – вписанный, то  $\angle TBQ = \angle TAQ = \angle PAQ$ . Тогда и получается, что  $AQ$  – биссектриса угла  $PAT$ .

13. Пусть  $AA_1$ ,  $BB_1$  и  $CC_1$  – высоты остроугольного треугольника  $ABC$ . Докажите, что проекции точки  $A_1$  на прямые  $AB$ ,  $AC$ ,  $BB_1$ ,  $CC_1$  коллинеарны.  $\bigcirc$

<sup>1</sup>Точка  $B$  называется точкой Шалтая треугольника  $APQ$ .

**Решение:** Докажем, что проекции на  $AB$ ,  $BB_1$  и  $CC_1$  коллинеарны. Аналогично будет следовать, что и проекция на  $AC$  лежит на этой прямой. Пусть  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  – проекции на  $AB$ ,  $BB_1$  и  $CC_1$  соответственно, а  $H$  – ортоцентр. Тогда по задаче 4а и лемме 1.2  $\angle BCH = \angle HYZ$ .  $CH \parallel A_1X$ , поэтому  $\angle BCH = \angle BA_1X$ . Т.к.  $BXYA_1$  – вписанный, то  $\angle BA_1X = \angle BYX$ . Получили, что  $\angle BYX = \angle HYZ$  – вертикальные углы, значит  $Y \in XZ$ .

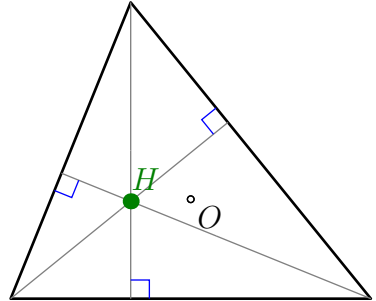
14. В треугольнике  $ABC$  точки  $D$  и  $E$  – основания биссектрис из углов  $A$  и  $C$  соответственно, а точка  $I$  – центр вписанной в треугольник  $ABC$  окружности. Точки  $P$  и  $Q$  – пересечения прямой  $DE$  с  $(AIE)$  и  $(CID)$  соответственно, причем  $P \neq E, Q \neq D$ . Докажите, что  $\angle EIP = \angle DIQ$ .

**Решение:** Т.к.  $AEPI$  и  $CQDI$  – вписанные, то  $\angle PIE = \angle PAE$  и  $\angle DIQ = \angle DCQ$ . Пусть точка  $T$  – пересечение прямых  $AP$  и  $CQ$ . Тогда нужно доказывать, что  $APTC$  – вписанный.  
Пусть  $\angle ABC = 2\beta$ , тогда по лемме 1.4  $\angle AIC = 90^\circ + \frac{1}{2}\angle ABC = 90^\circ + \beta$ , тогда внешние углы  $PIA$  и  $DIA$  равны  $90^\circ - \beta$ .  
По лемме 1.2 для четырехугольников  $AEPI$  и  $CQDI$   $\angle PIA = \angle TPQ$  и  $\angle DIA = \angle TQP$ . Тогда  $\angle PTQ = 180^\circ - 2(90^\circ - \beta) = 2\beta = \angle ABC$ . Тогда  $APTC$  – вписанный.

## 2 Свойства ортоцентра

**Определение 2.1.** Ортоцентр ( $H$ ) – это точка пересечения высот треугольника.

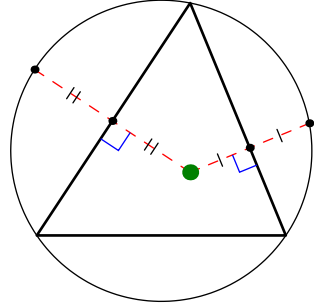
Я всегда буду ортоцентр треугольника  $ABC$  обозначать **большой зеленой точкой** (просто я так решил), а центр описанной окружности как выколотую (так уже более принято).



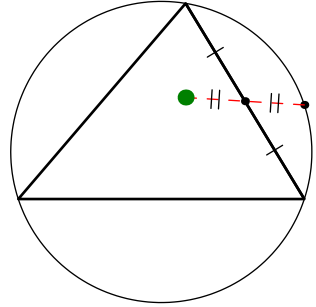
### 2.1 Симметрии ортоцентра

Ортоцентр – это такая особенная точка: конструкции, в которых используются его **симметрии** относительно чего-либо, **замечательно** связаны с описанной окружностью, и наоборот!

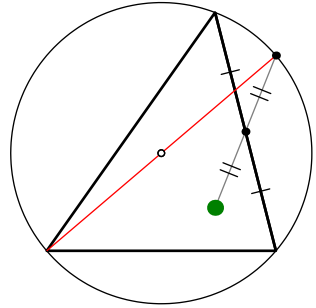
**Теорема 2.1.** Если отразить ортоцентр относительно стороны, то он попадет на описанную окружность.



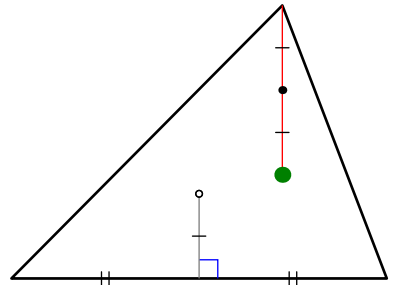
**Теорема 2.2.** Если ортоцентр отразить относительно середины стороны, то он попадет на описанную окружность.



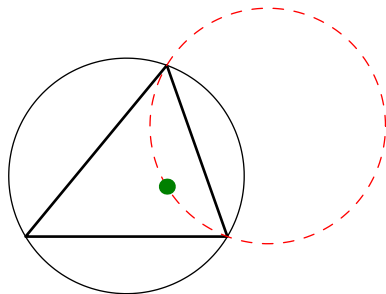
**Следствие 2.2.1.** Точка из теоремы 2.2 диаметрально противоположна противоположной стороне вершине.



**Следствие 2.2.2.** Расстояние от вершины треугольника до ортоцентра в 2 раза больше расстояния от центра описанной окружности до противоположной стороны.

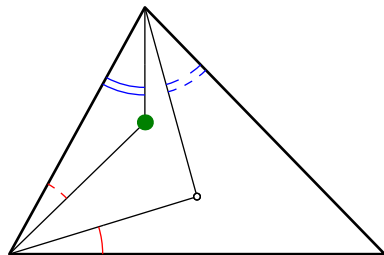


**Лемма 2.3** (Окружность Джонсона).  $(ABC) = (ABH)$ , т.е. окружности, описанные вокруг  $\triangle ABC$  и  $\triangle ABH$  равны.



**Определение 2.2** (Изогональное сопряжение<sup>1</sup>). Точки  $P$ ,  $Q$  называются изогонально сопряженными, если  $\angle PAB = \angle QAC$ ,  $\angle PBC = \angle QBA$ ,  $\angle PCB = \angle QCA$ .

**Теорема 2.4.** Ортоцентр и центр описанной окружности изогонально сопряжены.

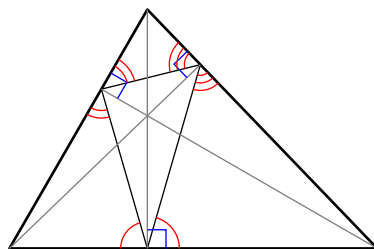


## 2.2 Остальные свойства ортоцентра

**Определение 2.3.** Инцентр – это центр, вписанной в многоугольник окружности.

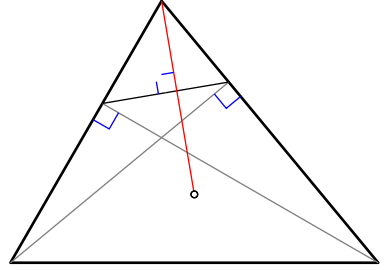
**Определение 2.4.** Ортотреугольник – это треугольник, вершины которого являются основаниями высот исходного треугольника.

**Лемма 2.5.** Ортоцентр является инцентром для ортотреугольника.

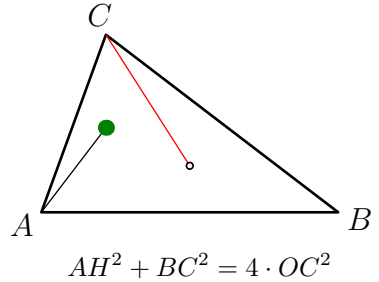


<sup>1</sup>Можно думать об изогональном сопряжении, как о симметрии относительно биссектрисы.

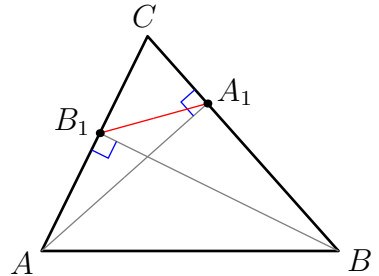
**Следствие 2.5.1.** Радиусы описанной окружности, проведённые к вершинам треугольника, перпендикулярны соответствующим сторонам ортотреугольника.



**Лемма 2.6.** Сумма квадратов расстояния от вершины треугольника до ортоцентра и длины стороны, противолежащей этой вершине, равна квадрату диаметра описанной окружности.



**Лемма 2.7.** Если  $AA_1$  и  $BB_1$  – высоты треугольника  $ABC$ , то  $\triangle ABC \sim \triangle A_1B_1C$ ,  $k = \cos \angle C$ .



## 2.3 Окружность Эйлера

Давайте соединим пару свойств, которые мы уже знаем (а именно по теоремам 2.1 и 2.2) и сделаем парочку незамысловатых размышлений. Получим *окружность Эйлера* или *окружность девяти точек*.

**Определение 2.5** (Окружность Эйлера). Окружностью Эйлера называют окружность, проходящую через основания высот, середины сторон и середины отрезков, соединяющих вершины с ортоцентром треугольника.

**Определение 2.6** (Прямая Эйлера). Точки  $O, O_9, H, M$  лежат на одной прямой, называемой прямой Эйлера.

**Теорема 2.8.** *Отрезки на прямой Эйлера хорошо относятся.*

$$\overrightarrow{O_9M} : \overrightarrow{MO} : \overrightarrow{OH} = 1 : 2 : (-3)$$

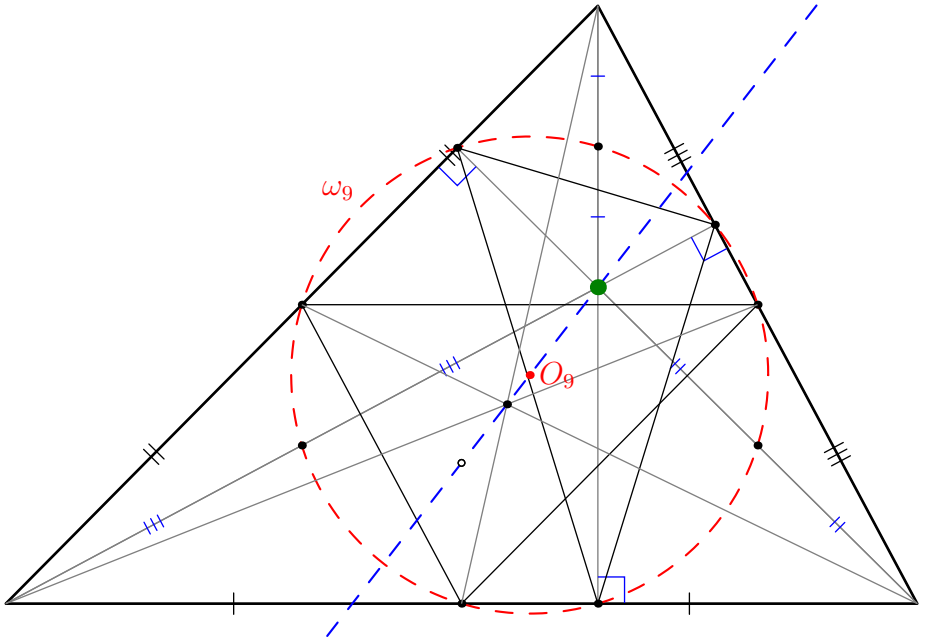


Рис. 1: Окружность Эйлера и прямая Эйлера.

## Задачи

15. В треугольнике  $ABC$  проведены высоты  $BB_1$  и  $CC_1$ , а также отмечена точка  $M$  – середина стороны  $BC$ . Точка  $H$  – его ортоцентр, а точка  $P$  – пересечения луча (!)  $MH$  с окружностью  $(ABC)$ . Докажите, что точки  $P, A, B_1, C_1$  концикличны. ○

**Решение:** Отметим вторую точку пересечения  $Q$  окружности  $(ABC)$  с прямой  $MH$ . Тогда по следствию 2.2.1  $AQ$  – диаметр, а значит  $\angle APQ = 90^\circ$ . Тогда  $P, A, C_1, B_1, H$  концикличны, т.к. лежат на окружности с диаметром  $AH$ .

16. Во вписанном четырехугольнике  $ABCD$  точка  $P$  – точка пересечения диагоналей  $AC$  и  $BD$ . Точка  $O$  – центр окружности  $(ABP)$ . Докажите, что  $OP \perp CD$ .  $\bigcirc$

**Решение:** Т.к.  $ABCD$  – вписанный, то  $\triangle BAP \sim \triangle CPD$  (по двум углам). Тогда если  $O_1$  – центр окружности  $(CPD)$ , то  $\angle APO = \angle DPO_1$ . По теореме 2.4 в треугольнике  $CPD$ , если  $H_1$  – его ортоцентр,  $\angle DPO_1 = \angle CPH_1$ . Тогда точки  $O, P, H$  – коллинеарны, т.к.  $\angle CPH = \angle APO$  (вертикальные). А значит  $OP \equiv PH \perp CD$ .

17. (Муниципальный этап ВСОШ (Москва), 2020, 9.4) Пусть точки  $B$  и  $C$  лежат на полуокружности с диаметром  $AD$ . Точка  $M$  – середина отрезка  $BC$ . Точка  $N$  такова, что точка  $M$  – середина отрезка  $AN$ , докажите что  $BC \perp ND$ .  $\bigcirc$

**Решение:**  $ABNC$  – параллелограмм. Тогда раз  $AD$  – диаметр, то  $AB \perp BD$  и  $AC \perp CD$ . Но  $AB \parallel CN$  и  $AC \parallel BN$ . Тогда  $BD \perp CN$  и  $CD \perp BN$ . Значит  $C$  – ортоцентр треугольника  $BND$ , а значит  $BC \perp ND$ .

18. В треугольнике  $ABC$  проведена высота  $AD$  и отмечен центр описанной окружности –  $O$ . Пусть точки  $E$  и  $F$  – проекции точек  $B$  и  $C$  на прямую  $AO$ .  $N$  – точка пересечения прямых  $AC$  и  $DE$ , а  $M$  – точка пересечения прямых  $AB$  и  $DF$ . Докажите, что точки  $A, D, N, M$  конциклически.

**Решение:** Пусть точка  $A'$  – диаметрально противоположна  $A$ . Тогда  $\angle ACA' = \angle ABA' = 90^\circ$ , откуда  $\angle CA'A = \angle ACF$  и  $\angle BA'A = \angle ABE$ . Т.к.  $ABDE$  и  $ADFC$  – вписанные и по лемме 1.2  $\angle ABE = \angle ADN$  и  $\angle ACF = \angle ADM$ . Тогда  $\angle NDM = \angle BA'C$ , а значит  $ADNM$  – вписанный, раз  $ABA'C$  был вписанным.

19. (Baltic Way, 2019, problem 12) Let  $ABC$  be a triangle and  $H$  its orthocenter. Let  $D$  be a point lying on the segment  $AC$  and let  $E$  be the point on the line  $BC$  such that  $BC \perp DE$ . Prove that  $EH \perp BD$  if and only if  $BD$  bisects  $AE$ .  $\bigcirc$

**Решение:** Докажем в одну сторону, что если  $BD$  разделила  $AE$  пополам, то  $EH \perp BD$ . Пусть  $X$  – точка пересечения  $AH$  и  $DE$  Тогда раз  $AH \equiv AX \perp BC \wedge DE \perp BC \Rightarrow AH \parallel DE$  и  $BD \equiv XB$  делит  $AE$  пополам, то значит  $AXED$  – параллелограмм, откуда  $XE \parallel AD$ . А раз  $XE \parallel AD \wedge AD \perp BH$ , значит  $X$  – ортоцентр треугольника  $BHE$ , а значит  $BX \equiv BD \perp EH$ .

20. Докажите теорему об окружности девяти точек с помощью леммы о трезубце и внешней леммы о трезубце.

**Решение:**

**Лемма 2.9** (Лемма о трезубце). В треугольнике  $ABC$  точка  $I$  – инцентр,  $I_a$  – эсцентр точки  $A$ ,  $L$  – пересечение отрезка  $II_a$  с окружностью  $(ABC)$ . Тогда  $L$  равноудалена от  $B, C, I, I_a$ .

**Определение 2.7** (Эксцентр). Эксцентром- $A$  ( $I_a$ ) называется центр вневписанной в треугольник  $ABC$  окружности, которая касается стороны  $BC$  и касается продолжений сторон  $AB$  и  $AC$ .

**Лемма 2.10** (Внешняя лемма о трезубце). В треугольнике  $ABC$  точка  $I_b$  – эсцентр точки  $B$ ,  $I_c$  – эсцентр точки  $C$ ,  $L$  – пересечение отрезка  $I_b I_c$  с окружностью  $(ABC)$ . Тогда  $L$  равноудалена от  $B, C, I_b, I_c$ .

Вспомним, что по лемме 2.5  $H$  – инцентр ортотреугольника. Также заметим что  $A, B, C$  – эсцентры ортотреугольника. Тогда по лемме 2.9 середины отрезков, соединяющим ортоцентр с вершинами лежат на описанной окружности ортотреугольника.

По лемме 2.10 середины сторон треугольника лежат на описанной окружности ортотреугольника.

21. (а) Докажите, что треугольники  $ABC, HBC, AHC$  и  $ABH$  имеют общую окружность девяти точек. ○

**Решение:** Для треугольников, содержащих ортоцентр исходного как вершину, стороны – отрезки от ортоцентр до вершин исходного.

- (б) Докажите, что прямые Эйлера треугольников  $ABC, HBC, AHC$  и  $ABH$  пересекаются в одной точке.

**Решение:** Да, каждая прямая Эйлера содержит в себе центр окружности девяти точек.

- (с) Докажите, что центры описанных окружностей треугольников  $ABC, HBC, AHC$  и  $ABH$  образуют четырехугольник, симметричный четырехугольнику  $HABC$ . ○



**Решение:** По теореме 2.8  $O_9H = HO$ . Тогда можно сделать центральную симметрию  $S$  с центром в точке  $O_9$ .

$$S : \left\{ \begin{array}{l} H \leftrightarrow O \\ A \leftrightarrow O_a \\ B \leftrightarrow O_b \\ C \leftrightarrow O_c \end{array} \right| \Rightarrow S : HABC \leftrightarrow OO_aO_bO_c. \quad (1)$$

22. Высоты  $BD$  и  $CE$  треугольника  $ABC$  пересекаются в точке  $H$ . Продолжения сторон  $AB$  и  $AC$  пересекают окружность  $BHC$  в точках  $P$  и  $Q$ . Докажите, что отрезок  $PQ$  в два раза больше отрезка  $DE$ .  $\bigcirc$

**Решение:**

**Определение 2.8.** Гомотетией  $\mathcal{H}_O^k$  с центром в точке  $O$  и коэффициентом  $k \neq 0$  называется преобразование плоскости или пространства. Переводящее точку  $P$  в точку  $P'$ , так что  $\overrightarrow{OP'} = k\overrightarrow{OP}$ . Свойства гомотетии:

- (a) Это *конформное* преобразование. (сохраняющие углы между кривыми).
- (b) Параллельные прямые переходят в параллельные.
- (c) Фигуры переходят в подобные.

Сделаем гомотетию  $\mathcal{H}_A^{1/2}$ .

$$\mathcal{H}_A^{1/2} : \left\{ \begin{array}{l} B \mapsto M_c \\ C \mapsto M_b \\ H \mapsto T_a \end{array} \right| \Rightarrow (BHC) \mapsto (M_cM_bT_a). \quad (1)$$

$(M_cM_bT_a)$  – окружность Эйлера  $\triangle ABC$ . Тогда по определению 2.5  $D, E \in (M_cM_bT_a)$ . Образами этих точек были вторые точки пересечения  $(BHC)$  с прямыми  $AC$  и  $AB$ , т.е. точки  $P$  и  $Q$ . А значит  $PQ \parallel DE$  и  $PQ = 2DE$ .

23. (Заключительный этап ВСОШ, 2015, 9.7) Остроугольный треугольник  $ABC$  ( $AB < AC$ ) вписан в окружность  $\omega$ . Пусть  $M$  – его центроид<sup>1</sup>, а  $D$  – основании высоты, опущенной из вершины  $A$ . Луч  $MD$  пересекает  $\omega$  в точке  $E$ . Докажите, что окружность  $(BDE)$  касается  $AB$ .  $\bigcirc$

<sup>1</sup>Точка пересечения медиан.

**Решение:** Пусть  $\omega_9$  – окружность Эйлера треугольника  $ABC$ , тогда сделаем гомотетию  $\mathcal{H}_M^{-2}$ . Очевидно, что  $\omega_9$  перейдет в  $\omega$ , точка  $D \in \omega_9$  перейдет в точку  $F$  – пересечение луча  $DM$  и  $\omega$ . По задаче 22b прямая  $BC$  перейдет в прямую  $AF$ , параллельную исходной. Тогда четырехугольник  $BAFC$  – равнобокая трапеция, в которой  $\angle ABC = \angle FCB$ . А также, т.к.  $E \in (BAFC)$ , то  $\angle FCB = \angle FEB$ , тогда по обратному следствию 1.5.1 ( $BDE$ ) касается  $AB$ .

24. (Высшая проба, 2013, 9.5) Пусть  $AA_1$ ,  $BB_1$  и  $CC_1$  – высоты остроугольного треугольника  $ABC$ . На стороне  $AB$  выбрана точка  $P$  так, что окружность  $(PA_1B_1)$  касается стороны  $AB$ . Найдите  $PC_1$ , если  $PA = 30$  и  $PB = 10$ .

**Решение:** Пусть точка  $D$  – пересечение прямых  $AB$  и  $A_1B_1$ . Точки  $A$ ,  $B$ ,  $A_1$ ,  $B_1$  лежат на одной окружности с диаметром  $AB$ . Тогда по теореме 4.3  $BD \cdot AD = DA_1 \cdot DA_2$ , а также  $DP^2 = DA_1 \cdot DB_1$ , отсюда

$$\left\{ \begin{array}{l} BD \cdot AD = DP^2 \\ BD = x \\ AD = x + 40 \\ DP = x + 10 \end{array} \right. \Rightarrow x(x + 40) = (x + 10)^2 \Rightarrow x = 5. \quad (1)$$

Также через точки  $A_1$  и  $B_1$  проходит окружность Эйлера треугольника  $ABC$ , которая содержит точку  $M$  (середину отрезка  $AB$ ). Можно сказать, что прямая  $A_1B_1$  является радикальной осью окружностей  $(PA_1B_1)$ ,  $(ABA_1B_1)$  и окружности Эйлера треугольника  $ABC$ . Опять же по теореме 4.3

$$\begin{aligned} DM \cdot DC_1 &= DA_1 \cdot DB_1 = DA \cdot DB = 45 \cdot 5. \\ DC_1 &= \frac{45 \cdot 5}{5 + \frac{10+30}{2}} = 9, \quad PC_1 = DP - DC_1 = 15 - 9 = 6. \end{aligned} \quad (2)$$

25. Треугольник отсекает на своей окружности Эйлера три туги. Докажите, что одна из этих дуг равна сумме двух других. ○

**Решение:**

**Лемма 2.11.** Если  $\widehat{AB}$  и  $\widehat{CD}$  – меньшие дуги окружности  $\omega$ , тогда если  $P$  – точка пересечения  $AC$  и  $BD$ , то

$$\angle APB = \frac{\widehat{AB} + \widehat{CD}}{2}.$$

Пусть в треугольнике  $ABC$  сторона  $BC$  наибольшая. Пусть  $M_a, M_b, M_c$  – середины сторон  $BC, AC, AB$  треугольника  $ABC$ , а  $H_a, H_b, H_c$  – основания высот из соответствующих вершин, все эти точки лежат на окружности Эйлера треугольника  $ABC$ . По лемме 2.11  $\angle(M_bM_c, H_bH_c) = \frac{\widehat{M_bH_b} + \widehat{M_cH_c}}{2}$ . Тогда можно доказывать, что угол  $\angle(M_bM_c, H_bH_c)$  равен углу  $M_aM_bH_a = \frac{\widehat{H_aM_a}}{2}$ .

$$\begin{aligned} \angle(M_bM_c, H_bH_c) &= \angle(BC, H_bH_c) \\ \angle M_aM_bH_a &= \angle(AB, H_aM_b). \end{aligned} \quad (1)$$

Пусть  $D$  – точка пересечения  $H_cH_b$  и  $BC$ , а  $E$  – точка пересечения  $AB$  и  $M_bH_a$ .

По задаче 4а  $BCH_bH_c$  – вписанный, тогда по лемме 1.2  $\varphi = \angle ABC = \angle AH_cH_b = \angle DH_cB$ .

Также в прямоугольном треугольнике  $AH_aC$  отрезок  $H_aM_b$  – медиана, тогда  $\angle M_bH_aC = \angle BH_aE = \varphi$ . Отсюда следует, что угол  $\angle DH_cE = \angle DH_aE$ , значит  $DH_cH_aE$  – вписанный, и углы  $H_cDB$  и  $H_aEB$  равны, отсюда все следует.

### 3 Ортодиагональные четырёхугольники

**Теорема 3.1.** Диагонали  $AC$  и  $BD$  четырёхугольника  $ABCD$  (выпуклого или не выпуклого) перпендикулярны тогда и только тогда, когда

$$AB^2 + CD^2 = BC^2 + AD^2.$$

#### Задачи

26. Докажите, что высоты треугольника конкурентны. ;)

○

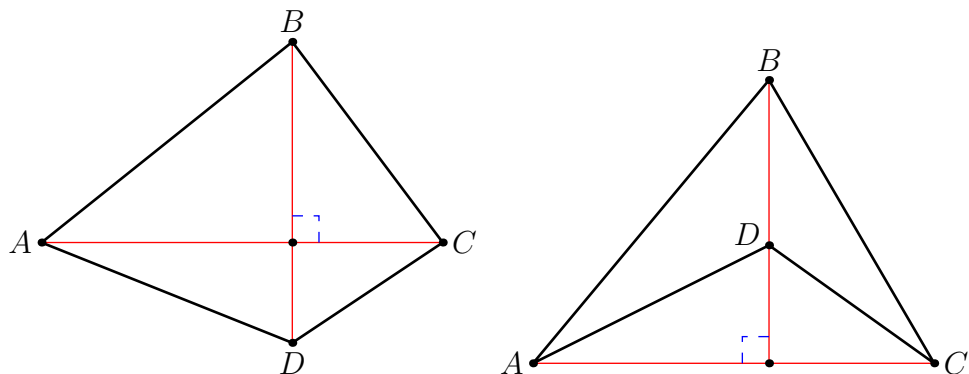


Рис. 2: Ортодиагональные четырёхугольники (выпуклый и невыпуклый).

**Решение:** Пусть  $H$  – точка пересечения высот  $BH_B$  и  $CH_C$ , тогда будем доказывать, что  $AH \perp BC$ .

В четырёхугольнике  $ABCH$   $BH \perp AC$ , значит

$$AB^2 + CH^2 = BC^2 + AH^2. \quad (1)$$

Также в этом четырёхугольнике  $CH \perp AB$ , значит

$$AC^2 + BH^2 = BC^2 + AH^2. \quad (2)$$

По уравнениям (1) и (2)

$$AC^2 + BH^2 = AB^2 + CH^2 \Leftrightarrow AH \perp BC. \quad (3)$$

27. (Муниципальный этап ВСОШ (Москва), 2020, 9.4) Пусть точки  $B$  и  $C$  лежат на полуокружности с диаметром  $AD$ . Точка  $M$  – середина отрезка  $BC$ . Точка  $N$  такова, что точка  $M$  – середина отрезка  $AN$ , докажите что  $BC \perp ND$ .

**Решение:**

**Теорема 3.2** (Пифагора). В прямоугольном треугольнике  $ABC$  ( $C$  – прямой)

$$AC^2 + BC^2 = AB^2$$

$ABNC$  – параллелограмм. Тогда раз  $AD$  – диаметр, то  $AB \perp BD$  и  $AC \perp CD$ . Применим теорему 3.2 для треугольников  $ABD$  и  $ACD$ .

$$AB^2 + BD^2 = AD^2. \quad (1)$$

$$AC^2 + CD^2 = AD^2. \quad (2)$$

Тогда по уравнениям (1) и (2)

$$AC^2 + CD^2 = AB^2 + BD^2. \quad (3)$$

По теореме 3.1  $BC \perp ND \Leftrightarrow BN^2 + CD^2 = BD^2 + NC^2$ . Т.к.  $ABNC$  – параллелограмм, то  $AB = NC$  и  $AC = BN$ . Подставляем в уравнению (3), получаем то, что нужно.

28. (Baltic Way, 2019, problem 13) Let  $ABCDEF$  be a convex hexagon in which  $AB = AF$ ,  $BC = CD$ ,  $DE = EF$  and  $\angle ABC = \angle EFA = 90^\circ$ . Prove that  $AD \perp CE$ .  $\bigcirc$

29. (а) (Теорема Штейнера) Пусть  $ABC$  и  $A_1B_1C_1$  – невырожденные треугольники. Докажите, что перпендикуляры, опущенные из точек  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  на прямые  $BC$ ,  $AC$ ,  $AB$  пересекаются в одной точке тогда и только тогда, когда

$$C_1A^2 + A_1B^2 + B_1C^2 = C_1B^2 + B_1A^2 + A_1C^2.$$

**Решение:** Предположем, что перпендикуляры пересеклись в одной точке  $M$ . Тогда для каждого четырехугольника  $AC_1BM$ ,  $BA_1CM$ ,  $CB_1AM$  выполняется теорема 3.1.

$$\begin{cases} C_1A^2 + BM^2 &= C_1B^2 + AM^2 \\ A_1B^2 + CM^2 &= A_1C^2 + BM^2 \\ B_1C^2 + AM^2 &= B_1A^2 + CM^2 \end{cases} \quad (1)$$

Вычитанием одинаковых слагаемых нужного следующего уравнения.

$$C_1A^2 + A_1B^2 + B_1C^2 = C_1B^2 + B_1A^2 + A_1C^2. \quad (2)$$

- (b) Докажите, что если перпендикуляры, опущенные из точек  $A_1, B_1, C_1$  на прямые  $BC, AC, AB$  пересекаются в одной точке, то и перпендикуляры, опущенные из точек  $A, B, C$  на прямые  $B_1C_1, A_1C_1, A_1B_1$  тоже.<sup>1</sup> ○

**Решение:** Заметим, что при преобразовании  $S : x \leftrightarrow x_1$  уравнение из теоремы 29а переходит в себя.

30. (Теорема об изогональном сопряжении) Чевяны  $AA_1, BB_1, CC_1$  треугольника  $ABC$  пересекаются в одной точке. Докажите, что чевяны, симметричные им относительно биссектрис соответствующих углов, тоже пересекаются в одной точке.<sup>2</sup> ○

**Решение:**

**Определение 3.1** (Педальный треугольник). Педальный (подерный) треугольник точки  $P$  относительно треугольника  $ABC$  – это треугольник, вершинами которого являются проекции точки  $P$  на прямые  $AB, AC$  и  $BC$ .

Пусть  $AA_1 \cap BB_1 \cap CC_1 = P$ . Построим  $P_aP_bP_c$  – педальный треугольник точки  $P$ . Тогда  $P_aP_bP_c \perp ABC$ , а  $P$  – является одним из центров ортологии треугольников  $ABC$  и  $P_aP_bP_c$ . Построим второй центр ортологии  $Q$ . Для этого проведем чевяны  $AA_2 \perp P_bP_c, BB_2 \perp P_aP_c, CC_2 \perp P_aP_b$ . Эти чевяны по задаче 29b пересекаются в точке  $Q$ .

Рассмотрим треугольник  $AP_bP_c$ . В нем  $AQ$  содержит в себе высоту. Точка  $P$  лежит на окружности  $(AP_cP_b)$ , т.к.  $\angle AP_cP = \angle AP_bP = 90^\circ$ , значит точка  $P$  диаметрально противоположна точке  $A$ . По теореме 2.4  $\angle PAB = \angle QAC$ . Аналогично для треугольников  $BP_cP_a$  и  $CP_aP_b$ .

31. Пусть точки  $P$  и  $Q$  – изогонально сопряженные точки треугольника  $ABC$ .  $B_p, C_p$  и  $B_q, C_q$  – перпендикуляры из  $P$  и  $Q$  на прямые  $AC$  и  $AB$  соответственно.

- (a) Докажите, что треугольники  $PB_pC_p$  и  $QB_qC_q$  подобны.

**Решение:** Пусть  $\angle BAP = \angle CAQ = \alpha$ , а  $\angle BAQ = \angle CAP = \beta$ . Четырехугольники  $AB_pPC_p$  и  $AB_qQC_q$  – вписанные (два прямых угла). Поэтому  $\angle C_pAP = \angle PB_pC_p = \alpha$  и  $\angle PAB_p = \angle PC_pB_p = \beta$ . Также  $\angle C_qAQ = \angle QB_qC_q = \alpha$  и  $\angle QAB_q = \angle QC_qB_q = \beta$ .

Так и получается, что в треугольниках  $PB_pC_p$  и  $QB_qC_q$  есть два равных угла  $\alpha$  и  $\beta$ .

<sup>1</sup>Треугольники  $ABC$  и  $A_1B_1C_1$  из задачи называют ортологичными. Пишут  $\triangle ABC \perp \triangle A_1B_1C_1$ . При этом точки пересечения соответствующих перпендикуляров называют центрами ортологии.

<sup>2</sup>Рассмотрите педальный треугольник этой точки.

- (b) Докажите, что вершины педальных треугольников изогонально сопряженных точек лежат на одной окружности. Найдите её центр. ○

**Решение:** По задаче 31a  $\triangle PB_pC_p \sim \triangle QC_qB_q$ . Значит  $\angle AB_pC_p = 90^\circ - \angle PB_pC_p = 90^\circ - \angle QC_qB_q = \angle C_pC_qQ$ , откуда следует, что  $C_pC_qB_qB_p$  – вписанный. Аналогично и  $B_pB_qA_qA_p$ , и  $A_pB_pC_qC_p$  – тоже вписанный.

**Лемма 3.3.** Если на сторонах треугольника  $ABC$  выбраны точки  $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$ . Так, что  $A_1A_2B_1B_2$ ,  $A_1A_2C_1C_2$  и  $B_1B_2C_1C_2$  – вписанные, то  $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$  лежат на одной окружности.

По лемме 3.3 утверждение верно.

32. Углы  $A$  и  $C$  четырехугольника  $ABCD$  равны. Докажите, что середина отрезка  $AC$  и проекции  $D$  на прямые  $AB$ ,  $BC$  и  $AC$  концикличны.

**Решение:**

**Определение 3.2** (Изогональное сопряжение в треугольнике). Изогональным сопряжением в треугольнике  $ABC$  называется преобразование плоскости (проективной)  $\mu : P \rightarrow Q$ , так что

$$\angle ABP = \angle CBQ, \angle BAP = \angle CAQ, \angle BCP = \angle ACQ.$$

Сделаем изогональное сопряжение точки  $D$  в треугольнике  $ABC$ , тогда по определению 3.2  $D \rightarrow D' : \angle ABD = \angle CBD', \angle BAD = \angle CAD', \angle BCD = \angle ACD'$ .  $\angle BCD = \angle BAD \implies \angle ACD' = \angle CAD'$ , значит  $D'$  лежит на серединном перпендикуляре к отрезку  $AC$ .

По задаче 31b проекции точки  $D$  и проекции точки  $D'$  на стороны треугольника  $ABC$  концикличны, а проекции точки  $D'$  на  $AC$  – это ее середина.

## 4 Радикальная ось и линия центров

Не всегда удается "счетом углов" доказать принадлежность четверки точек одной окружности. Часто нужно использовать "счет в отрезках". С этим нам помогает степень точки. А чтобы доказать, что три прямые пересекаются в одной точке, можно сказать что это радикальный центр какой-то тройки окружностей.

### 4.1 Степень точки

**Определение 4.1** (Степень точки). Степень точки  $P$ , находящейся на расстоянии  $d$  от центра окружности  $\omega$  радиусом  $r$ , относительно этой же окружности:

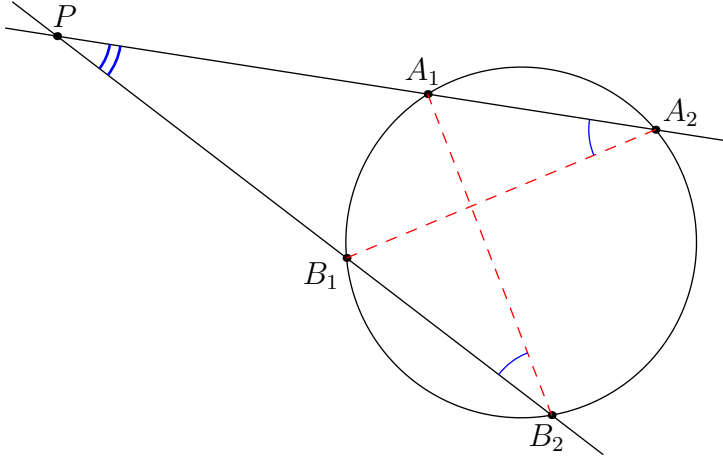
$$\text{pow}(P, \omega) = d^2 - r^2.$$

**Теорема 4.1.** Если прямая  $\ell \ni P$  касается окружность в точке  $K$ , то

$$\text{pow}(P, \omega) = PK^2.$$

**Теорема 4.2.** Если прямая  $\ell \ni P$  пересекает окружность  $\omega$  в точках  $A$  и  $B$ , тогда

$$\text{pow}(P, \omega) = \overrightarrow{PA} \cdot \overrightarrow{PB}.$$



**Следствие 4.2.1** (Теорема о касательной и секущей). Если из точки  $P$ , проведена касательная  $PK$  к окружности  $\omega$  и прямая ( $\ell \ni P$ ) пересекает окружность  $\omega$  в точках  $A$  и  $B$ , тогда

$$PK^2 = PA \cdot PB.$$

**Теорема 4.3** (Главная теорема о степени точки). Если через точку  $P$  проходят две прямые, которые пересекают окружность  $\omega$  в точках  $A_1, A_2$  и  $B_1, B_2$  соответственно, то

$$\text{pow}(P, \omega) = \overrightarrow{PA_1} \cdot \overrightarrow{PA_2} = \overrightarrow{PB_1} \cdot \overrightarrow{PB_2}.$$

## 4.2 Радикальная ось

**Теорема 4.4.** Геометрическое место точек (ГМТ), степени которых относительно двух неконцентрических окружностей равны, есть прямая, перпендикулярная линии центров этих окружностей.



**Определение 4.2** (Радикальная ось). Прямая, состоящая из точек, степени которых относительно двух данных окружностей равны, называется радикальной осью этих окружностей.

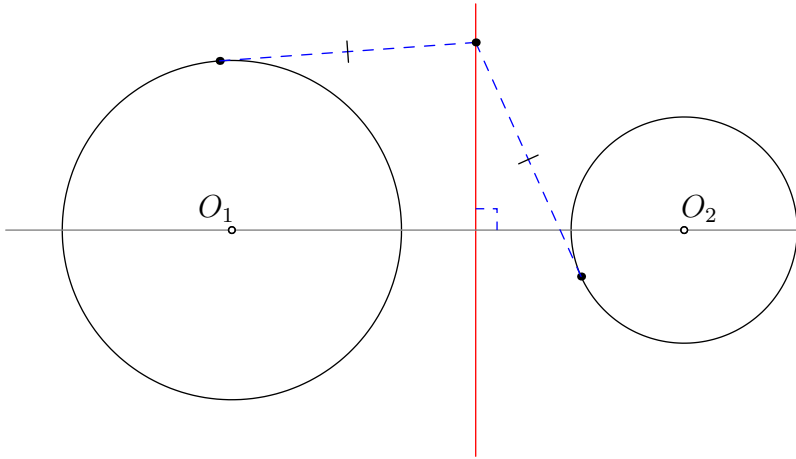


Рис. 3: Радикальная ось двух окружностей.

**Теорема 4.5** (Радикальный центр). Радикальные оси трех окружностей либо конкурентны, либо параллельны.

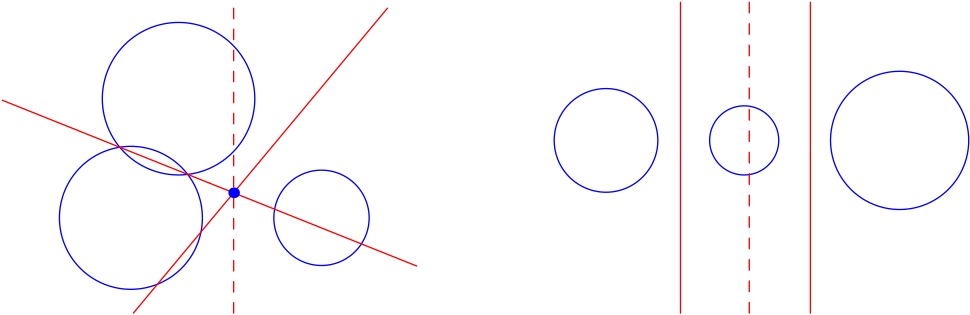
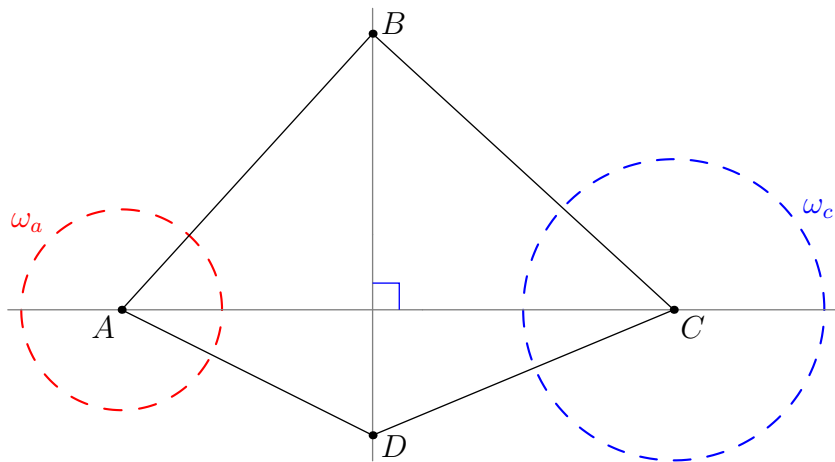


Рис. 4: Радикальный центр трех окружностей.

**Теорема 4.6.**  $AC \perp BD$ <sup>1</sup>, если

$$\text{pow}(B, \omega_a) - \text{pow}(B, \omega_c) = \text{pow}(D, \omega_a) - \text{pow}(D, \omega_c)$$



---

<sup>1</sup>Типа крутая теореме 3.1

## Задачи

Судя по карте, дорога здесь одна.  
Трясет на ухабах — мы переносим с одобрением.

Александр Башлачёв

Простите меня заранее за такие трудные задачи. Если вы отвалитесь довольно рано — не горюйте. Я вам всегда помогу! Удачи ♥

33. Докажите, что высоты треугольника конкurentны. 0\_0

○

**Решение:** Пусть  $H_a, H_b, H_c$  — основания высот треугольника  $ABC$  из вершин  $A, B$  и  $C$  соответственно.

Четырёхугольники  $ABH_aH_b, ACH_aH_c$  и  $BCH_bH_c$  — вписанные. По теореме 4.5 прямые  $AH_a, BH_b, CH_c$  конкurentны.

34. Окружность делит каждую из сторон треугольника на три равные части. Докажите, что этот треугольник — равносторонний.

○

**Решение:** Пусть окружность высекает на сторонах  $AB, AC$  и  $BC$  треугольника  $ABC$  отрезки  $CC_1, BB_1, AA_1$ .

$$\begin{cases} AB_2 = B_1B_2 = B_1C & = b \\ AC_1 = C_1C_2 = BC_2 & = c \\ BA_1 = A_1A_2 = A_2C & = a \end{cases} \quad (1)$$

Т.к.  $A_1A_2B_1B_2$  — вписанный, то

$$\begin{aligned} \text{pow}(C, (A_1A_2B_1B_2)) &= CA_1 \cdot CA_2 = CB_1 \cdot CB_2 \implies \\ &\implies c \cdot 2c = b \cdot 2b \implies c = b \implies AC = BC. \end{aligned} \quad (2)$$

Т.к.  $A_1A_2C_1C_2$  — вписанный, то

$$\begin{aligned} \text{pow}(B, (A_1A_2C_1C_2)) &= BA_1 \cdot BA_2 = BC_1 \cdot BC_2 \implies \\ &\implies a \cdot 2a = c \cdot 2c \implies a = c \implies AB = AC. \end{aligned} \quad (3)$$

Из уравнений (2) и (3) следует что  $AB = AC = BC$ .

35. Окружности  $\psi$  и  $\omega$  вписаны в вертикальный угол  $\angle nm$ ,  $\psi$  касается прямой  $n$  в точке  $N$ , а  $\omega$  касается прямой  $m$  в точке  $M$ . Докажите, что  $\psi$  и  $\omega$  высекают на  $NM$  равные отрезки.

○

**Решение:** Пусть окружность  $\psi$  касается прямой  $m$  в точке  $Q$ , а  $\omega$  касается  $n$  в точке  $P$ . Точка  $R$  – вторая точка пересечения прямой  $MN$  с  $\psi$ . Точка  $T$  – вторая точка пересечения прямой  $MN$  с  $\omega$ .

По следствию 4.2.1

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pow}(M, \psi) = MN \cdot MR = MQ^2 \\ \text{pow}(N, \omega) = NM \cdot NT = NP^2 \\ MQ = NP, \text{ symmetry} \end{array} \right\} \implies MN \cdot MR = NM \cdot NT \implies \quad (1)$$

$$\implies MR = NT \implies MR - MN = NT - MN \implies NR = MT.$$

36. (ММО, 2013, 11.3) Четырёхугольник  $ABCD$  такой, что  $AB = BC$  и  $AD = DC$ . Точки  $K$ ,  $L$  и  $M$  – середины отрезков  $AB$ ,  $CD$  и  $AC$  соответственно. Перпендикуляр, проведённый из точки  $A$  к прямой  $BC$ , пересекается с перпендикуляром, проведённым из точки  $C$  к прямой  $AD$ , в точке  $T$ . Докажите, что прямые  $KL \perp TM$ .  $\bigcirc$

**Решение:** Пусть точка  $P$  – основание перпендикуляра из точки  $A$  на прямую  $BC$ , а точка  $Q$  – основание перпендикуляра из точки  $C$  на прямую  $AD$ . Т.к.  $AB = BC$  и  $AD = DC$ , то  $AC \perp BD$  и  $AC \cap BD = M$ . Тогда четырёхугольники  $APBM$ ,  $BCDQ$ ,  $APCQ$  – вписанные, с центрами  $K$ ,  $L$ ,  $M$  соответственно.

По теореме 4.5

$$\left\{ \begin{array}{l} AP = \text{radical axis}((AB), (AC)) \\ CQ = \text{radical axis}((CD), (AC)) \end{array} \right\} \implies \quad (1)$$

$$\implies AP \cap CQ = T = \text{radical center}((AB), (AC), (CD)).$$

По уравнению (1)

$$M \in (AB) \cap (CD) \implies M \in \text{radical axis}((AB), (CD)) \implies KL \perp TM. \quad (2)$$

37. Точка  $D$  – основание биссектрисы из точки  $A$  треугольника  $ABC$ . Окружность  $(ABD)$  повторно пересекает прямую  $AC$  в точке  $E$ , а окружность  $(ACD)$  повторно пересекает прямую  $BC$  в точке  $F$ . Докажите, что  $BF = CE$ .  $\bigcirc$

**Решение:**

**Теорема 4.7** (Теорема о биссектрисе). *В треугольнике  $ABC$  проведем биссектрису  $AD$ , тогда*

$$\frac{AB}{AC} = \frac{BD}{DC}.$$

По теореме 4.3

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pow}(B, (ADC)) = BF \cdot BA = BD \cdot BC \\ \text{pow}(C, (ADB)) = CE \cdot CA = CD \cdot CB \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{BF \cdot BA}{BD} = \frac{CE \cdot CA}{CD}. \quad (1)$$

По уравнению (1) и теореме 4.7

$$\frac{BF}{CE} = \frac{BD \cdot CA}{BA \cdot CD} = \frac{BD}{CD} \cdot \frac{CA}{BA} = 1. \quad (2)$$

38. Окружность  $\omega$  проходит через вершины  $A$  и  $D$  равнобокой трапеции  $ABCD$  и пересекает диагональ  $BD$  и боковую сторону  $CD$  в точках  $P$  и  $Q$  соответственно. Точки  $P'$  и  $Q'$  симметричны точкам  $P$  и  $Q$  относительно середин отрезков  $BD$  и  $CD$  соответственно. Докажите, что  $B, C, P'$  и  $Q'$  конциклически.  $\bigcirc$

**Решение:** По обратной теореме 4.3

$$\text{pow}(C, \Omega) = DQ' \cdot DC = DP' \cdot DB. \quad (1)$$

Если  $P'$  и  $Q'$  симметричны относительно середин отрезков  $BD$  и  $CD$ , то  $DP' = BP$  и  $CQ = DQ'$ . Тогда уравнению (1) преобразовывается в

$$\underbrace{CQ \cdot CD}_{\text{pow}(C, \omega)} = \underbrace{BP \cdot BD}_{\text{pow}(B, \omega)} \quad (2)$$

Уравнение (2) верно, т.к.  $\omega, B, C$  – все эти объекты симметричны относительно серединного перпендикуляра к  $AD$ .

39. (JBMO Shortlist, 2022, G6) Пусть  $\Omega$  – описанная окружность треугольника  $ABC$ . Взяты точки  $P$  и  $Q$ , так что  $P$  равноудалена от  $A$  и  $B$ , а  $Q$  равноудалена от  $A$  и  $C$  и углы  $PBC$  и  $QCB$  равны. Докажите, что касательная к  $\Omega$  в точке  $A$ , прямая  $PQ$  и  $BC$  пересекаются в одной точке.

**Решение:** Пусть  $\ell$  – касательная в точке  $B$  к окружности  $(ABC)$ .

По следствию 1.5.1 существует окружность  $\omega$ , которая касается прямой  $AP$  в точке  $A$ , а прямой  $BQ$  в точке  $B$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} AP^2 = BP^2 \\ CQ^2 = BQ^2 \end{array} \right\} \implies PQ = \text{radical axis}((B), \omega). \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} BC = \text{radical axis}(\omega, (ABC)) \\ PQ = \text{radical axis}((B), \omega) \\ \ell = \text{radical axis}((B), (ABC)) \end{array} \right\} \implies BC \cap PQ \cap \ell \neq \emptyset. \quad (2)$$

40. Внеписанные окружности  $\omega_b$  и  $\omega_c$  треугольника  $ABC$  касаются сторон  $AC$  и  $AB$  соответственно в точках  $E$  и  $F$ . Прямая  $EF$  повторно пересекает окружности  $\omega_b$  и  $\omega_c$  в точках  $X$  и  $Y$  соответственно. Касательные в точках  $X$  и  $Y$  проведенные к окружностям  $\omega_b$  и  $\omega_c$  пересекают прямые  $AC$  и  $AB$  в точках  $K$  и  $L$  соответственно. Докажите, что середина отрезка  $KL$  равноудалена от точек  $E$  и  $F$ .

**Решение:** По задаче 35  $EX = FY$ .

Пусть  $K', L'$  – середины отрезков  $EX, YF$  соответственно. Тогда  $YL' = L'F = EK' = K'X$ ,  $LL' \perp EF$  и  $KK' \perp EF$ . Тогда и середина  $KL$  проектируется в середину  $XY$ , что эквивалентно середине  $EF$ .

41. (а) Пусть  $C_1$  и  $B_1$  – точки на сторонах  $AB$  и  $AC$  треугольника  $ABC$  соответственно. Докажите что, радикальная ось окружностей, построенных на  $BB_1$  и  $CC_1$  как на диаметре, проходит через ортоцентр треугольника  $ABC$ . ○

**Решение:** Пусть окружность  $(BB_1)$  пересекает сторону  $AC$  в точке  $P$ , а окружность  $(CC_1)$  пересекает сторону  $AB$  в точке  $Q$ . Тогда  $BQ, CP$  – высоты треугольника  $ABC$ , тогда  $BQ \cap CP = H$  – ортоцентр. Построим окружность  $(BC) \subset \{P, Q\}$ .

$$\begin{aligned} & \left\{ \begin{array}{l} BQ = \text{radical axis}((BC), (BB_1)) \\ CP = \text{radical axis}((BC), (CC_1)) \end{array} \right\} \implies \\ & \implies H = \text{radical center}((BC), (BB_1), (CC_1)) \implies \\ & \implies H \in \text{radical axis}((BB_1), (CC_1)). \end{aligned} \quad (1)$$

- (б) (Ось Обера) Докажите, что четыре ортоцентра четырёх треугольников, образованных четырьмя попарно пересекающимися прямыми,

никакие три из которых не проходят через одну точку<sup>1</sup>, коллинеарны.

**Решение:** Пусть треугольник  $ABC$  пересекает прямая  $\ell$ , которая пересекает стороны  $AB, AC, BC$  в точках  $C_1, B_1, A_1$  соответственно. Через  $H_{ABC}, H_{A_1B_1C}, H_{A_1BC_1}, H_{AB_1C_1}$  будем обозначать ортоцентры соответствующих треугольников.

Построим на  $AA_1, BB_1, CC_1$  окружности как на диаметрах. Тогда по задаче 41a для треугольника  $ABC$

$$\begin{cases} H_{ABC} \in \text{radical axis}((AA_1), (BB_1)) \\ H_{ABC} \in \text{radical axis}((AA_1), (CC_1)) \\ H_{ABC} \in \text{radical axis}((BB_1), (CC_1)) \end{cases} \quad (1)$$

Аналогичные утверждения можно произвести для других ортоцентров, таким образом получается, что каждый ортоцентр лежит на каждой радикальной оси каждой пары окружности. Т.к. ортоцентры различны, то радикальные оси не могут пересекаться в одной точке, а значит радикальные оси совпадают. И каждый ортоцентр лежит на этой общей радикальной оси.

- (с) (Теорема Гаусса–Боденмиллера) Докажите, что прямая Гаусса<sup>1</sup> перпендикулярна оси Обера.

**Решение:** По теореме 4.4 и задаче 41b *Ось Обера* будет перпендикулярна линии центров данных окружностей. А линия центров данных окружностей и есть *прямая Гаусса*, т.к. центрами окружностей являются центры диагоналей четырехсторонника.

42. Чевяны  $AD, BE$  и  $CF$  треугольника  $ABC$  конкурентны. Прямая  $EF$  пересекает окружность  $(ABC)$  в точках  $P$  и  $Q$ . Докажите, что  $P, Q, D$  и середина отрезка  $BC$  концикличны.

<sup>1</sup>Такие прямые образуют фигуру, называемую полным четырёхсторонником.

<sup>1</sup>Прямой Гаусса полного четырёхсторонника называется прямая, проходящая через середины трех его диагоналей.

**Решение:**

**Теорема 4.8** (Теорема Чевы). *Чевяны  $AA_1, BB_1, CC_1$  треугольника  $ABC$  конкurentны тогда и только тогда, когда*

$$\frac{AC_1}{C_1B} \cdot \frac{BA_1}{A_1C} \cdot \frac{CB_1}{B_1A} = 1.$$

**Теорема 4.9** (Теорема Менелая). *Точки  $A_1, B_1, C_1$  на прямых  $BC, AC, AB$  соответственно коллинеарны тогда и только тогда, когда*

$$\frac{AC_1}{C_1B} \cdot \frac{BA_1}{A_1C} \cdot \frac{CB_1}{B_1A} = 1.$$

Пусть прямая  $PQ$  пересекает прямую  $BC$  в точке  $T$ , а точка  $M$  – середина  $BC$ .

$$\text{pow}(T, (ABC)) = TP \cdot TQ = TB \cdot TC. \quad (1)$$

Чтобы искомая окружность  $\omega$  существовало должно выполняться

$$\text{pow}(T, \omega) = TD \cdot TM = \underbrace{TP \cdot TQ}_{\text{по уравнению (1)}} = TB \cdot TC. \quad (2)$$

Также по теоремам 4.8 и 4.9

$$\frac{BT}{CT} \underset{\text{по теореме 4.9}}{=} \frac{BF}{FA} \cdot \frac{AE}{EC} \underset{\text{по теореме 4.8}}{=} \frac{BD}{DC}. \quad (3)$$

Заметим что в уравнениях (2) и (3) остались только точки на прямой  $BC$ . Такую задачу можно решить координатным способом, за начало координат приняв  $T$ .

$$\begin{aligned} \frac{TB}{TC} &= \frac{BD}{DC} = \frac{TD - TB}{TC - TD} \iff \\ \iff TB(TC - TD) &= TC(TD - TB) \\ TB \cdot TC - TB \cdot TD &= TC \cdot TD - TB \cdot TC \\ 2TB \cdot TC &= TD(TC + TB) \\ TB \cdot TC &= TD \cdot \frac{TC + TB}{2} = TD \cdot TM. \end{aligned} \quad (4)$$

Хочется еще отметить, что из уравнения (4) следует, что

$$TD = \frac{2TB \cdot TC}{TB + TC} = \frac{2}{\frac{1}{TB} + \frac{1}{TC}}.$$

Поэтому четверка точек  $(T, B, D, C)$  называется *гармонической*.



43. В треугольнике  $ABC$  проведены высоты  $AD$ ,  $BE$ ,  $CF$ . Прямые  $DE$ ,  $EF$  и  $DF$  пересекаются прямыми  $AB$ ,  $BC$  и  $AC$  в точках  $C_1$ ,  $B_1$ ,  $A_1$  соответственно. Докажите, что точки  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  лежат на прямой<sup>1</sup> перпендикулярной прямой Эйлера треугольник  $ABC$ .

**Решение:** По определению 2.5 Точки  $D, E, F$  лежат на окружности Эйлера  $\omega_9$  треугольника  $ABC$ . А  $\Omega$  – описанная окружность этого треугольника. Каждый из четырехугольников  $ABDE, BCEF, CAFD$  является вписанным.

$$\left\{ \begin{array}{l} \underbrace{A_1B \cdot A_1C}_{\text{pow}(A_1, \omega_9)} = \underbrace{A_1F \cdot A_1E}_{\text{pow}(A_1, \Omega)} \\ \underbrace{B_1C \cdot B_1A}_{\text{pow}(B_1, \omega_9)} = \underbrace{B_1D \cdot B_1F}_{\text{pow}(B_1, \Omega)} \\ \underbrace{C_1A \cdot C_1B}_{\text{pow}(C_1, \omega_9)} = \underbrace{C_1E \cdot C_1D}_{\text{pow}(C_1, \Omega)} \end{array} \right\} \Rightarrow \{A_1, B_1, C_1\} \in \text{radical axis}(\omega_9, \Omega). \quad (1)$$

## 5 Известные конструкции

Этот раздел посвящен тому, чтобы при доказательстве перпендикулярности использовать какие-то известные вам конструкции (прямая Симсона, задача №255, или что вы там знаете..). Таких очень много, и это то, что по-сути и остается только изучать. Да и все, что мы до этого с вами проходили, можно тоже называть известными конструкциями.

### 5.1 Прямая Симсона

**Теорема 5.1** (Прямая Симсона). *Проекции точки  $P$  на прямые, содержащие стороны треугольника  $ABC$ , коллинеарны, тогда и только тогда, когда точка  $P$  лежит на описанной окружности треугольника  $ABC$ .*

<sup>1</sup>Такая прямая называется трилинейной полярой ортоцентра, или ортоцентрической осью, или центральной линией центра описанной окружности.

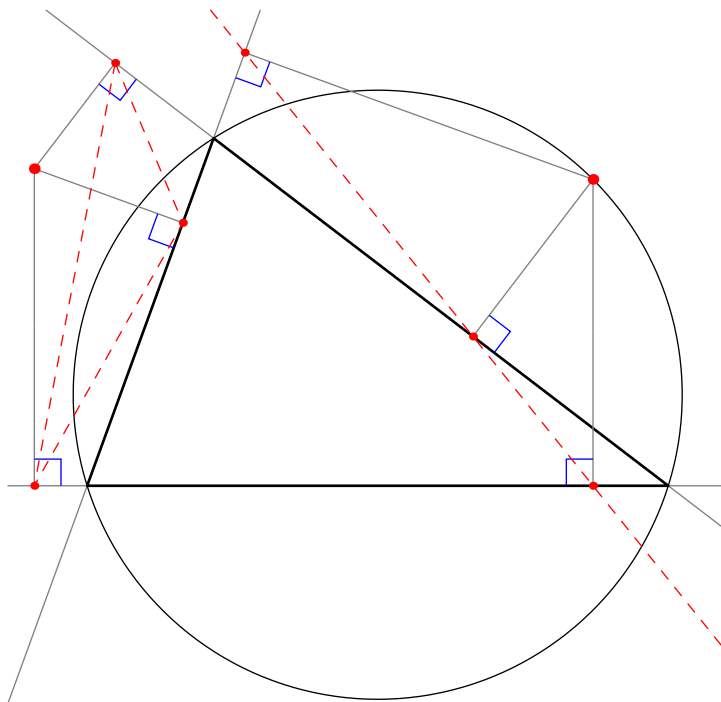


Рис. 5: Педальные треугольники двух точек. Прямая Симсона.

## 5.2 Задача №255

Наверное, каждая содержательная геометрическая задача может быть источником целого ряда новых. Для этого с ней надо некоторое время «повозиться», посмотреть с разных сторон, попробовать перефразировать, обобщить. В результате удивительным образом может возникнуть новая, совершенно не похожая на «родителя» задача. Например, возьмём ту же задачу №255...

---

И. Ф. Шарыгин. Геометрия. Задачник 9–11

**Теорема 5.2** (Лемма 255, Iran Lemma). Пусть  $M$  и  $N$  – точки касания вписанной окружности со сторонами  $AB$  и  $BC$  треугольника  $ABC$ ,  $P$  – точка

пересечения биссектрисы угла  $A$  с прямой  $MN$ . Докажите, что  $\angle APC = 90^\circ$ . Докажите, что точка  $P$  лежит на средней линии треугольника  $ABC$ , параллельной стороне  $AB$ .

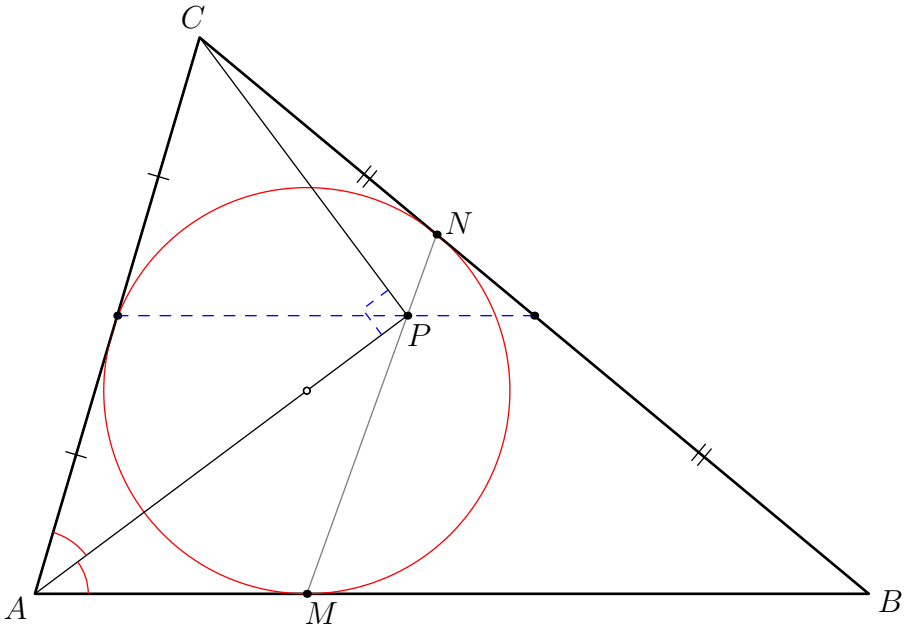


Рис. 6: Лемма 255.

## Задачи

44. Дан прямоугольник  $ABCD$ . Через точку  $B$  провели две перпендикулярные прямые. Первая прямая пересекает сторону  $AD$  в точке  $K$ , а вторая — продолжение стороны  $CD$  в точке  $L$ .  $F$  — точка пересечения  $KL$  и  $AC$ . Докажите, что  $BF \perp KL$ .  $\bigcirc$

**Решение:** Точка  $B$  лежит на окружности  $(DKL)$ , а также  $BA \perp KD$  и  $BC \perp DL$ , значит  $AC$  — прямая Симсона точки  $B$  относительно треугольника  $DKL$ .

По теореме 5.1  $BF \perp KL$ .

45. Пусть  $AA_1, BB_1, CC_1$  – высоты остроугольного треугольника  $ABC$ . Докажите, что проекции точки  $A_1$  на прямые  $AB, AC, BB_1, CC_1$  коллинеарны.  
○

**Решение:** Заметим, что точка  $A_1$  лежит на окружностях  $(ABB_1)$  и  $(ACC_1)$ . Тогда по теореме 5.1 проекции точки  $A_1$  на прямые  $AB, AC, BB_1$  коллинеарны. И проекции точки  $A_1$  на прямые  $AB, AC, CC_1$  коллинеарны. Т.к. проекции точки  $A_1$  на прямые  $AB, AC$  составляют прямую, и причем только одну, то все эти точки лежат на этой прямой.

46. (Обобщённая прямая Симсона)  $P$  – произвольная точка описанной окружности треугольника  $ABC$ . Докажите, что точки  $A_1, B_1, C_1$  на прямых  $AC, BC, AB$  коллинеарны, когда выполняется равенство:

$$\angle(AB, PC_1) = \angle(BC, PA_1) = \angle(AC, PB_1).$$

**Решение:** Отметим точки  $B_1$  и  $C_1$  правильно. Пусть прямая  $B_1C_1$  пересекает  $BC$  в точке  $D$ . По обратной лемме 1.2  $AC_1PB_1$  – вписанный. Тогда по задаче 7b все описанные окружности треугольников  $ABC, AB_1C_1, A_1BC_1, A_1B_1C$  пересекаются в одной точке. Но, позволте,  $(ABC) \cap (AB_1C_1) = P$ . Значит, что и  $DC_1BP$ , и  $DCB_1P$  тоже вписанные. Тогда по лемме 1.2  $\angle(BC, PD) = \angle(AC, PB_1)$ , а значит  $D \equiv A_1$ .

47. Вписанная в треугольник  $ABC$  окружность касается сторон  $AB, BC, CA$  в точках  $C_1, B_1, A_1$  соответственно. Пусть прямая  $C_1I$  пересекает прямую  $A_1B_1$  в точке  $P$ . Тогда прямая  $CP$  содержит медиану треугольника  $ABC$ .

**Решение:** Проведем через точку  $P$  прямую параллельную  $AB$ , которая пересекает сторону  $AC$  в точке  $N$ , а сторону  $BC$  в точке  $M$ . Заметим, что

$$\begin{cases} IP & \perp NM \\ IB_1 & \perp NC \\ IC_1 & \perp CM. \end{cases} \quad (1)$$

Получается, что по теореме 5.1 т.к.  $A_1, B_1, P$  коллинеарны, то  $I \in (CNM)$ . Вспомним, что  $CI$  – биссектриса угла  $NCM$ . Тогда по лемме 2.9  $I$  лежит на серединном перпендикуляре к отрезку  $NM$ , значит  $PN = PM$ . Сделаем гомотегию  $\mathcal{H}_C$ , чтобы  $N \rightarrow A, M \rightarrow B$ , точка  $P$  перейдет в середину  $BC$ . А по определению 2.8 точки  $C, P$  и середина  $BC$  будут лежать на одной прямой.

48. (а) Хорда  $PQ$  описанной окружности треугольника  $ABC$  и сторона  $BC$  перпендикулярны. Докажите, что прямая Симсона точки  $P$  относительно треугольника  $ABC$  параллельна прямой  $AQ$ .  $\bigcirc$

**Решение:** Пусть точка  $B_1$  – проекция точки  $P$  на  $AC$ . По теореме 5.1  $A_1B_1$  – прямая Симсона точки  $P$ .  
 $PB_1A_1C$  и  $PAQC$  – вписанные. Тогда

$$\angle CPQ = \underbrace{\angle A_1B_1C}_{\angle(A_1B_1, AC)} = \underbrace{\angle QAC}_{\angle(AQ, AC)} \implies AQ \parallel A_1B_1. \quad (1)$$

- (б) (Закл. этап ВСОШ, 2009–2010 гг., 10.6) Пусть  $H$  – ортоцентр треугольника  $ABC$ . Точки  $X$  и  $Y$  – проекции точки  $P$ , лежащей на описанной окружности треугольника  $ABC$  на стороны  $AB$  и  $BC$ . Докажите, что середина отрезка  $HP$  и точки  $X$  и  $Y$  коллинеарны.<sup>1</sup>

**Решение:** Пусть  $Z$  – точка пересечения  $XY$  с  $BC$ , тогда по теореме 5.1  $PZ \perp BC$ . Пусть точка  $Q$  – пересечение окружности  $(ABC)$  с  $PZ$ . Тогда по задаче 48а  $AQ \parallel XY$ .

Пусть точка  $H'$  симметрична  $H$  относительно  $BC$ , точка  $P'$  определяется аналогично. Тогда по теореме 2.1  $H' \in (ABC)$ , значит  $AQPH'$  и  $HH'PP'$  – равнобокие трапеции.

$$\angle QAH' = \angle AH'P = \angle H'HP' \implies HP' \parallel AQ \parallel XY. \quad (1)$$

Заметим, что  $XY$  содержит в себе среднюю линию треугольника  $P'HP$ , а значит делит отрезок  $HP$  пополам.

49. (Прямая Штейнера) Пусть  $P$  – произвольная точка на описанной окружности треугольника  $ABC$ . Точки  $P_a, P_b, P_c$  – симметричны  $P$  относительно прямых  $BC, AC$  и  $AB$  соответственно. Докажите что, точки  $P_a, P_b, P_c, H$  коллинеарны.  $\bigcirc$
50. Пусть  $\ell$  – прямая Штейнера точки  $R$  на описанной окружности  $ABC$ . Докажите, что если прямую  $\ell$  отразить относительно стороны треугольника  $ABC$ , то полученная прямая пройдет через точку  $R$ .
51. (Л. А. Попов, Ф. Л. Бахарев) Точки  $A_1, B_1, C_1$  – основания высот остроугольного треугольника  $ABC$  из точек  $A, B, C$  соответственно. Точки  $A_1, B_1, C_1$  отразили относительно средних линий треугольника, параллельных  $AB, BC, CA$  соответственно, – получились точки  $A_2, B_2, C_2$

<sup>1</sup>Подсказка в том, что эта задача – пункт (б). Ну и симметрии ортоцентра.

соответственно. Докажите, что прямые  $AA_2$ ,  $BB_2$ ,  $CC_2$  пересекаются в одной точке.

52. (ММО, 2006, 10.6) Точки  $P$  и  $Q$  лежат на описанной окружности треугольника  $ABC$ . На прямой  $AB$  выбрана точка  $C_1$  так, что  $\angle(AB, PC_1) = \angle(QC_1, AB)$ . Аналогично выбраны точки  $B_1$  и  $C_1$  на прямых  $AC$  и  $BC$  соответственно. Докажите, что точки  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  коллинеарны.

53. (Теорема Дроз-Фарни) Обозначим точкой  $H$  – ортоцентр треугольника  $ABC$ . Прямые  $\ell$  и  $t$  проходят через  $H$  и  $\ell \perp t$ . Пусть  $L_a$ ,  $L_b$ ,  $L_c$  пересечение  $\ell$  с прямыми  $BC$ ,  $AC$  и  $AB$  соответственно, точки  $T_a$ ,  $T_b$  и  $T_c$  определяются аналогично. Докажите, что середины отрезков  $T_aL_a$ ,  $T_bL_b$ ,  $T_cL_c$  коллинеарны.

54. (Олимпиада им. И.Ф. Шарыгина, 2021, 8-9.6, устный тур)  
В треугольнике  $ABC$ , точка  $M$  – середина стороны  $BC$ , точка  $H$  – ортоцентр. Биссектриса угла  $A$  пересекает отрезок  $HM$  в точке  $T$ . Окружность построенная на отрезке  $AT$ , как на диаметре, пересекает стороны  $AB$  и  $AC$  в точках  $X$  и  $Y$ . Докажите, что точки  $X$ ,  $Y$  и  $H$  коллинеарны.

Эта серия задач довольно простая, потому что у нас последнее (!) занятие. Ну и вы, кажется, должны были устать от "Симсона" и "степени точки". Поэтому отдыхайте и наслаждайтесь задачами! ♥

55. (ММО, 1994) В треугольнике  $ABC$  точки  $M$  и  $N$  – проекции вершины  $B$  биссектрисы углов  $A$  и  $C$ , а  $P$  и  $Q$  – проекции на внешние биссектрисы этих же углов.

(a) Докажите, что точки  $M$ ,  $N$ ,  $P$  и  $Q$  коллинеарны. ○

(b) Докажите, что длина отрезка  $PQ$  равна полупериметру треугольника  $ABC$ .

56. В трапецию  $ABCD$  вписанная окружность с центром  $I$ . Окружность вписанная в треугольник  $ACD$  касается сторон  $AD$  и  $AC$  в точках  $E$  и  $F$ . Докажите, что точки  $E$ ,  $F$  и  $I$  коллинеарны. ○

57. (Ф. Л. Бахарев, Санкт-Петербургская олимпиада, 1999) В неравностороннем треугольнике  $ABC$  проведены биссектрисы  $AA_1$  и  $CC_1$  и отмечены точки  $K$  и  $L$  – середины сторон  $AB$  и  $BC$  соответственно.  $AP$  и  $CQ$  – перпендикуляры, опущенные на  $CC_1$  и  $AA_1$  соответственно. Докажите, что прямые  $PK$  и  $QL$  пересекаются на стороне  $AC$ .

58. В равнобедренном треугольнике  $ABC$  ( $AB = BC$ ) средняя линия, параллельная стороне  $BC$  пересекается со вписанной окружностью в точке  $D$ , не лежащей на  $AC$ . Докажите, что касательная к окружности в точке  $D$  пересекается с биссектрисой угла  $C$  на стороне  $AB$ .  $\bigcirc$
59. (а) (Первая внешняя Лемма 255) Пусть  $M$  и  $N$  – точки касания вневписанной окружности  $\omega_a$  треугольника  $ABC$  со стороной  $BC$  и продолжением стороны  $AC$ , а  $P$  – точка пересечения биссектрисы угла  $A$  с прямой  $MN$ . Докажите, что  $\angle APB = 90^\circ$ .  $\bigcirc$
- (б) (Вторая внешняя Лемма 255) Пусть  $M$  и  $N$  – точки касания вневписанной окружности  $\omega_a$  треугольника  $ABC$  со продолжениями сторон  $AB$  и  $AC$ , а  $P$  – точка пересечения биссектрисы внешнего угла  $B$  с прямой  $MN$ . Докажите, что  $\angle BPC = 90^\circ$ .  $\bigcirc$
60. В треугольнике  $ABC$  точки  $A_c, B_c, C_c$  – точки касания прямых  $BC, AC$  и  $AB$  с вневписанной окружностью  $\omega_c$  (с центром в  $I_c$ ). Точки  $A_b, B_b, C_b$  определяются аналогично.

$$\begin{cases} B_1 \equiv A_c C_c \cap A_b C_b \\ C_1 \equiv A_b B_b \cap A_c B_c \\ A_1 \equiv A_b B_b \cap A_c C_c \\ A_2 \equiv A_c B_c \cap A_b C_b \end{cases}.$$

- (а) Докажите, что точки  $A, B_1, C_1, I_b, I_c$  коллинеарны.
- (б) Докажите, что  $A_1 A_2 \perp BC$ .

**А    Анкета**

Фамилия Имя, класс: \_\_\_\_\_ ○

Команда: \_\_\_\_\_      Знак зодиака: \_\_\_\_\_

Хобби: \_\_\_\_\_      Сколько дней в году: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

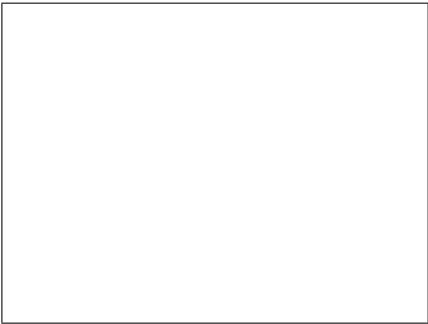
Любимый цвет (можно нарисовать): \_\_\_\_\_

Любимая музыкальная группа: \_\_\_\_\_

Любимый фильм: \_\_\_\_\_

Любимая футбольная команда: \_\_\_\_\_

Нарисуйте лошадь:





## В Заметки

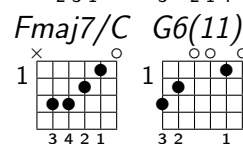
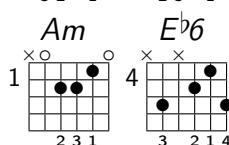
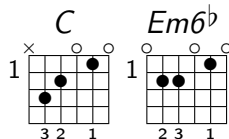
Награда	Доля от количества	Количество ○
Конфета	33%	$\approx 14$
Дошик	50%	$\approx 21$
Шоколадка	70%	$\approx 29$
Значок	Особо старательным	
Общее количество	100%	42

Таблица 1: Таблица ништяков.

1

# True Love Waits (Live in Oslo)

Radiohead

Intro: *C Em6<sup>b</sup> Am E<sup>b</sup>6**C* I'll drown my beliefs *Em6<sup>b</sup>**Am* To have your babies *E<sup>b</sup>6**C* I'll dress like your niece *Em6<sup>b</sup>**Am* And wash your swollen feet *E<sup>b</sup>6**C* *Fmaj7/C* *G6(11)*  
Just don't*C* *Fmaj7/C*  
leave*G6(11)* *Am* *G6(11)*  
Don't leave*C* I'm not living *Em6<sup>b</sup>**Am* I'm just killing time *E<sup>b</sup>6**C* Your tiny hands *Em6<sup>b</sup>**Am* Your crazy kitten smile *E<sup>b</sup>6**C* *Fmaj7/C* *G6(11)*  
Just don't*C* *Fmaj7/C*  
leave*G6(11)* *Am* *G6(11)*  
Don't leaveBridge: *C Em6<sup>b</sup> Am G6(11) E<sup>b</sup>6**Fmaj7/C**C* And true love waits *Em6<sup>b</sup>**Am* In haunted attics *E<sup>b</sup>6**C* And true love lives *Em6<sup>b</sup>**Am* On lollipops and crisps *E<sup>b</sup>6*||: *C* *Fmaj7/C* *G6(11)*  
Just don't*C* *Fmaj7/C*  
leave*G6(11)* *Am* *G6(11)* :||  
Don't leave

Sex	In Raindows by Radiohead
0 (zero) Grammys	One award and four other Grammy nominations (including Album of the year)
lasts about 3 minutes	42 minutes, perfect album length
often shallow and meanungless	Thoms, deep lyrics about love desperation, lust and more connect with you on a personal level
Likely does not have Ed O'Brien	Ed O'Brien on almost every track
Invokes acc being naked, which is gross	Contains the song "Nude" which is beautiful and unique, which you can experience in comfort of civilized clothing
Hard to get	Accessible while still maintaining artistic integrity. Was also released for free
Leads to the spred of diseases and heartbreak	Does not give icky diseases, helps cure heartbreak
"OOHHH GOD", - ecnourages dangerous theocracy	"EEEEEEEEEEEDDDDDDD"
Women often have trouble cumming	Every song is perfectly structured to reach an amazing orgasmic climax
Your partner is probably a light 7	Always a perfect 10