

## Мейоз и кроссинговер

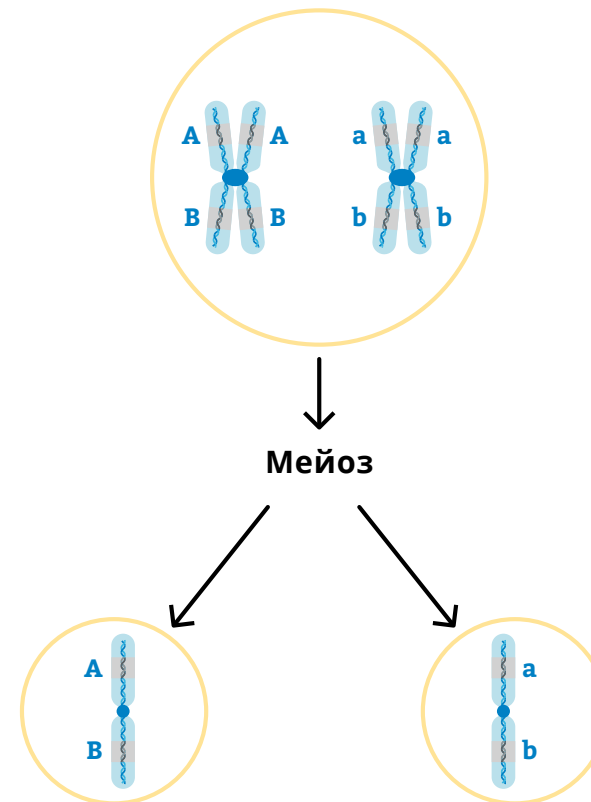


Кариотип человека (мужчина)

В соматических клетках человека находится 23 пары хромосомы. Всего в геноме, по приблизительным подсчетам, находится 25–35 тысяч генов. Таким образом, в каждой хромосоме находится не менее одной тысячи генов. При этом каждая хромосома – это отдельная группа сцепления, то есть все эти гены наследуются сцепленно.

У животных гаметы образуются в результате мейоза – редукционного деления, в процессе которого из одной диплоидной клетки образуется четыре гаплоидных. Рассмотрим пример деления дигетерозиготной клетки (**AaBb**), при этом гены **A** и **B** находятся в одной хромосоме:

После прохождения мейоза мы ожидаем получить два типа гамет – **AB** и **ab**:



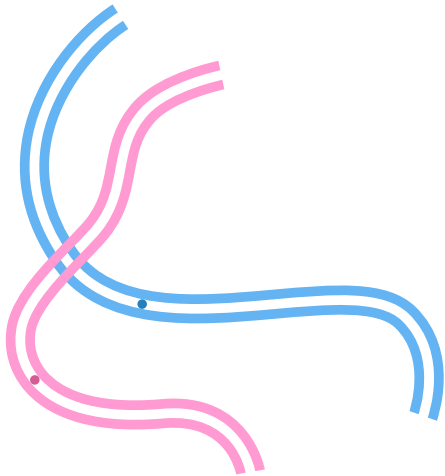
Однако такая закономерность (называемая полным сцеплением) может нарушаться вследствие явления кроссинговера – обмена участками гомологичных хромосом. Напомним, что гомологичными хромосомами называются хромосомы, содержащие одну и ту же линейную последовательность генов и образующие пары (биваленты) во время мейоза. Именно во время профазы I мейоза и происходит процесс кроссинговера.

Профаза I мейоза делится на 5 периодов:

- лептотена,
- зиготена,
- пахитена,
- диплотена,
- диакинез.

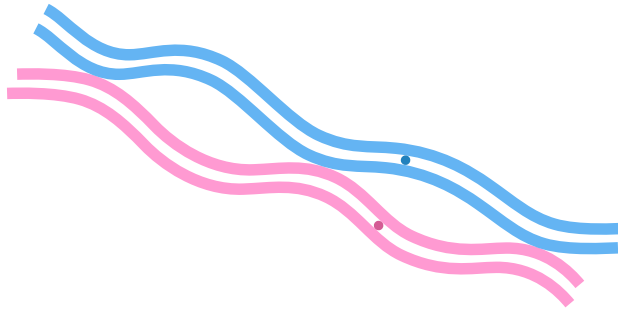
Рассмотрим эти периоды на примере одной пары гомологичных хромосом.

### Лептотена



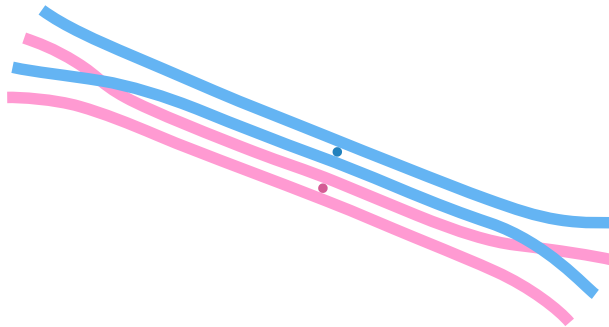
Происходит уплотнение упаковки хромосом (конденсация ДНК). При этом хромосомы утолщаются и становятся различимы в световой микроскоп. Гомологичные хромосомы еще не образуют бивалентов. Каждая хромосома состоит из двух хроматид, то есть из двух молекул

ДНК.



### Зиготена

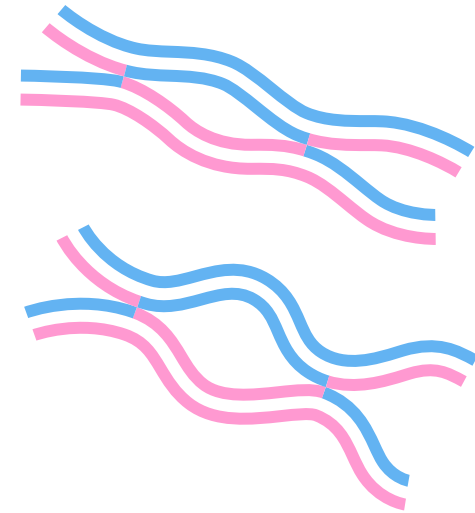
Происходит конъюгация гомологичных хромосом, то есть их сближение и начало образования бивалентов – структур, состоящих из двух гомологичных хромосом.



### Пахитена

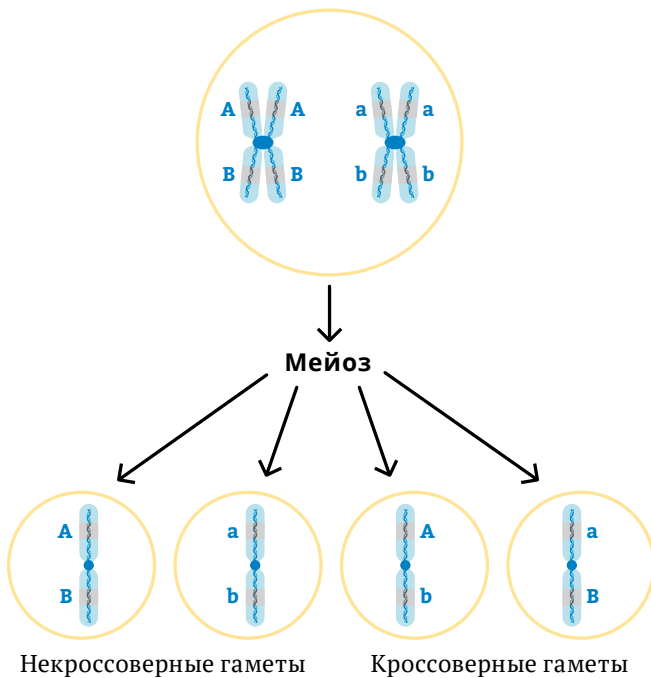
Происходит максимальное сближение хромосом внутри бивалентов. При этом могут образовываться перекресты – хиазмы между отдельными хроматидами. Именно в этих точках происходит обмен участками ДНК в результате разрывов.

### Диплотена и диакинез



В течение последних двух стадий профазы I – диплотены и диакинеза – происходит частичная деконденсация и расхождение хромосом. При этом хромосомы остаются соединенными между собой.

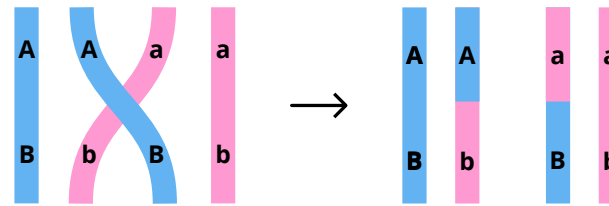
Таким образом, в случае, если при образовании гамет произошел процесс кроссинговера, то рассматриваемый выше дигетерозиготный организм (**AaBb**) даст не два, а четыре типа гамет. Два типа гамет будут такими же, как и при полном сцеплении (**AB** и **ab**) и будут называться некроссоверными, а два других типа гамет (**Ab** и **aB**) будут образованы в результате процесса кроссинговера, и будут называться кроссоверными:



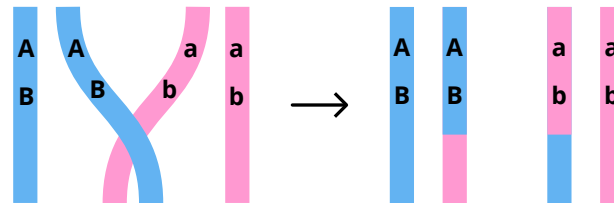
## Расстояние между генами

При этом соотношение кроссоверных и некроссоверных гамет может отличаться в зависимости от рассматриваемых признаков.

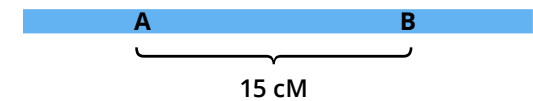
Хиазмы могут образовываться на любом участке хромосомы. Если хиазма образовалась между двумя рассматриваемыми генами, то после прохождения кроссинговера мы увидим новые сочетания аллелей:



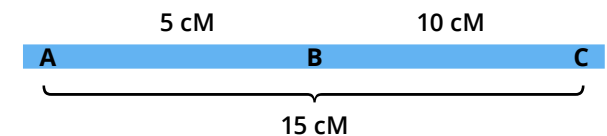
В случае, если гены находятся по одну сторону от перекреста, мы не будем наблюдать новых сочетаний аллелей:



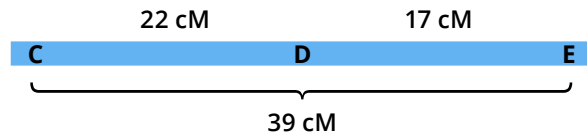
При этом, чем больше расстояние между генами, тем больше вероятность того, что именно между ними и произойдет кроссинговер. Таким образом, вероятность кроссинговера прямо пропорциональна расстоянию между генами. Для измерения расстояния между генами введена единица измерения – сантиморгана (сМ), равная одному проценту кроссинговера. Например, если между генами **A** и **B** кроссинговер происходит в 15% случаев, то расстояние между этими генами равно 15 сМ.



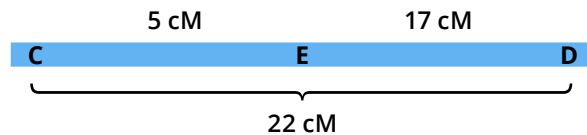
Расстояние между генами подчиняется правилу аддитивности. Например, если нам известно, что в хромосоме есть три последовательно расположенных гена **A**, **B** и **C**, причем расстояние между генами **A** и **B** равно 5 сМ, а между генами **B** и **C** – 10 сМ, то расстояние между генами **A** и **C** равно 15 сМ:



Предположим, нам известно расстояние между генами **C** и **D**, которое равно 22 сМ и генами **D** и **E**, равное 17 сМ. Тогда, если гены располагаются последовательно, то расстояние между генами **C** и **E** будет равно 39 сМ:



Однако, если нам неизвестна последовательность генов в хромосоме, то мы можем также предположить, что ген **E** находится между генами **C** и **D**. Тогда расстояние между генами **C** и **E** будет равна 5 сМ:

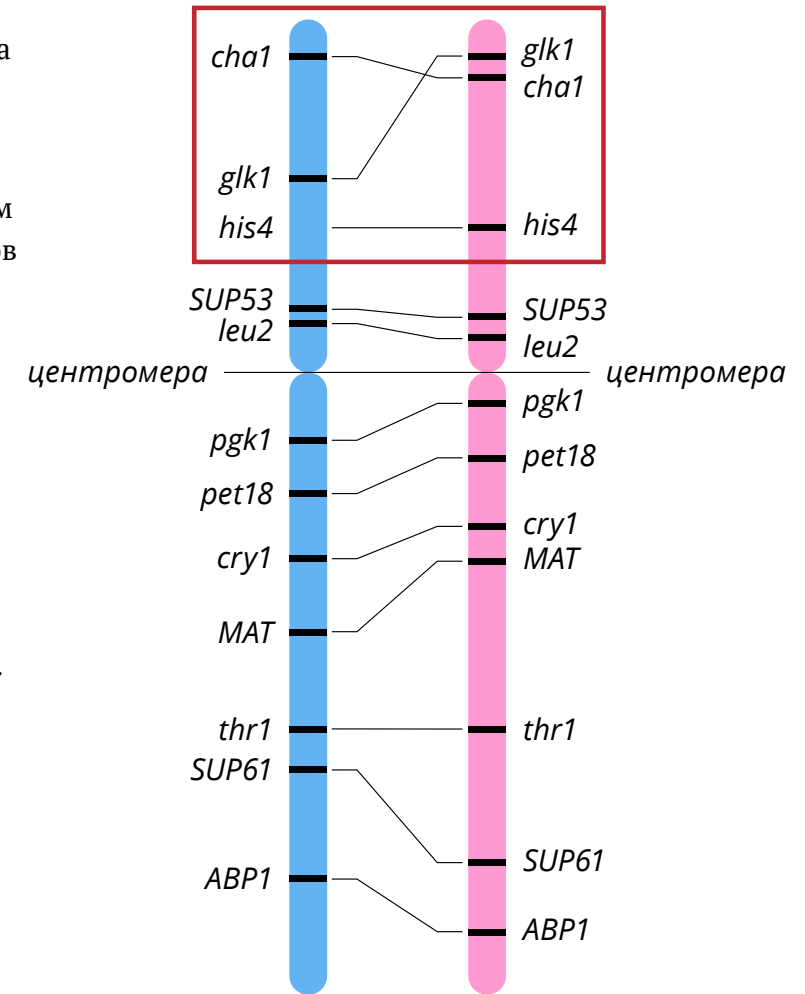


Зная расстояния между различными генами, мы можем составлять карты хромосом – схемы взаимного расположения генов на хромосоме. При этом существует два типа таких карт.

**Генетические карты** основаны на вероятности прохождения кроссинговера между генами, то есть расстояние измеряется в сантиморганидах (сМ).

**Физические карты** основаны на прямом анализе последовательности нуклеотидов в ДНК и расстояние измеряется в количестве пар нуклеотидов (п.н.).

Физические карты могут сильно отличаться друг от друга, вплоть до того, что некоторые гены могут иметь различную последовательность. Это связано с тем, что вероятность прохождения кроссинговера на разных участках хромосомы может варьировать.



Физическая и генетическая карты 3-й хромосомы дрожжей