



Эволюция геномов растений

Ксения В. Стрыгина
Сектор функциональной генетики злаков
ИЦиГ СО РАН

26.12.2018

Немного истории

Как всё начиналось...

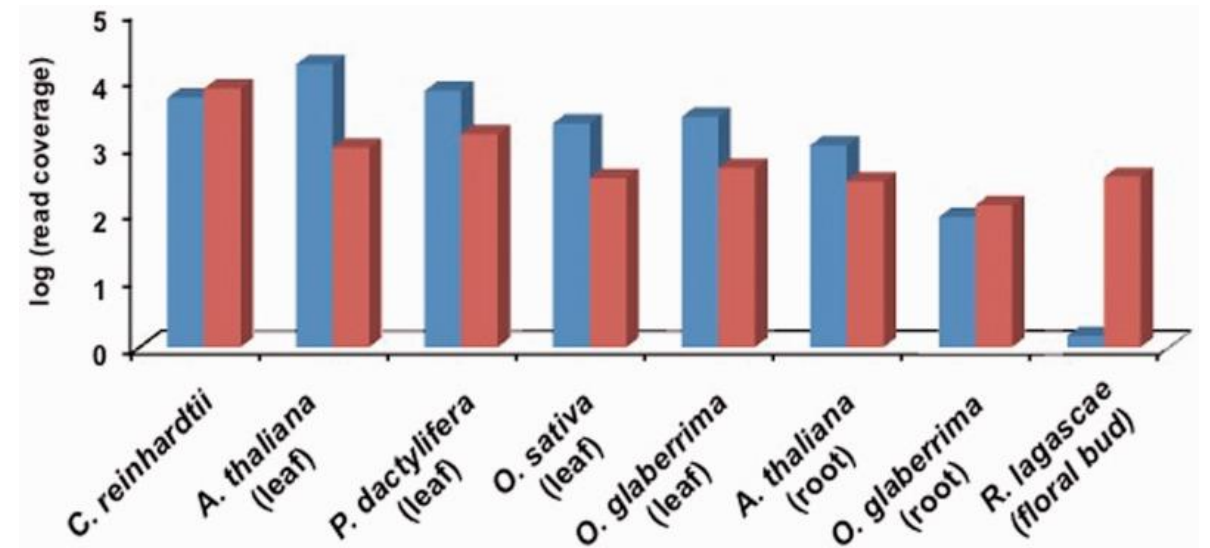


Компоненты генома растения

- Ядерный геном
- Геном пластид
- Геном митохондрий



Rafflesia lagascae



Molina et al. 2014

Компоненты генома растения

- Ядерный геном 
- Геном пластид
- Геном митохондрий

Размеры геномов растений



Arabidopsis thaliana

~135 Mbp ~17 Gbp
x 125



Triticum aestivum

Размеры геномов растений



Genlisea aurea

~63 Mbp

~149 Gbp

x 2 365



Paris japonica

Самый большой геном многоклеточных
(не только растений)

<http://data.kew.org/cvalues/>

ПАРАДОКС

Слабая корреляция между
сложностью растений и
размером его генома



Рис

420 Мbp



Ячмень

5 300 Мbp



Пшеница

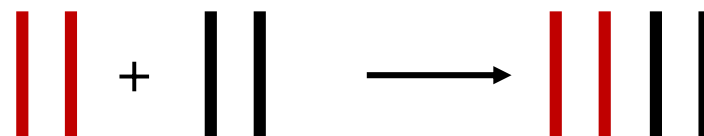
17 000 Мbp

Дубликации и геномы растений

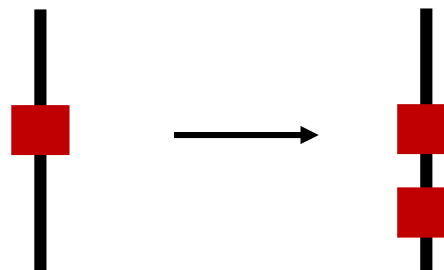
Дупликация гена



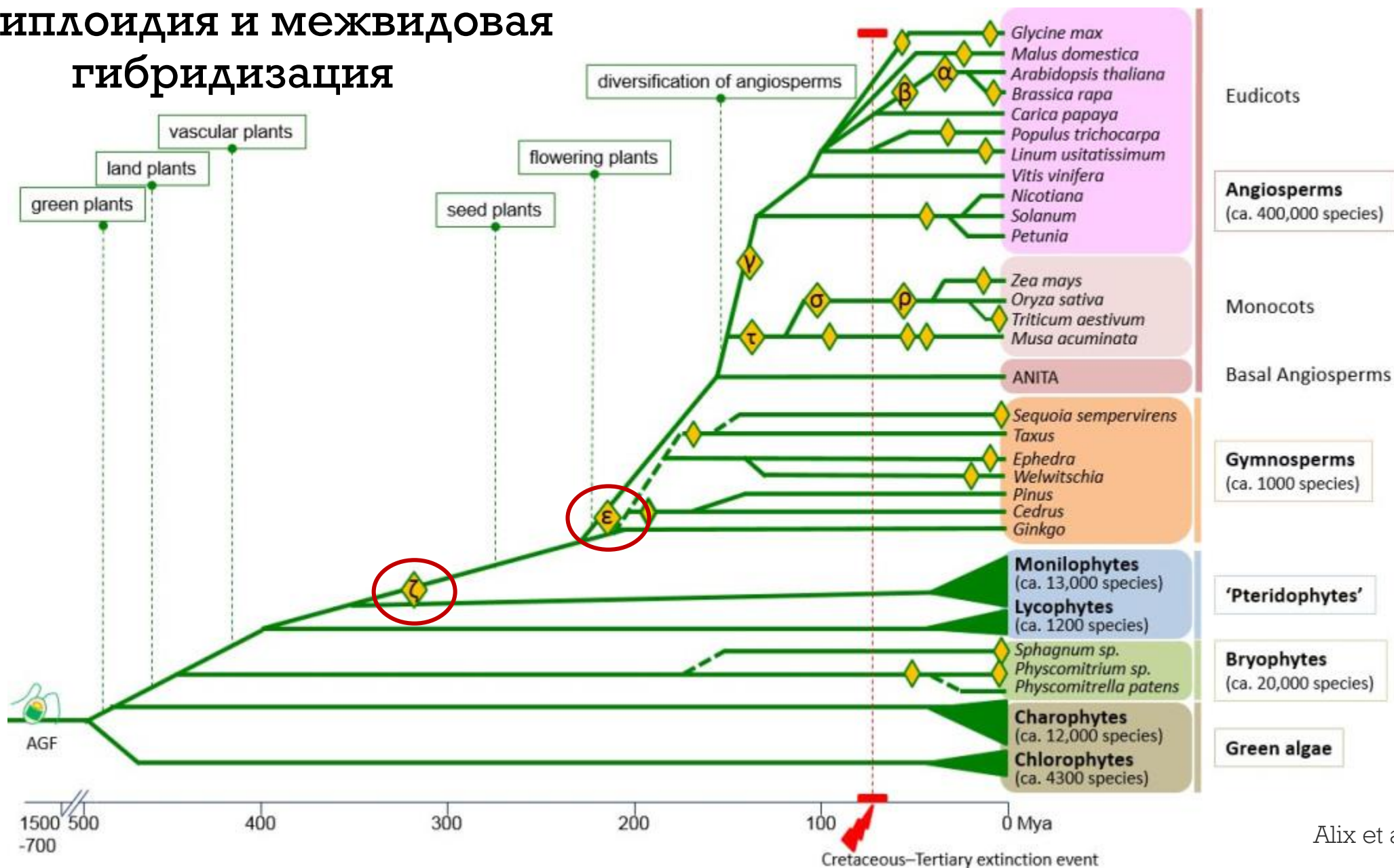
Полногеномные
дупликации



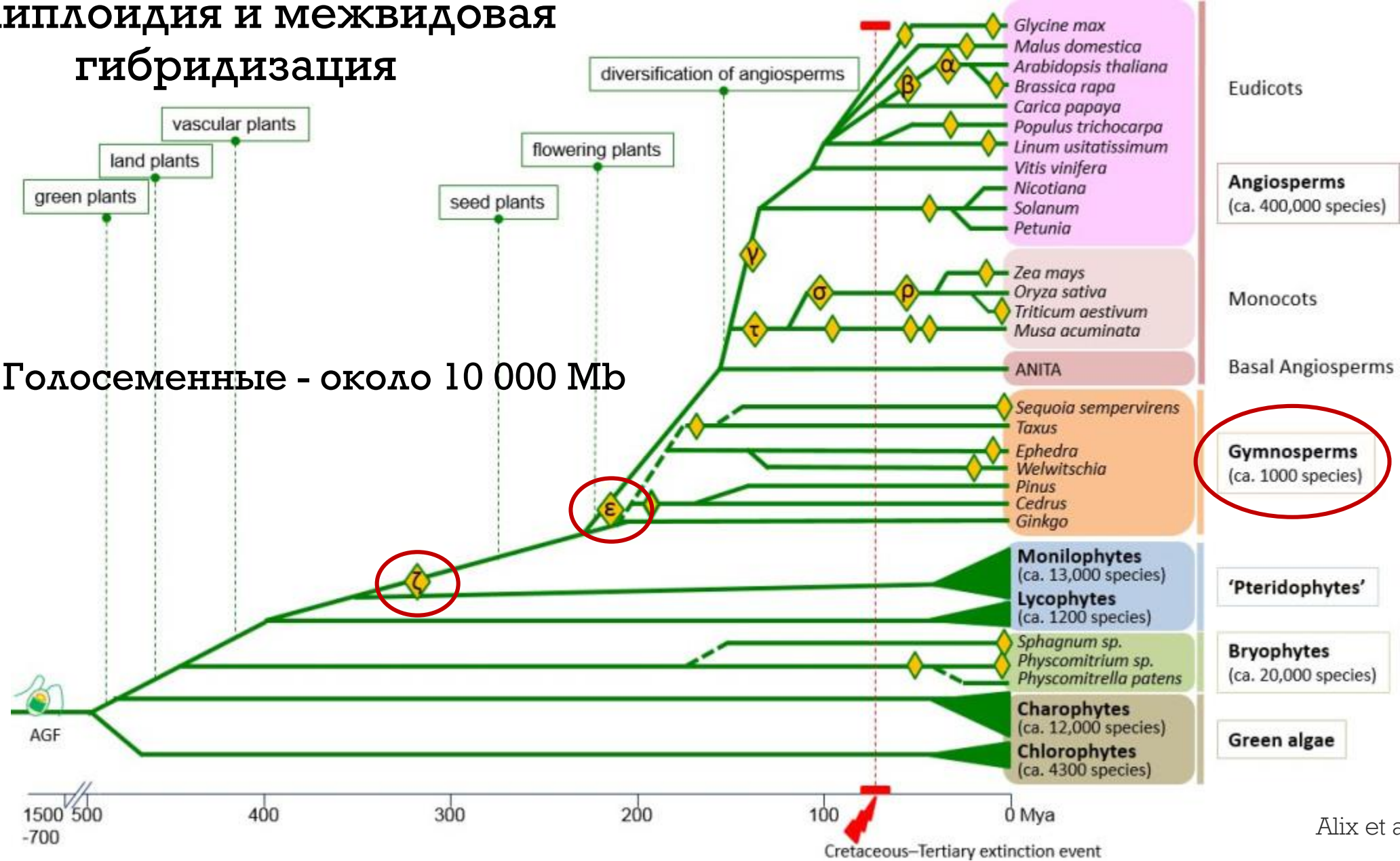
Сегментные
дупликации



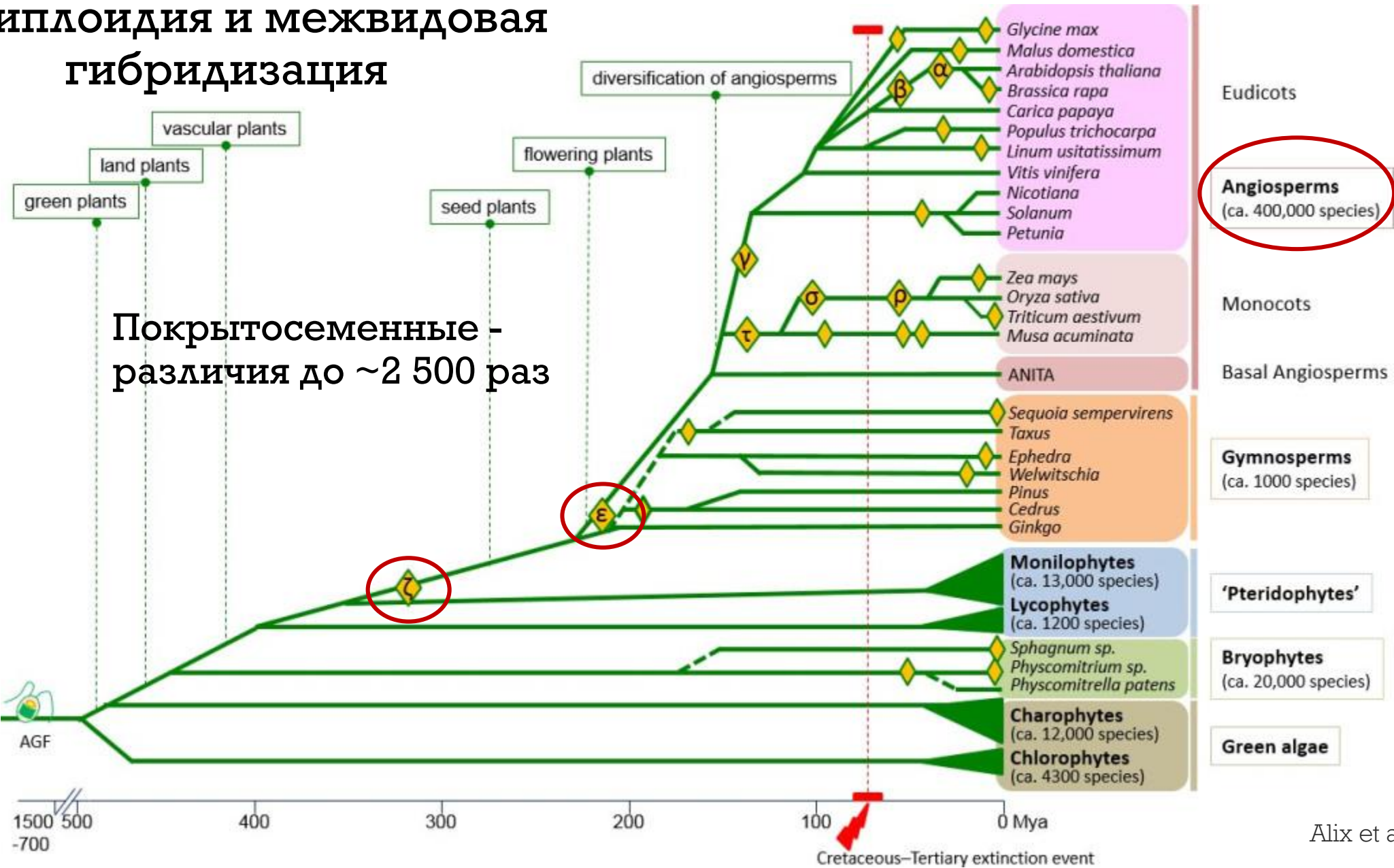
Полиплоидия и межвидовая гибридизация



Полиплоидия и межвидовая гибридизация

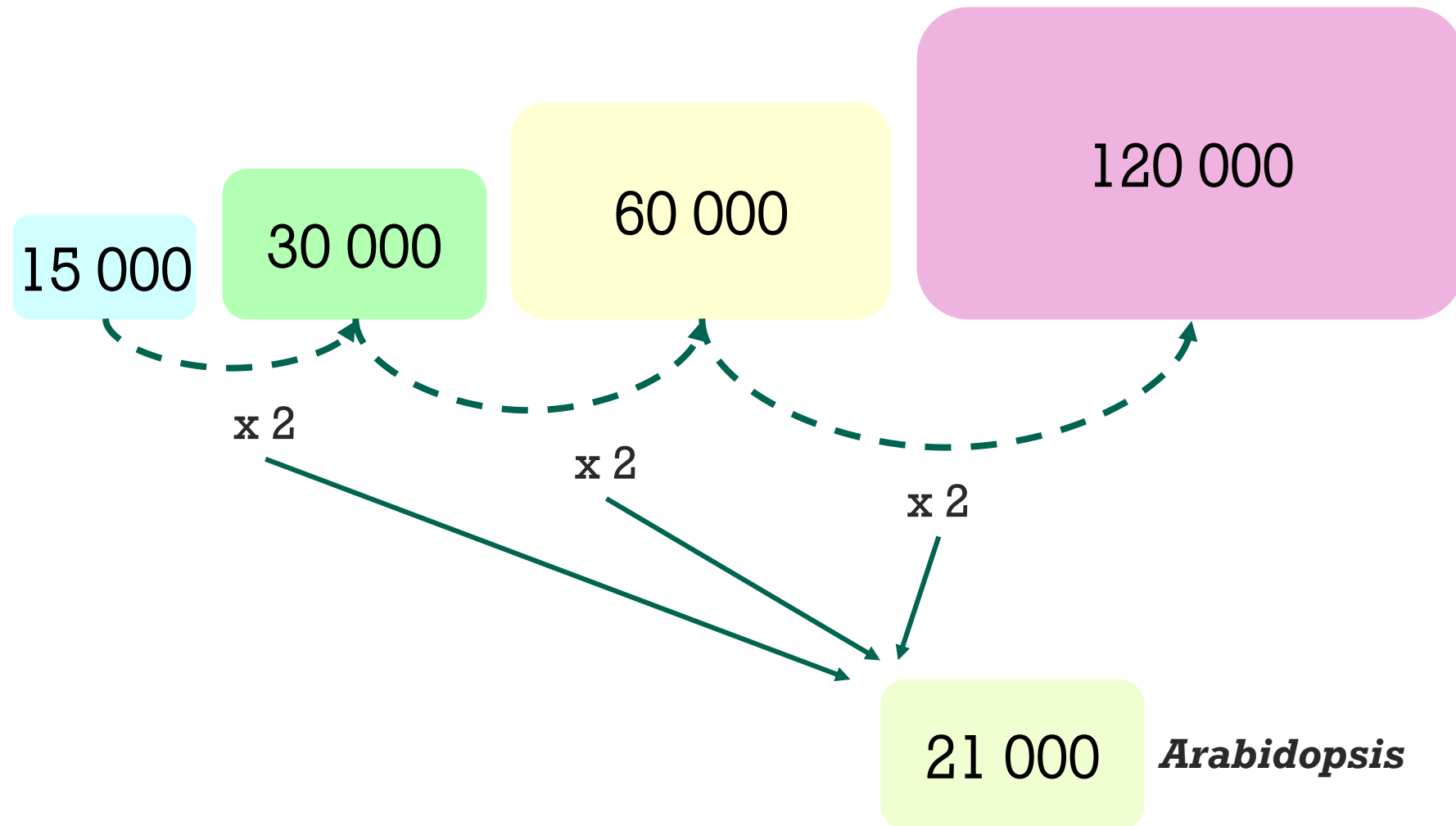


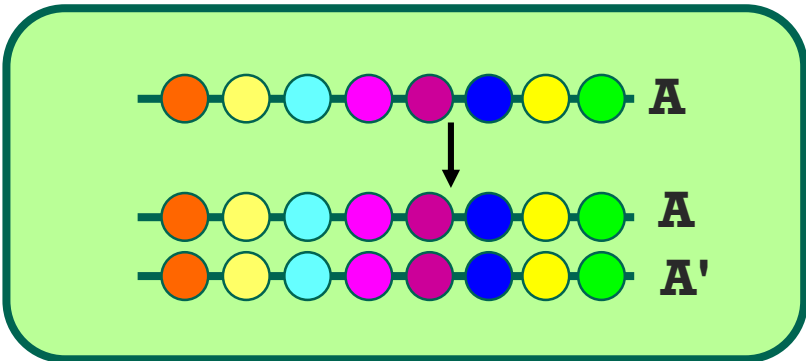
Полиплоидия и межвидовая гибридизация



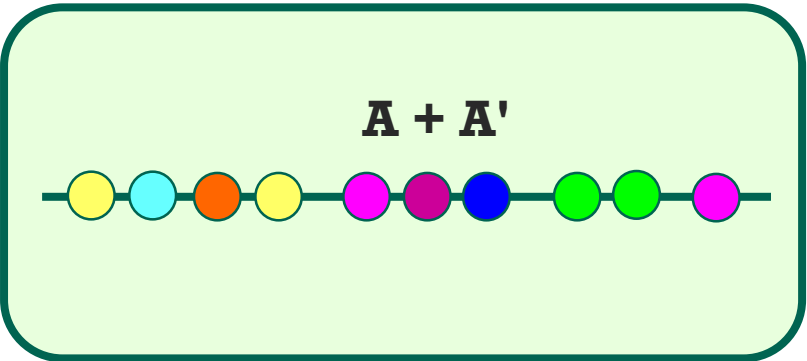
Покрытосеменные -
различия до ~2 500 раз

Arabidopsis – три акта полногеномных дупликаций
(+ сегментные дупликации)

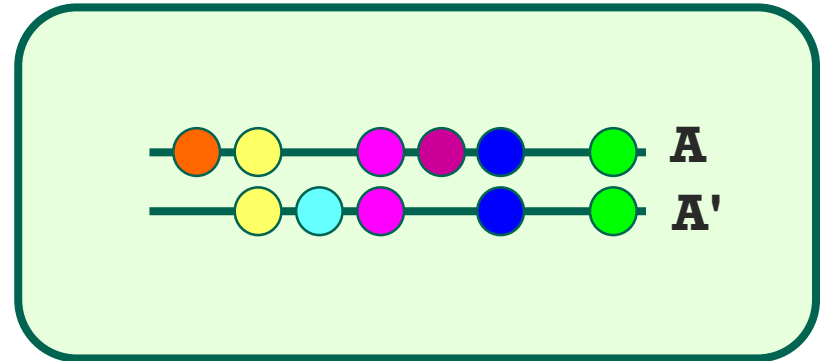




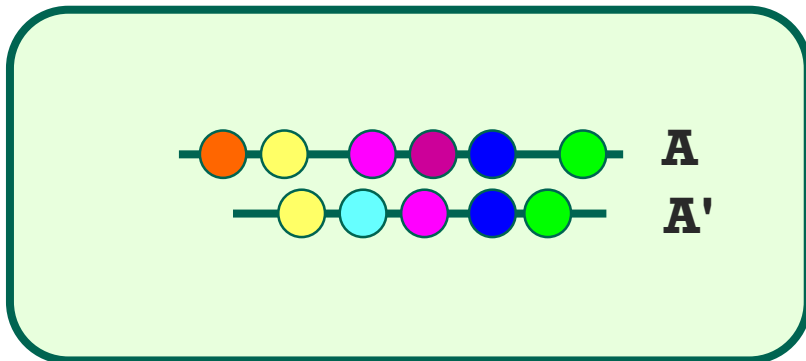
Полногеномная дупликация



Диплоидизация



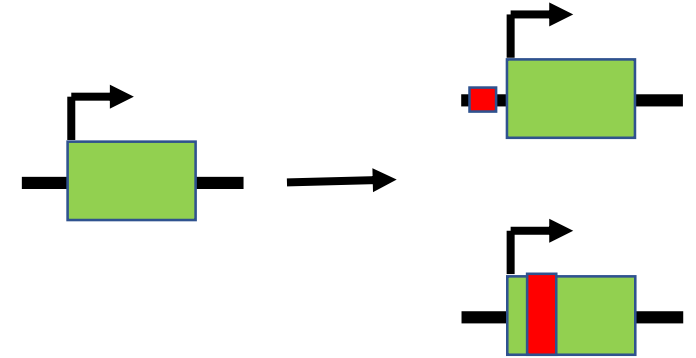
Перестройки генома



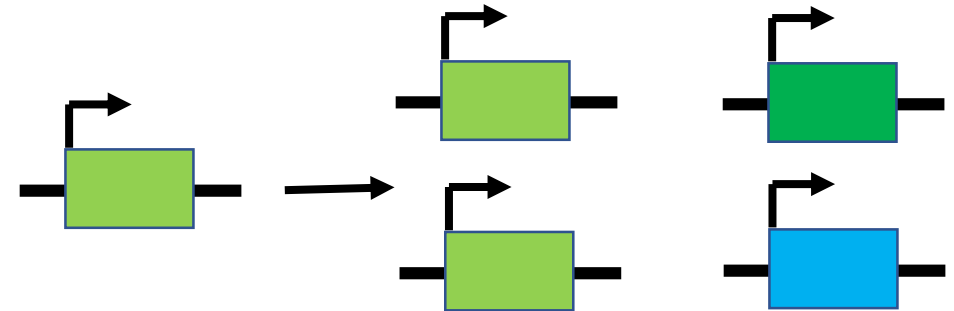
Последствия

Функциональная дивергенция генов

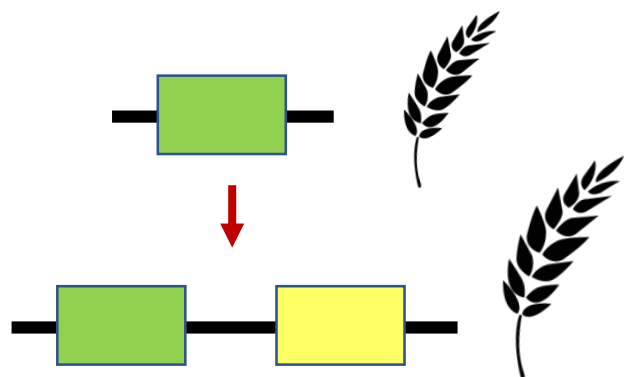
- *Цис*-регуляторные элементы или кодирующие последовательности



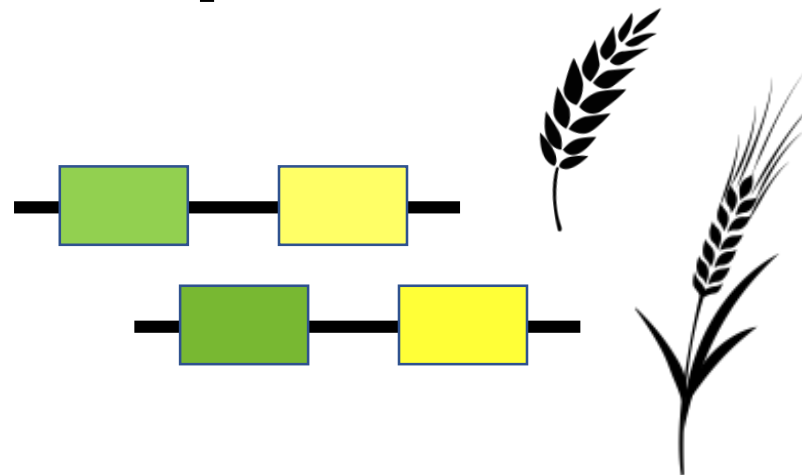
- Субфункционализация или неофункционализация



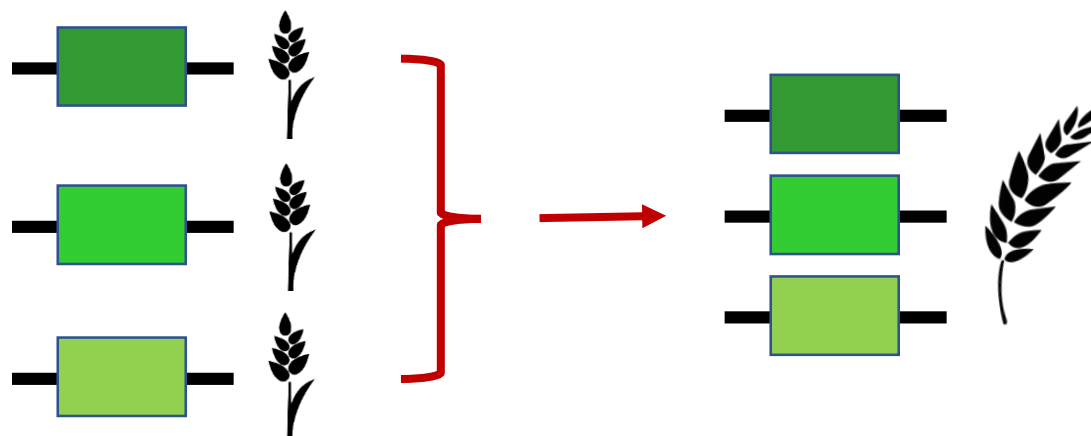
Паралогы

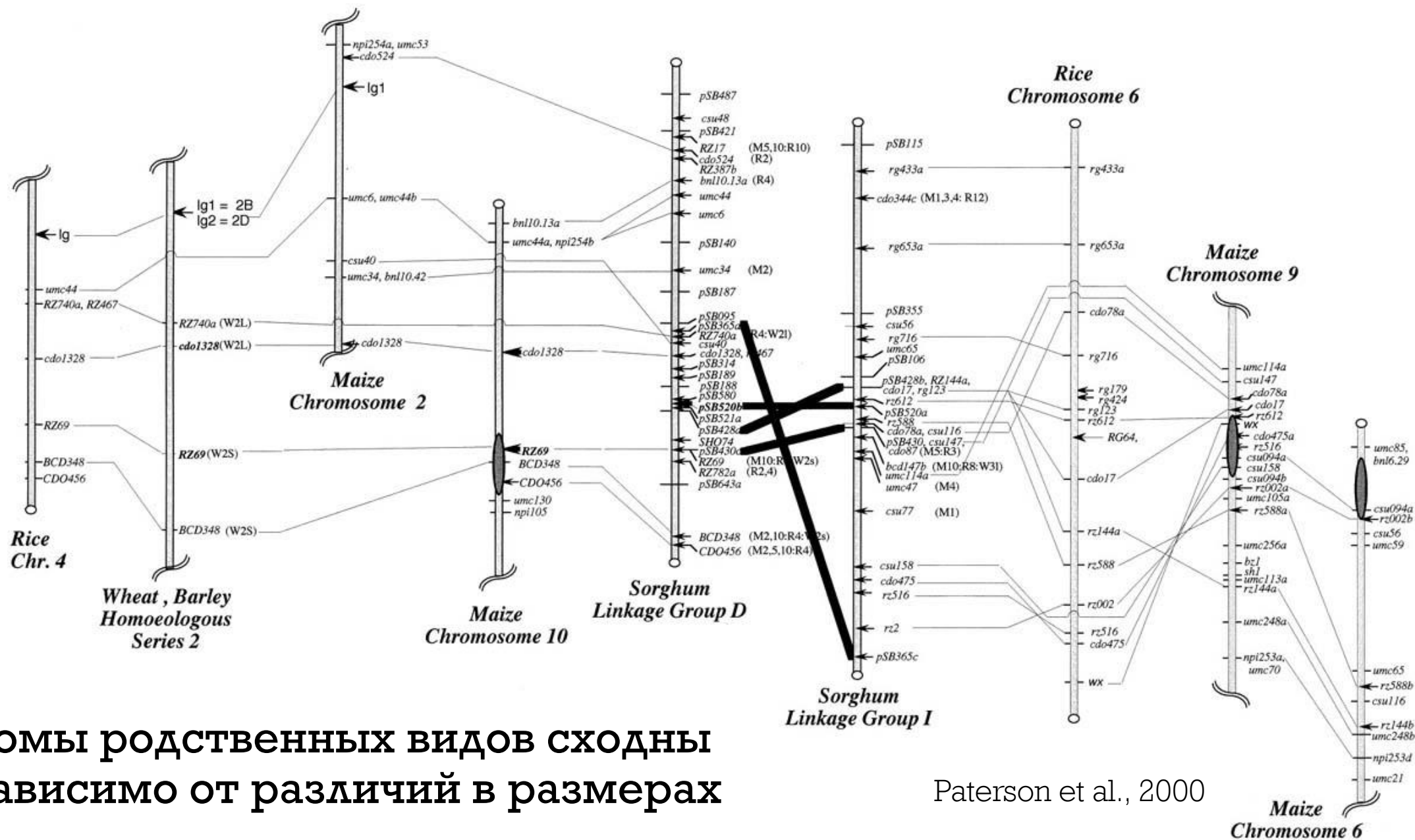


Ортологи



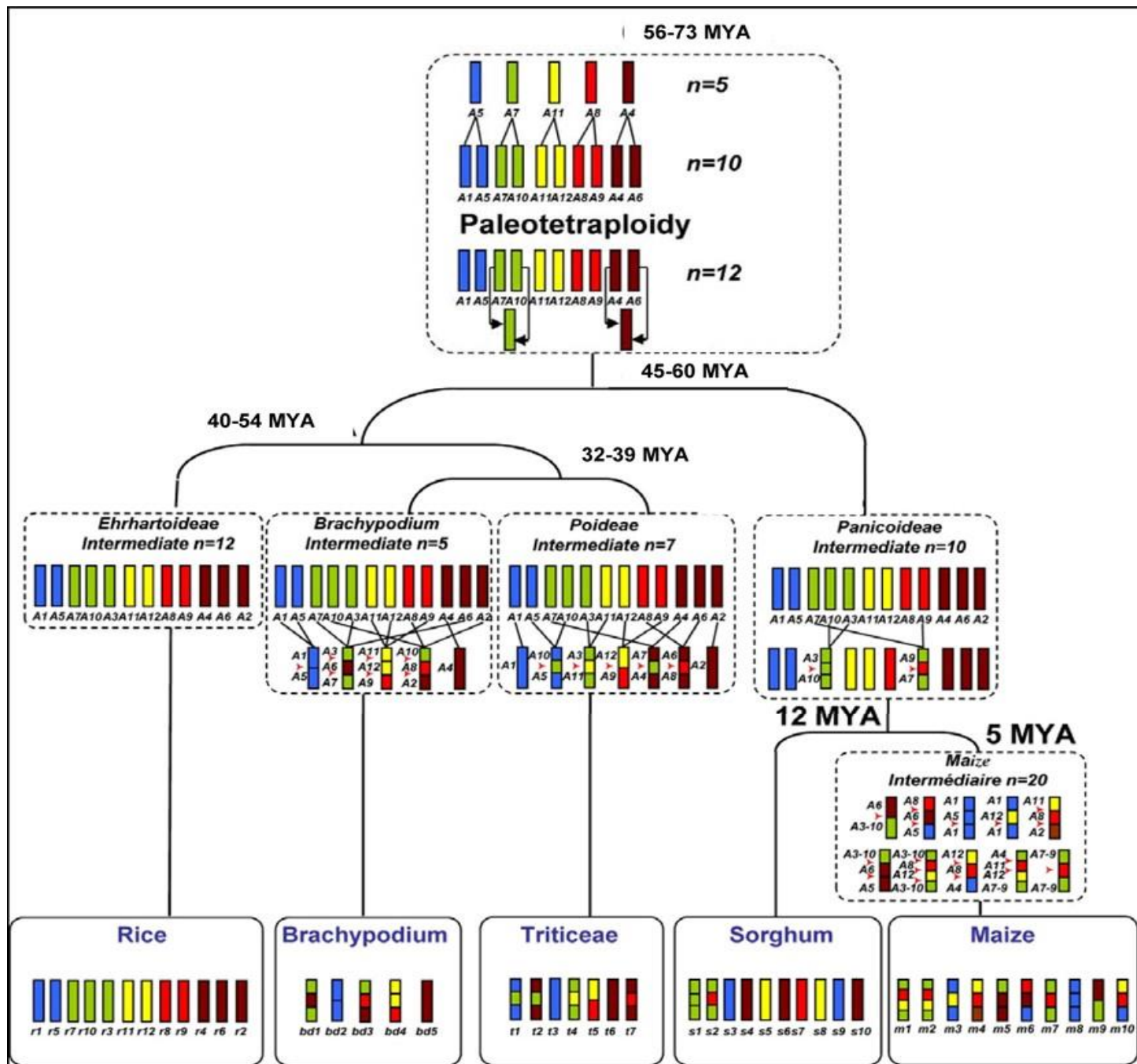
Гомеологи





Геномы родственных видов сходны
независимо от различий в размерах

Paterson et al., 2000

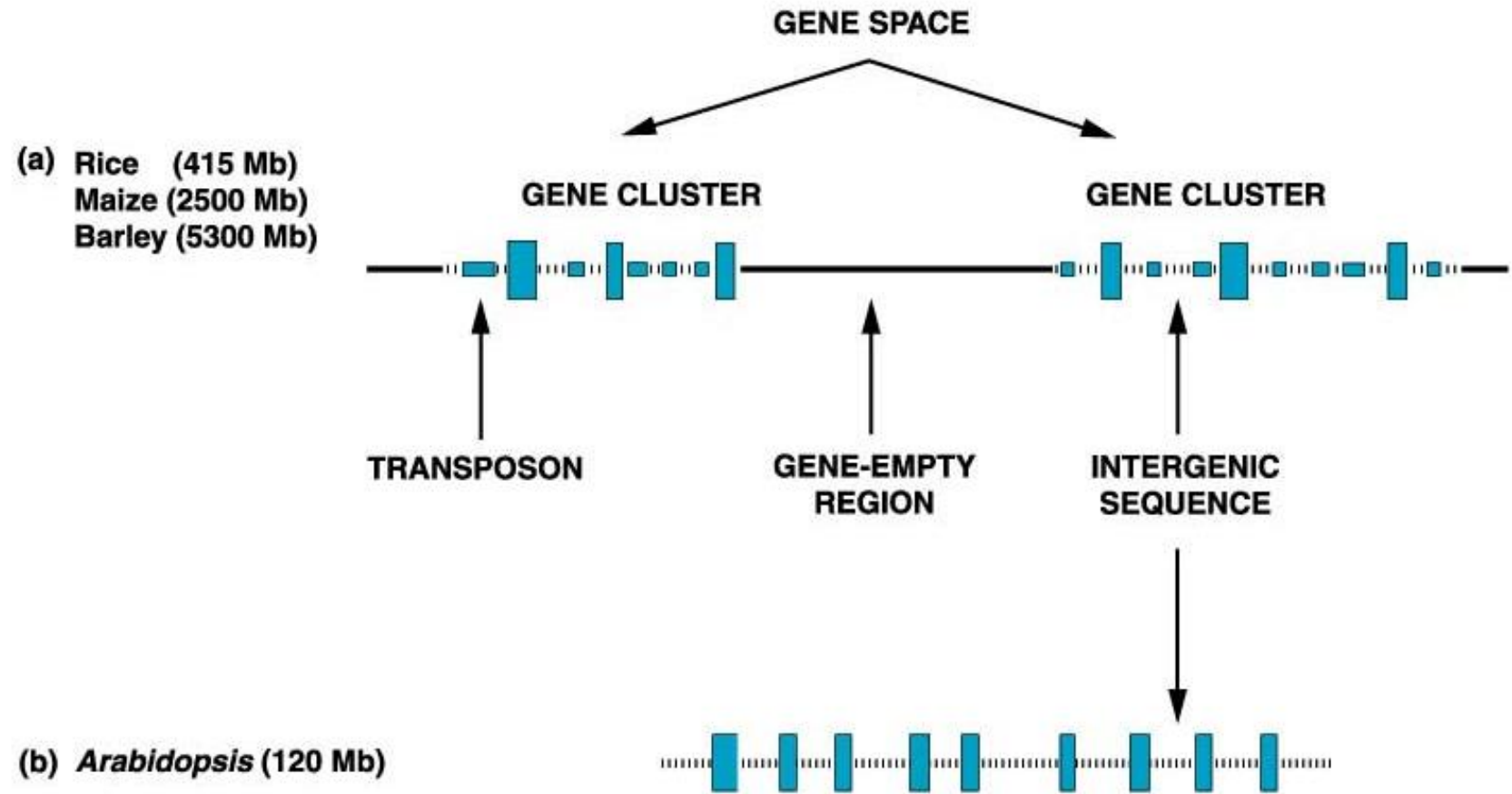


Модель эволюции хромосом Злаков

Основные дупликации – 55-70 миллионов лет назад

Vogel et al. 2010

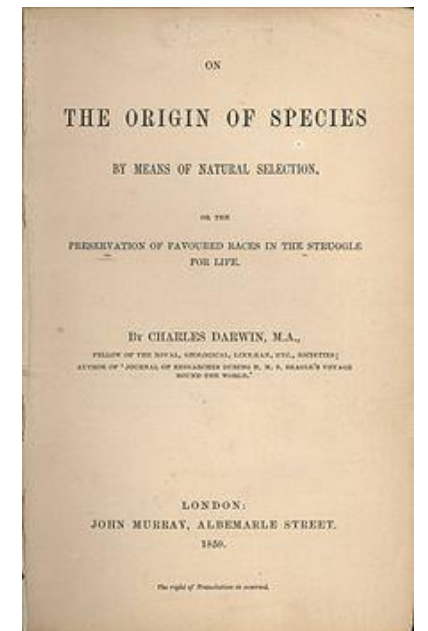
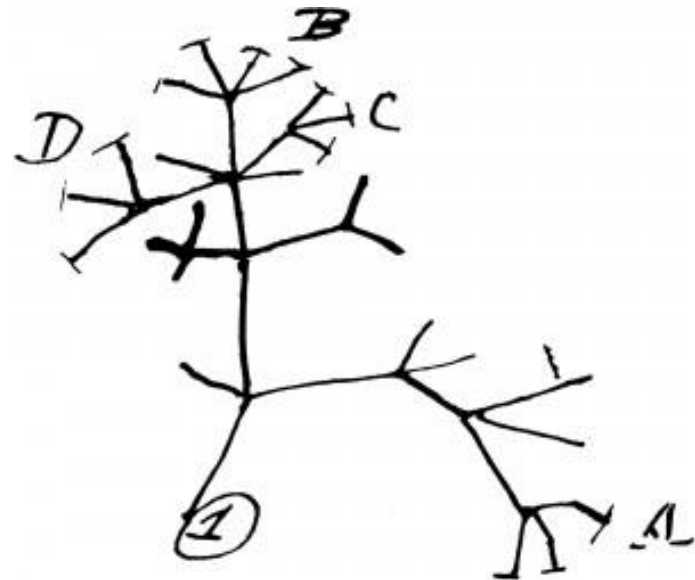
Различия геномов



Доместикация и полиплоидия

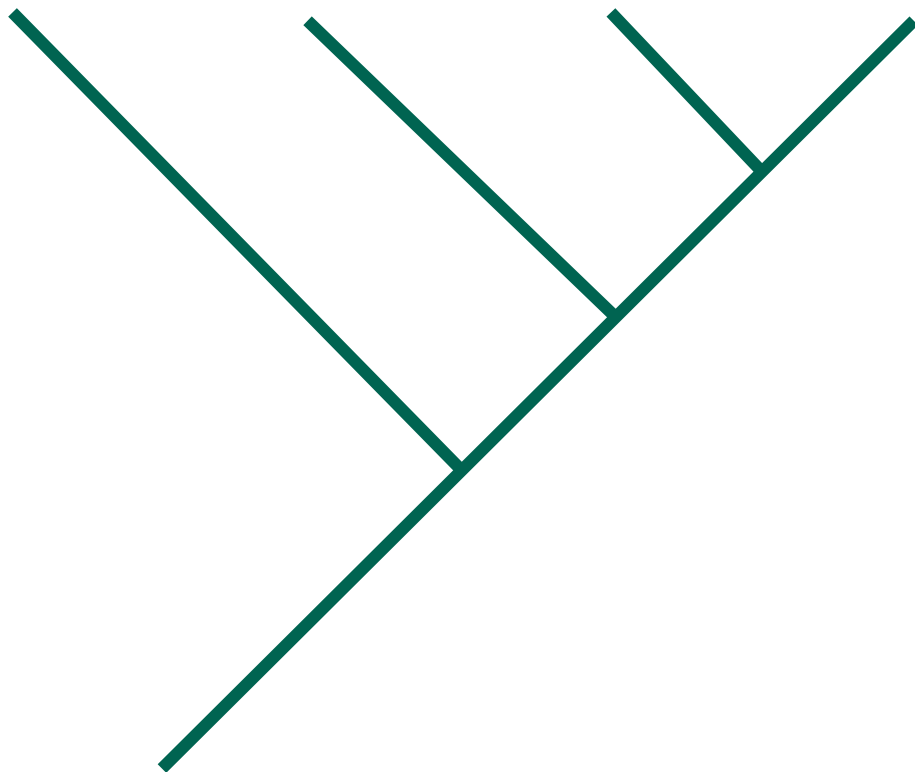
Глава I. ВАРИАЦИИ ПРИ ДОМЕСТИКАЦИИ

Глава II. ВАРИАЦИИ В ПРИРОДЕ



Доместицированные растения – модель эволюции

Дикие предки

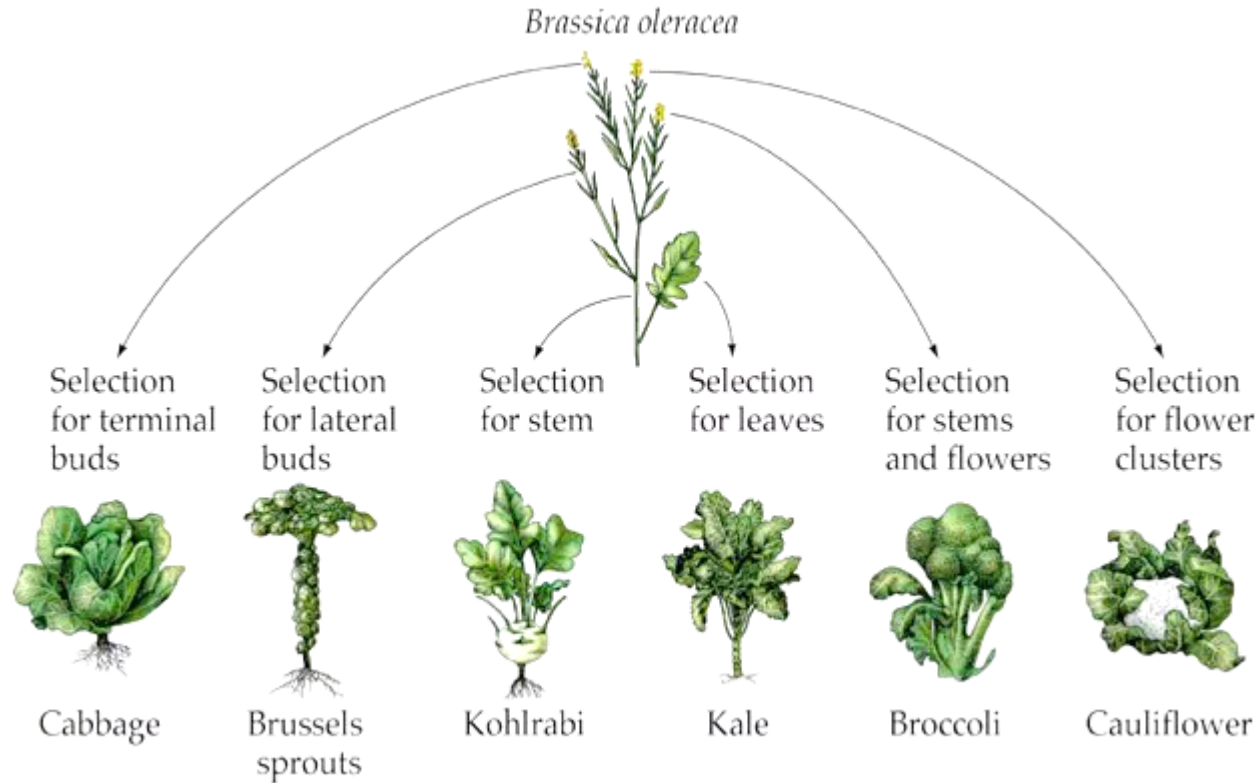


Сельскохозяйственные
культуры

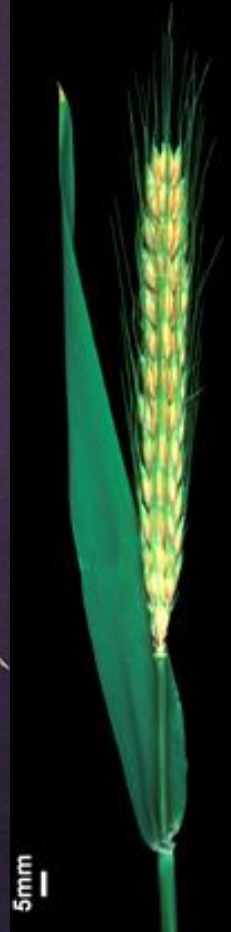
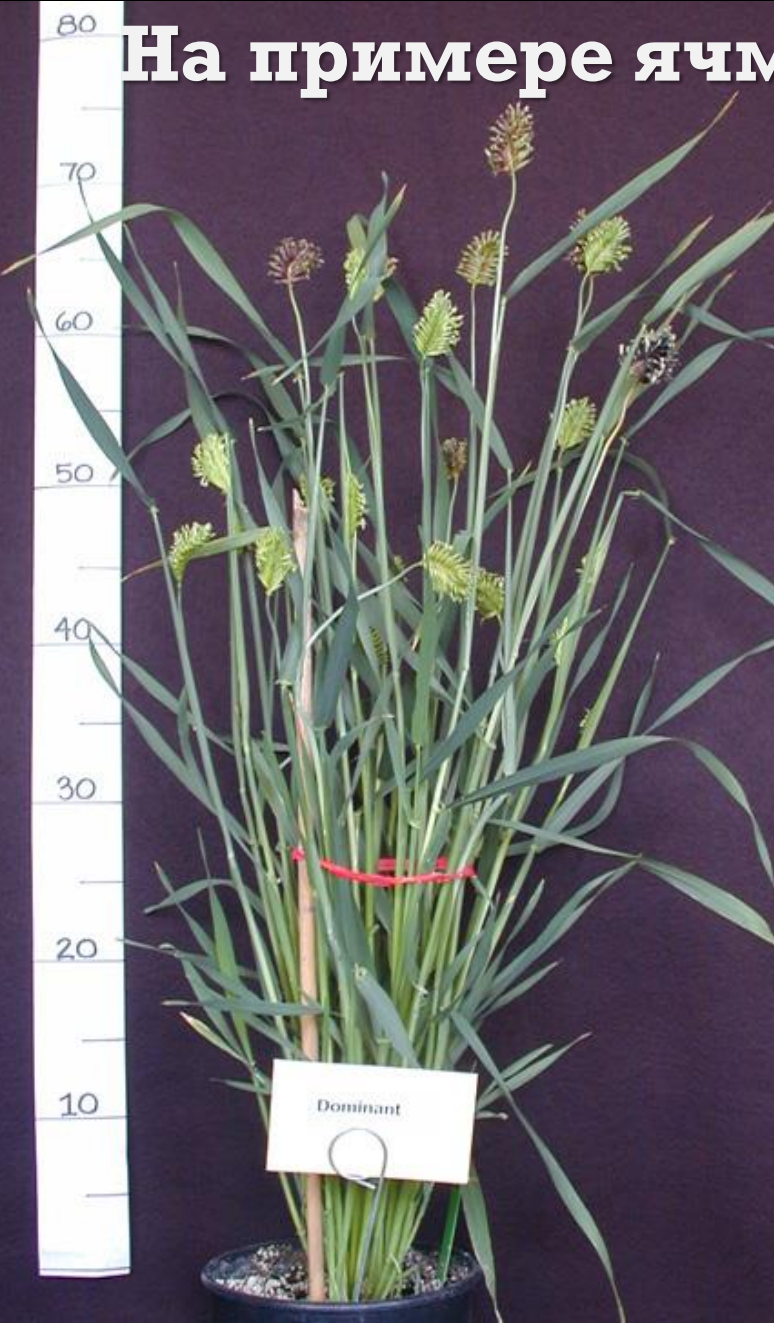


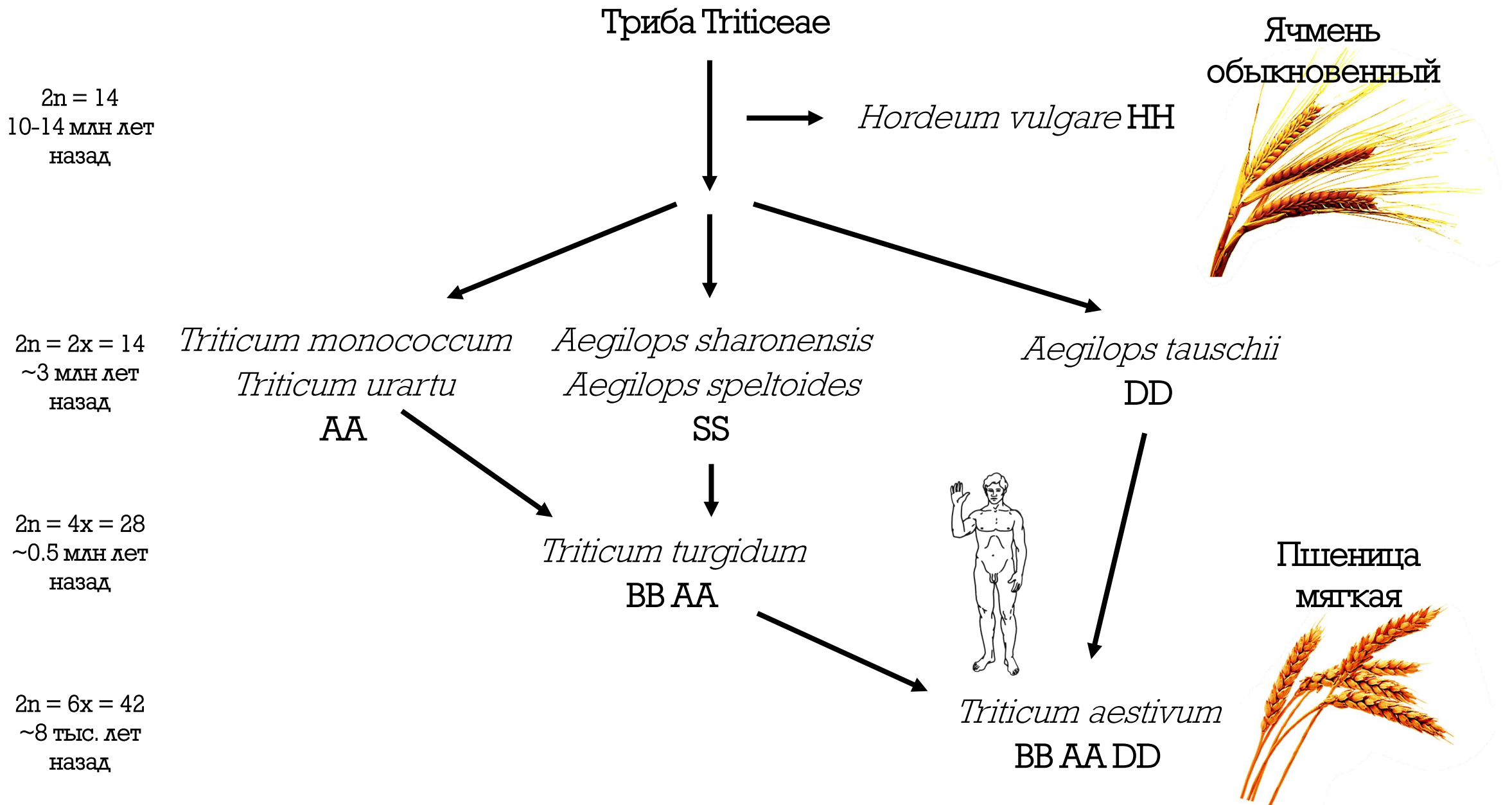
~250 видов растений
Все моложе 12 000 лет

Отбор на примере капусты



На примере ячменя





$$2n = 2x = 14$$

Triticum urartu
AA



$$2n = 4x = 28$$

Triticum turgidum
BB AA

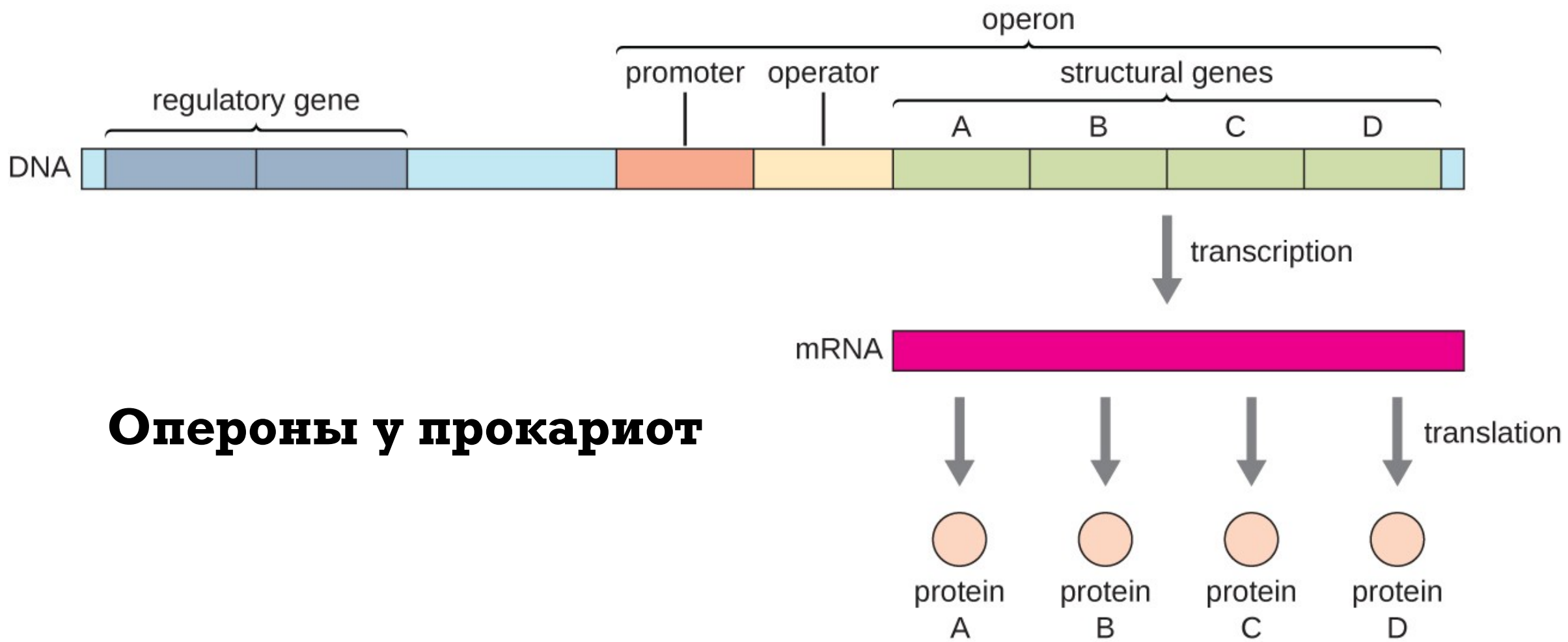


$$2n = 6x = 42$$

Triticum aestivum
BB AA DD

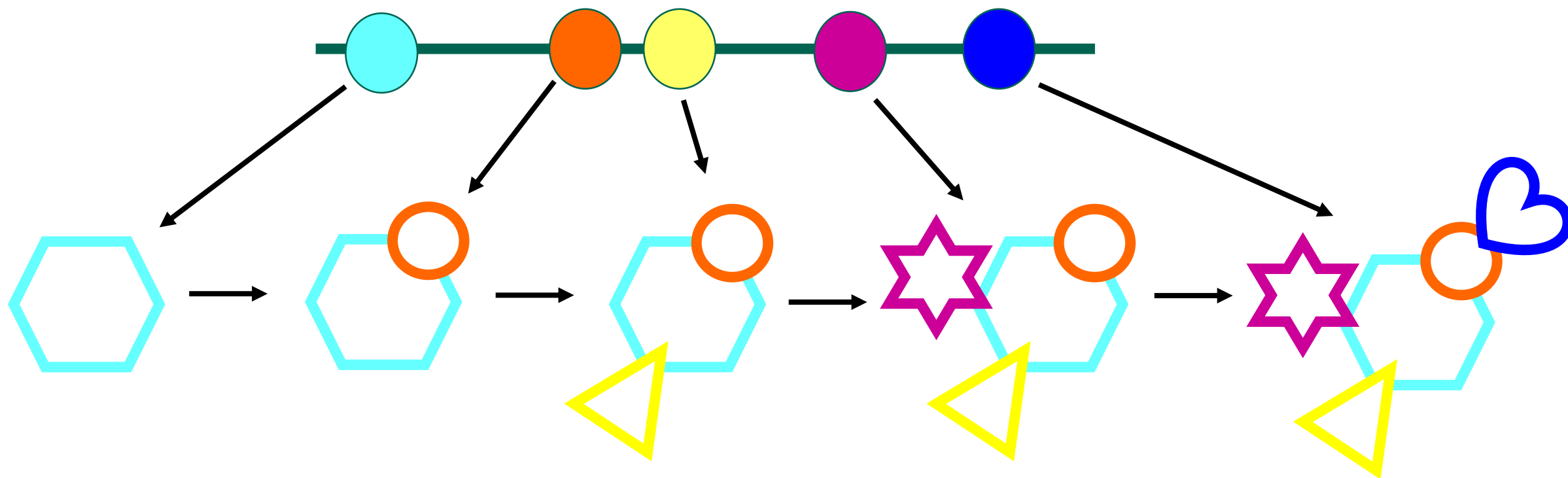


Опероны и кластеры генов у прокариот и эукариот



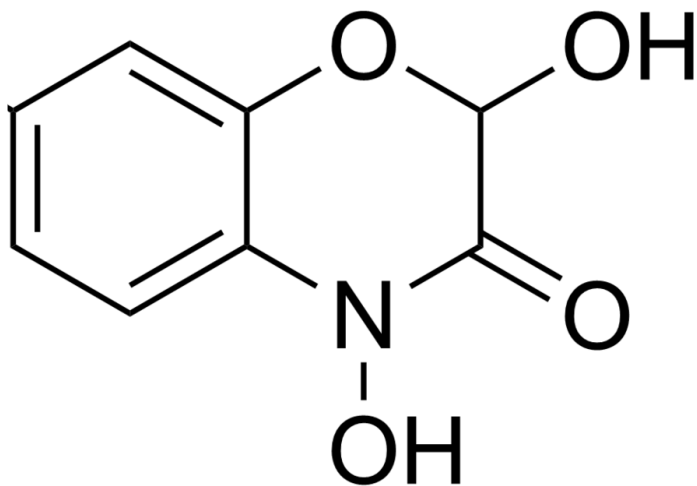
Опероны у прокариот

Кластеры генов у растений



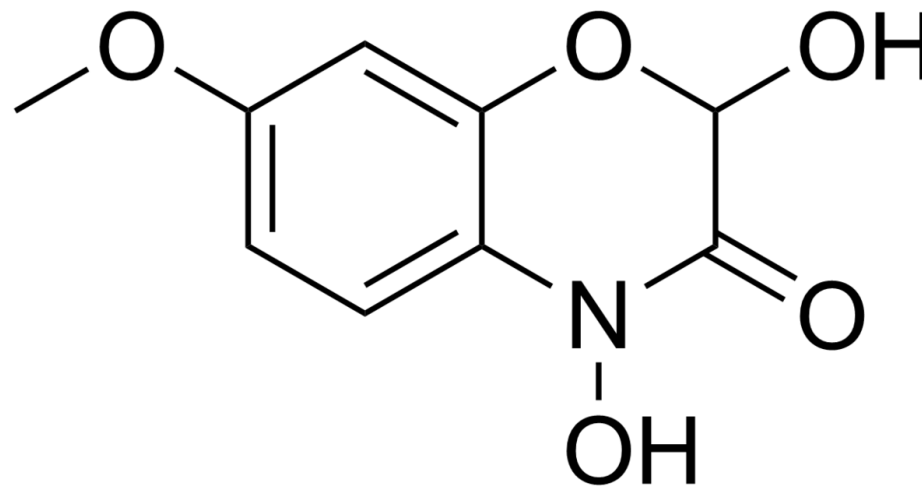
Защита против насекомых и микробных патогенов у Злаков

DIBOA



2,4-дигидрокси-1,4-бензоксазин-3-он

DIMBOA

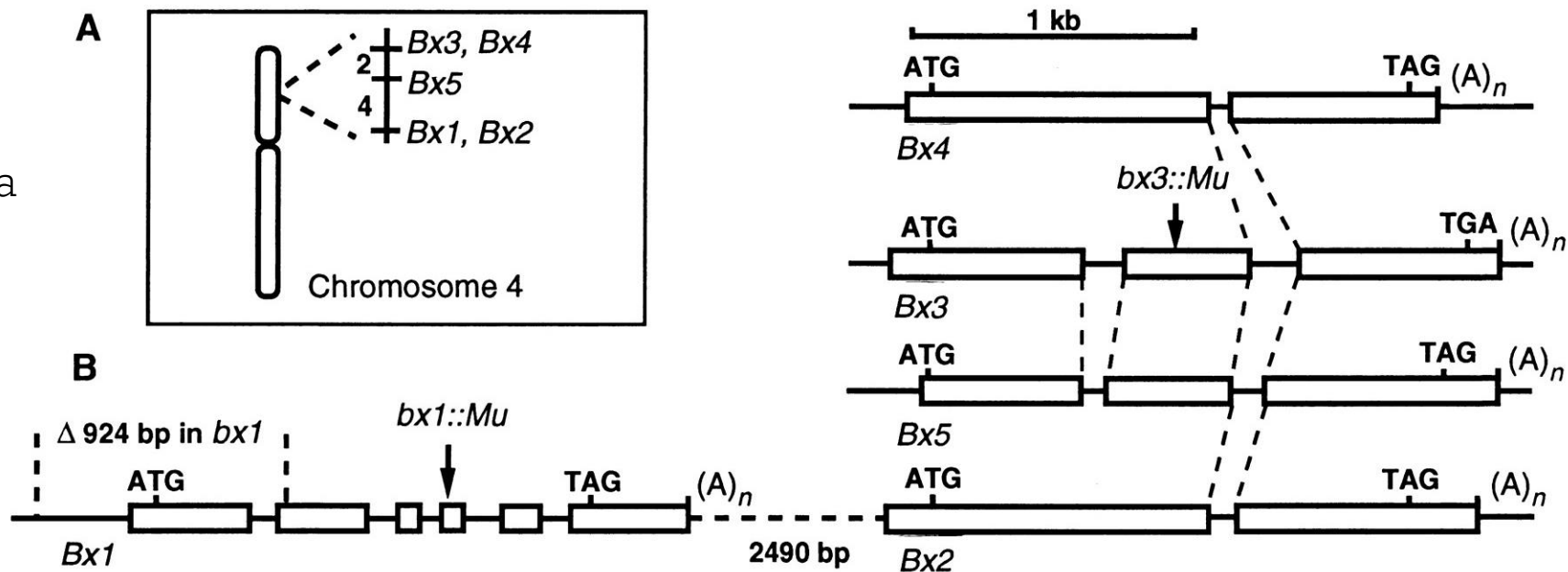


2,4-дигидрокси-7-метокси-1,4-бензоксазин-3-он

У кукурузы

Локусы 4Н:

- Вх 1 триптофан-синтаза
 - Вх 2
 - Вх 3
 - Вх 4
 - Вх 5
- } цитохром-Р450-
зависимые
монооксигеназы



Frey et al. 1997

Science 01 Aug 1997:

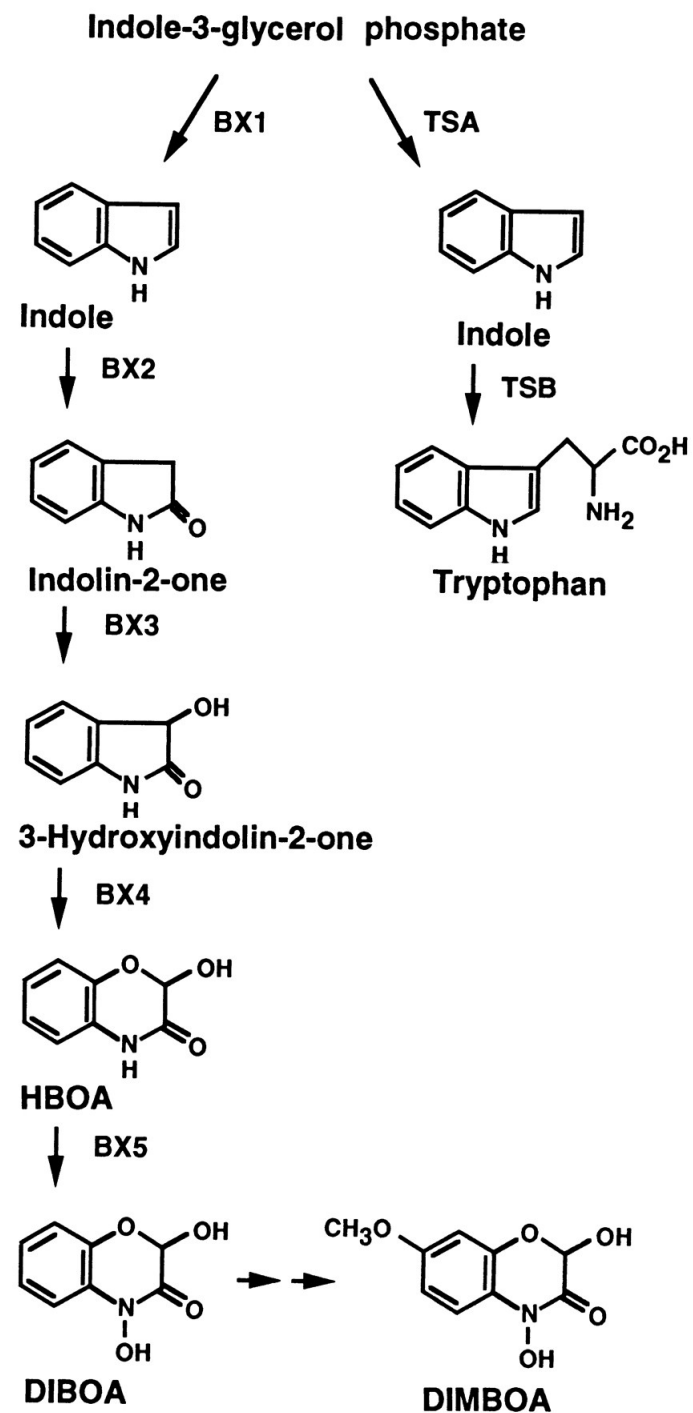
Vol. 277, Issue 5326, pp. 696-699

DOI: 10.1126/science.277.5326.696

У кукурузы

Локусы 4Н:

- Вх 1 триптофан-синтаза
 - Вх 2
 - Вх 3
 - Вх 4
 - Вх 5
- цитохром-Р450-
зависимые
монооксигеназы



Frey et al. 1997
 Science 01 Aug 1997:
 Vol. 277, Issue 5326, pp. 696-699
 DOI: 10.1126/science.277.5326.696

O=C1OC2=CC=C(OC)C=C2N(O)C1=O.O=C(O)C(=O)O

DIMBOA-Glu


$$\text{H}_3\text{C}-(\text{CH}_2)_{12}-\overset{\text{O}}{\underset{14}{\parallel}}\text{C}-\overset{\text{O}}{\underset{16}{\parallel}}\text{C}-(\text{CH}_2)_{14}-\text{CH}_3$$

Protective leaf waxes



Noscapine

CNC(=O)OC1C[C@H](C)[C@H](O)[C@@H](C)[C@H]2[C@@H](C)[C@H](O[C@@H]3[C@H](O)[C@@H](CO[C@@H]4[C@H](O)[C@@H](CO[C@@H]5[C@H](O)[C@@H](CO)O5)O[C@H]4[C@@H](O)[C@H](C)[C@H]3C)C[C@H](C)[C@H](C)[C@H]21

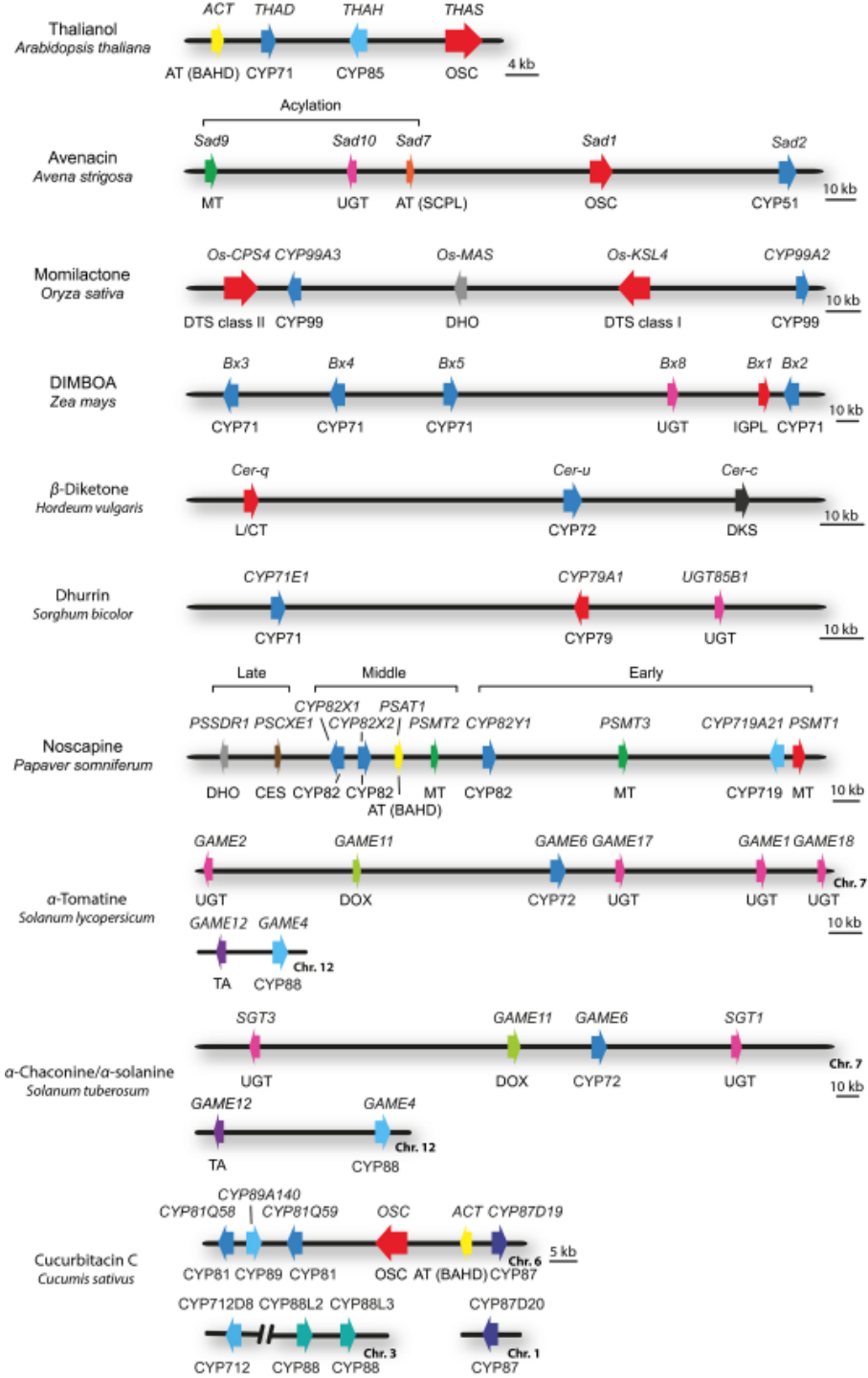
Пример

Disease resistance

**Примеры соединений, для которых
основные метаболические пути
характеризовались обнаружением
кластеров на основе признаков.**

Bitterness

Nützmann et al., 2016

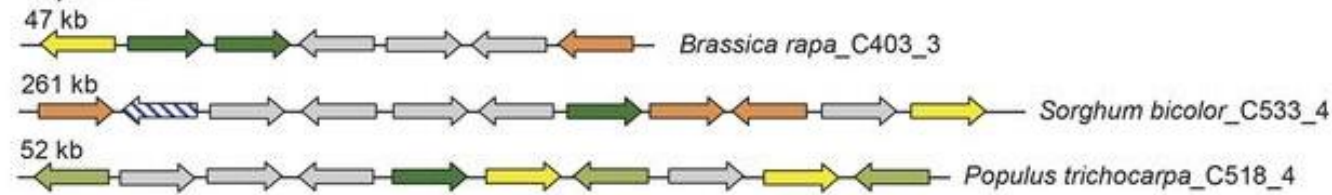


Геномная организация кластеров метаболических генов растений

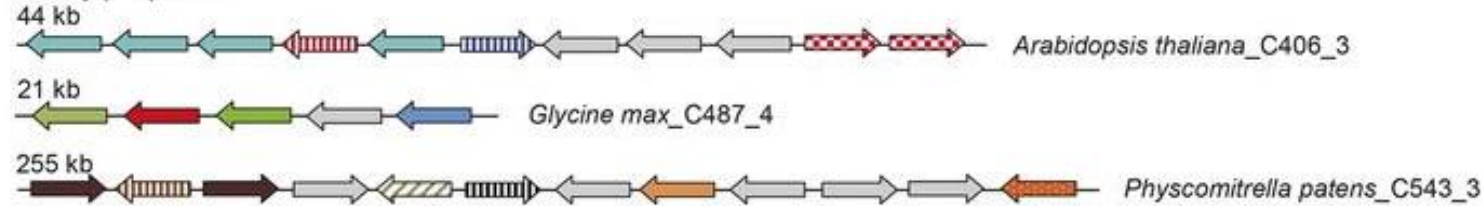
- от ~35 до нескольких сотен kbp
- состоят из трех-десяти генов

Nützmann et al., 2016

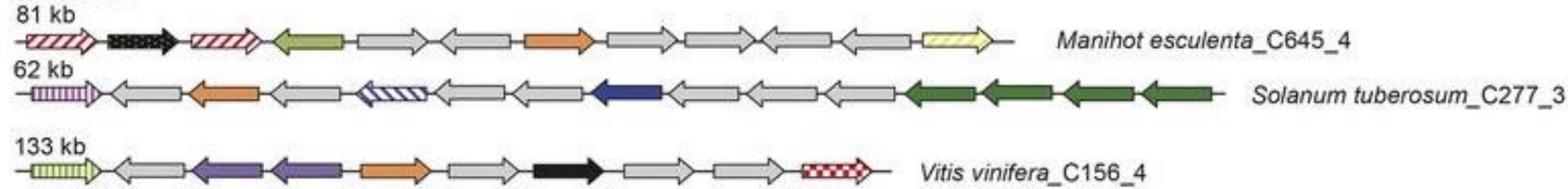
Terpenoids:



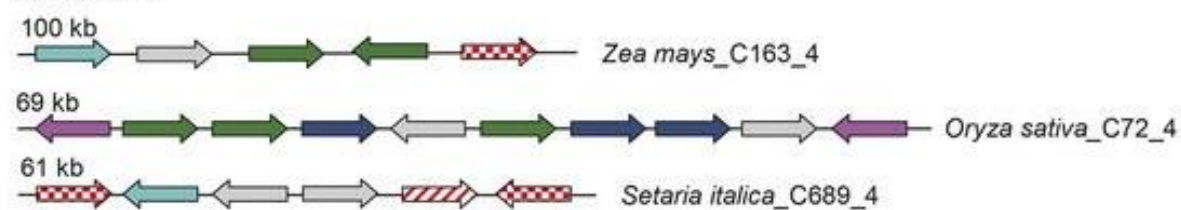
Phenylpropanoids:



Alkaloids:



Unknown:



Signature enzymes

- terpene synthase
- phenylalanine ammonia lyase
- flavonol synthase
- flavanone-3-hydroxylase
- naringenin chalcone synthase
- secologanin synthase
- S-norlaudanosoline synthase
- strictosidine synthetase
- chalcone isomerase

Tailoring enzymes

- acetyltransferase
- P450
- glycosyltransferase
- methyltransferase
- dioxygenase
- acyltransferase
- polysaccharide-lyase

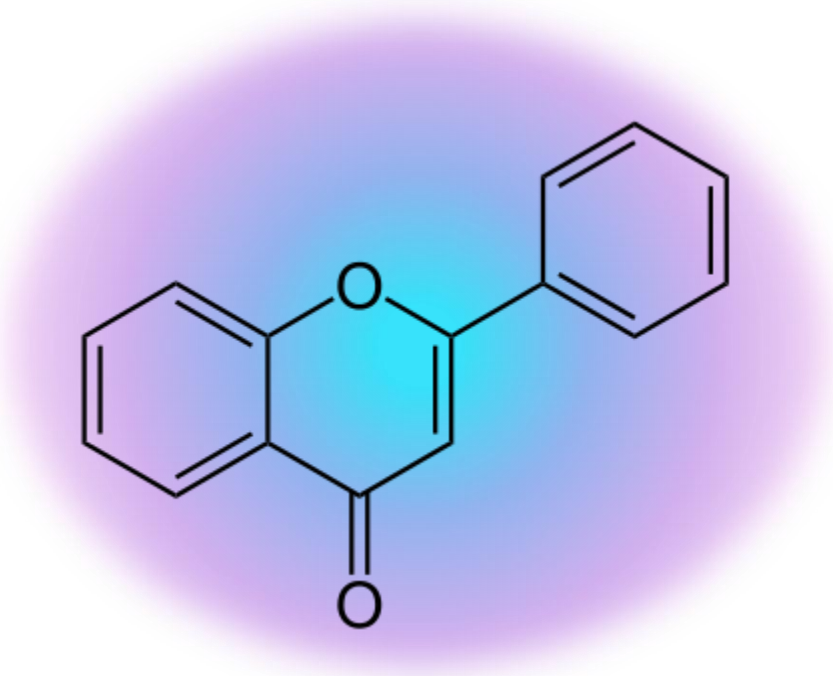
Others

- glycosidase
- dehydrogenase
- carboxy-lyase
- carboxylic ester hydrolase
- carbon-nitrogen ligase
- thioesterase

- enoylpyruvyltransferase
- phytol kinase
- nucleosidase
- GTPase
- transporter
- non-enzyme

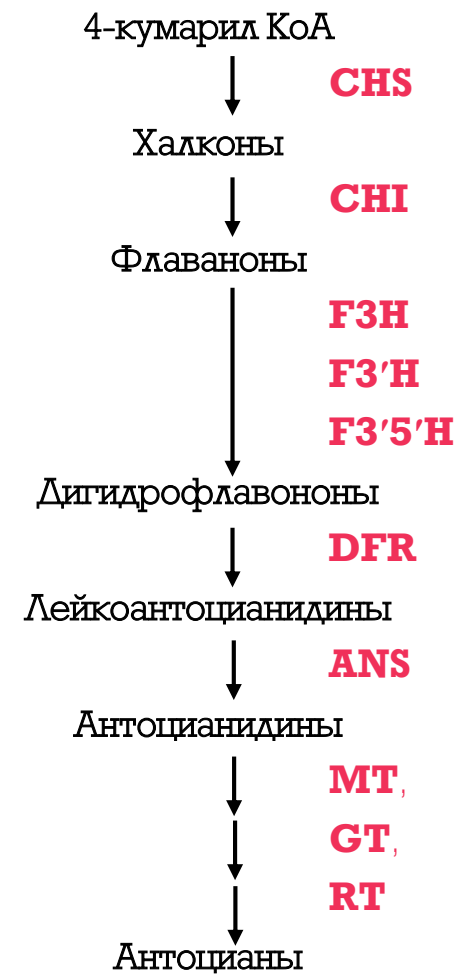
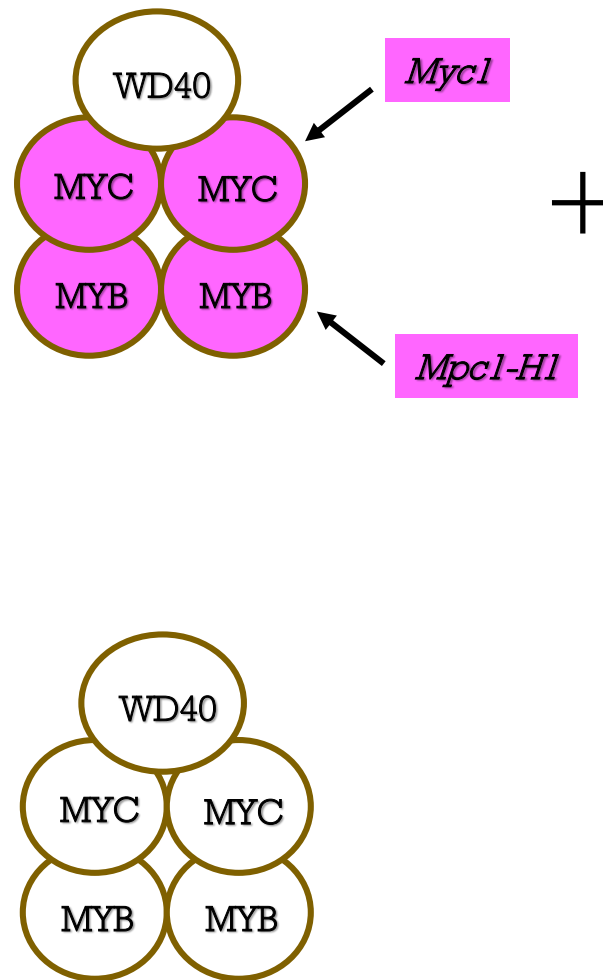
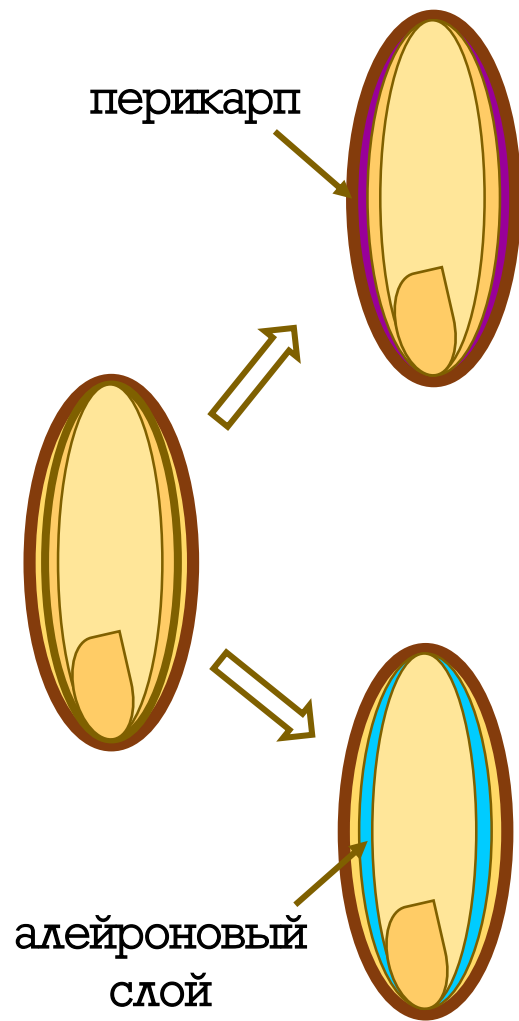
Гены биосинтеза терпенов, алкалоидов и фенилпропаноидов

Вторичные метаболиты ФЛАВОНОИДЫ

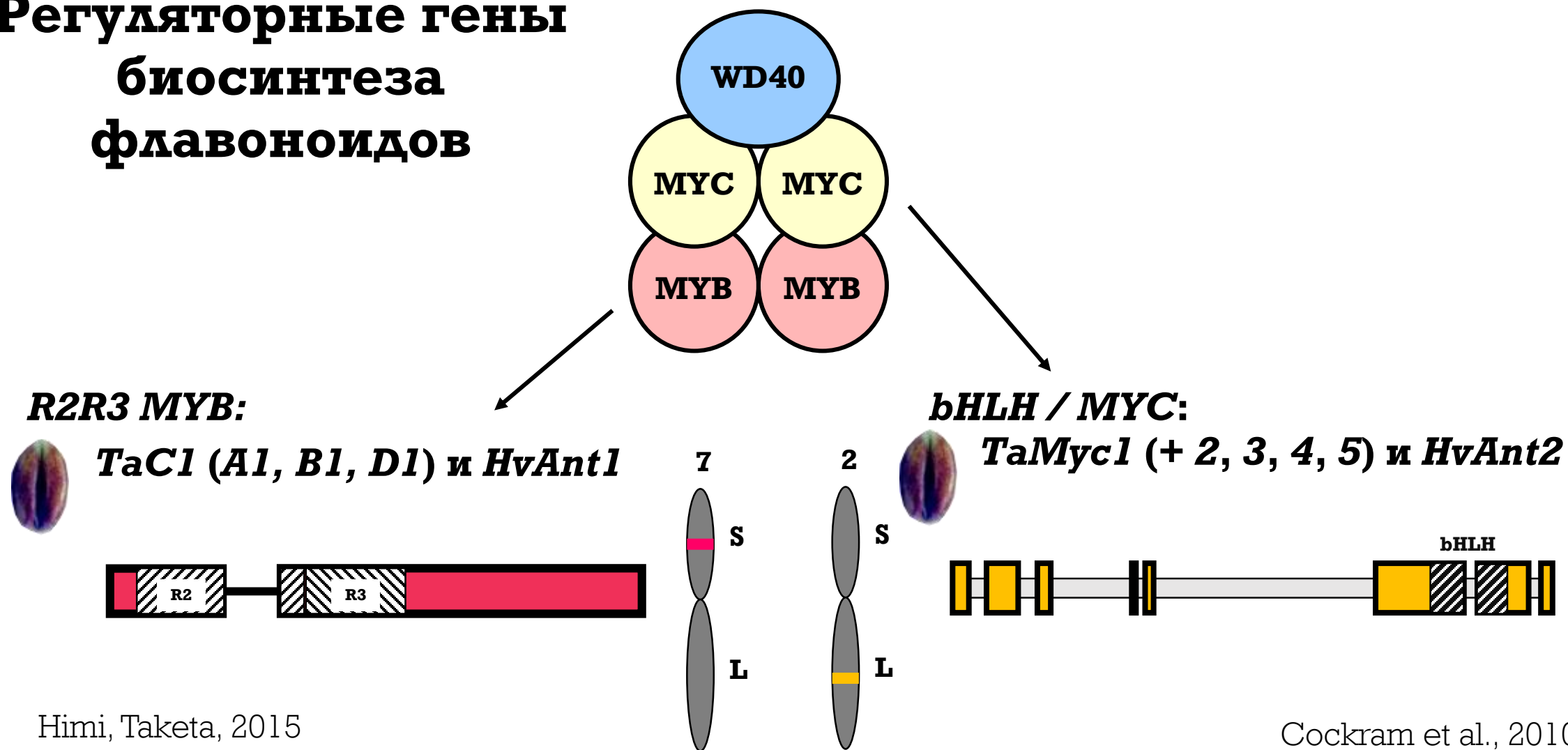


- привлечение опылителей;
- привлечение распространителей семян;
- регуляция процессов дыхания, онтогенеза, ростовых процессов;
- адаптация растений к неблагоприятным условиям окружающей среды;
- предупреждение преждевременного прорастания семян;
- выполнение сигнальных функций;
- антиоксидантная активность

и многие другие функции



Регуляторные гены биосинтеза флавоноидов



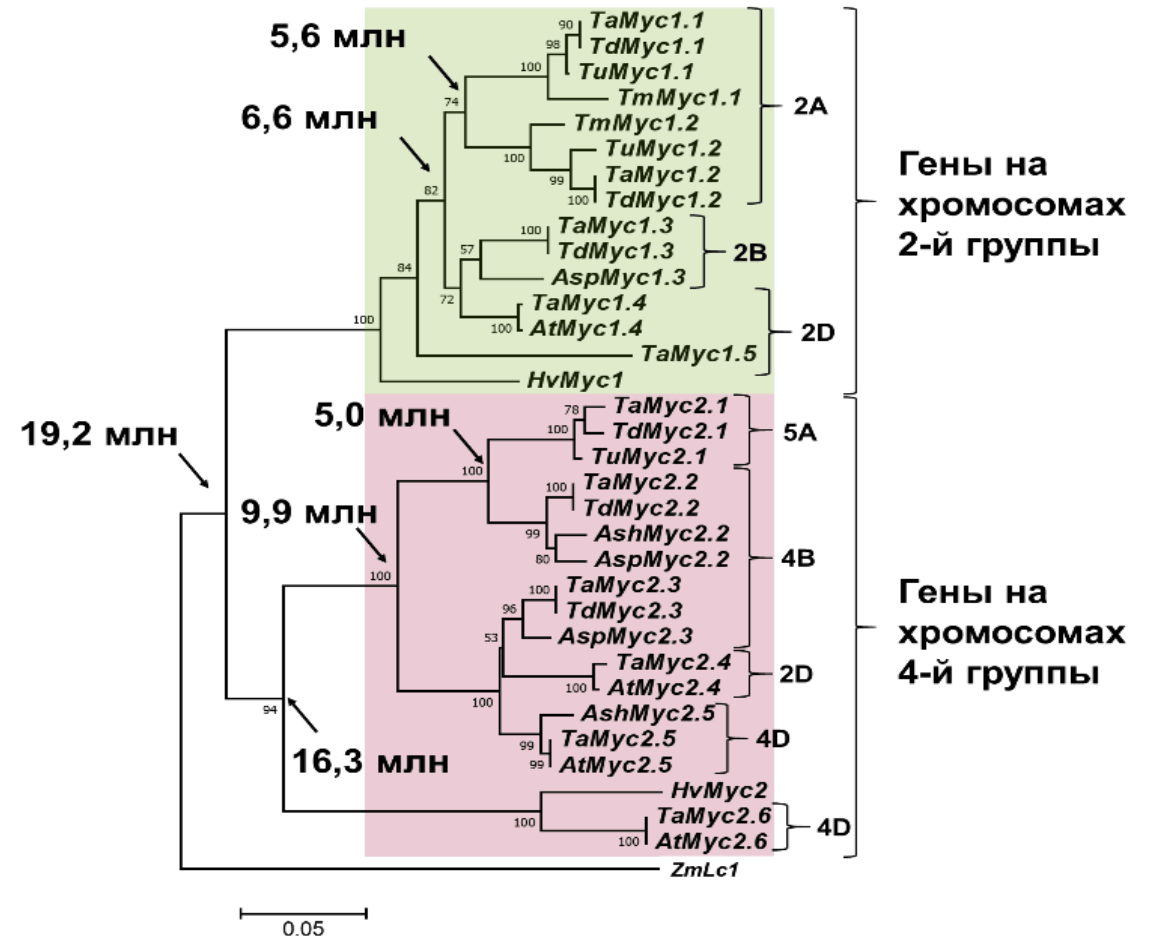
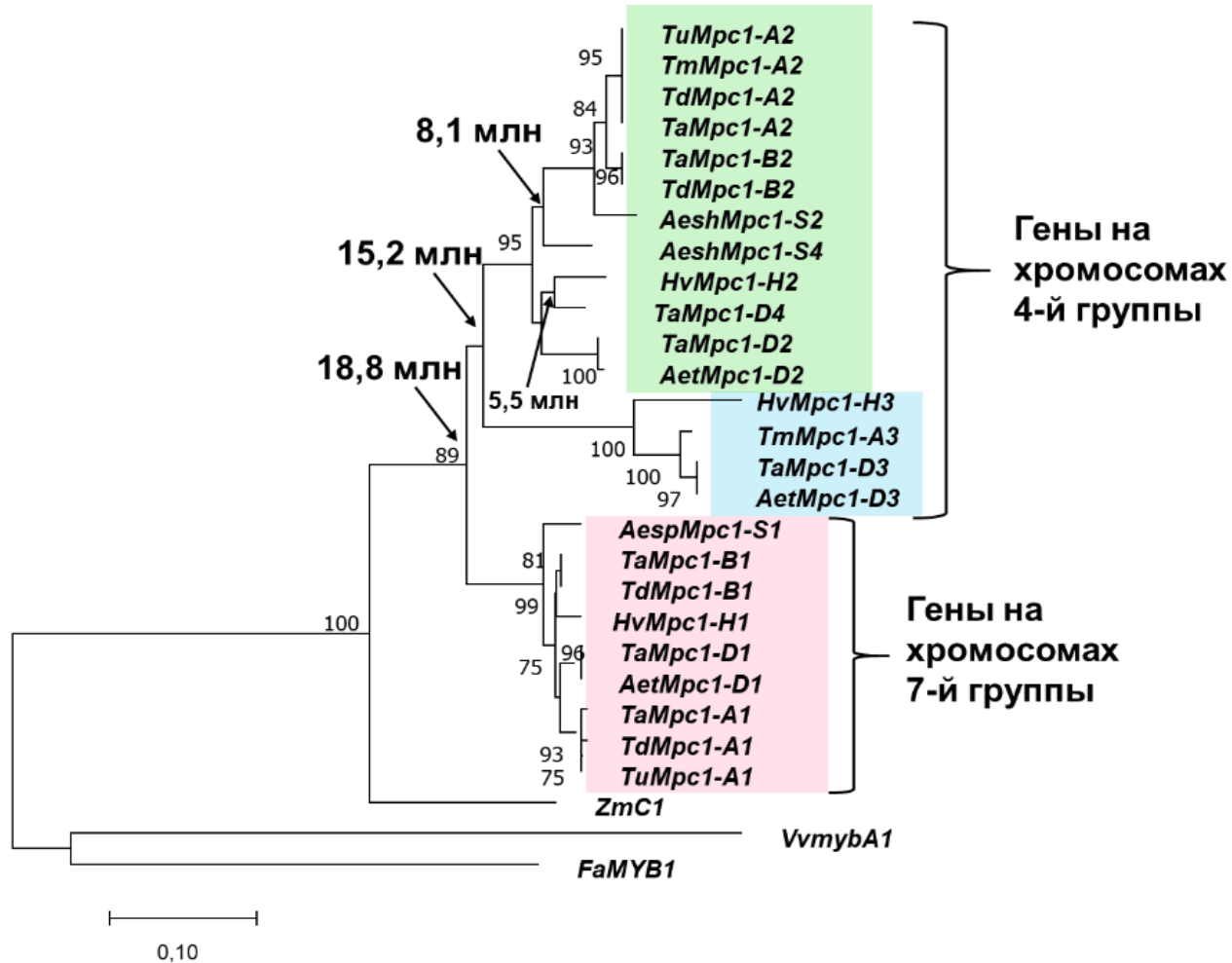
Himi, Taketa, 2015

Shin et al., 2016

Cockram et al., 2010

Shoeva et al., 2014

Анализ филогенетического сходства генов *Myb* и *bHLH*



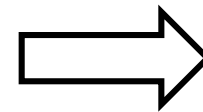
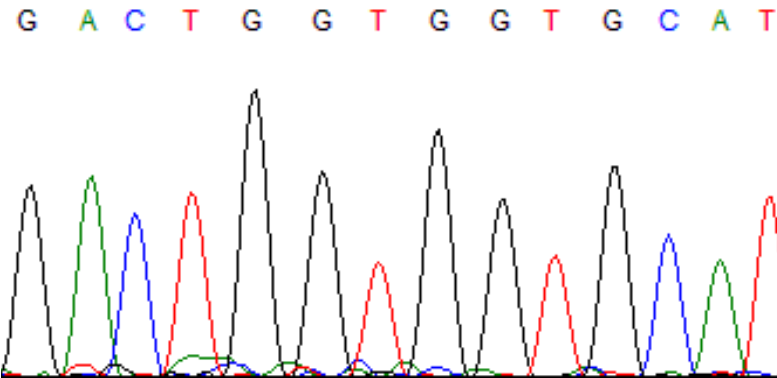
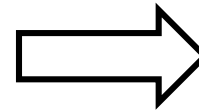
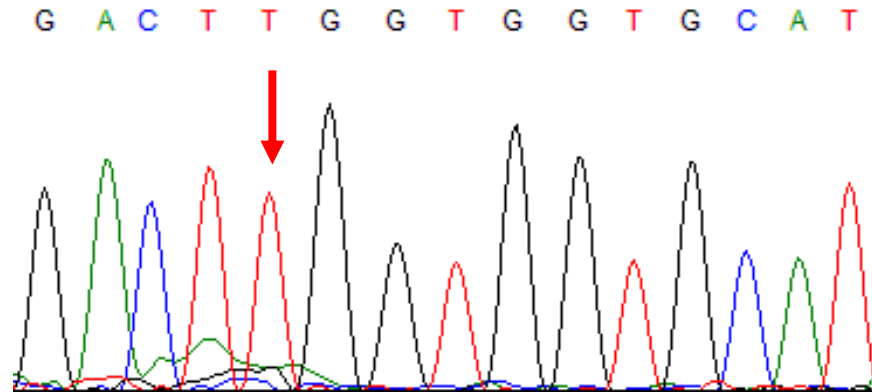
Bowman (BW)



Intense blue
aleurone (BA)



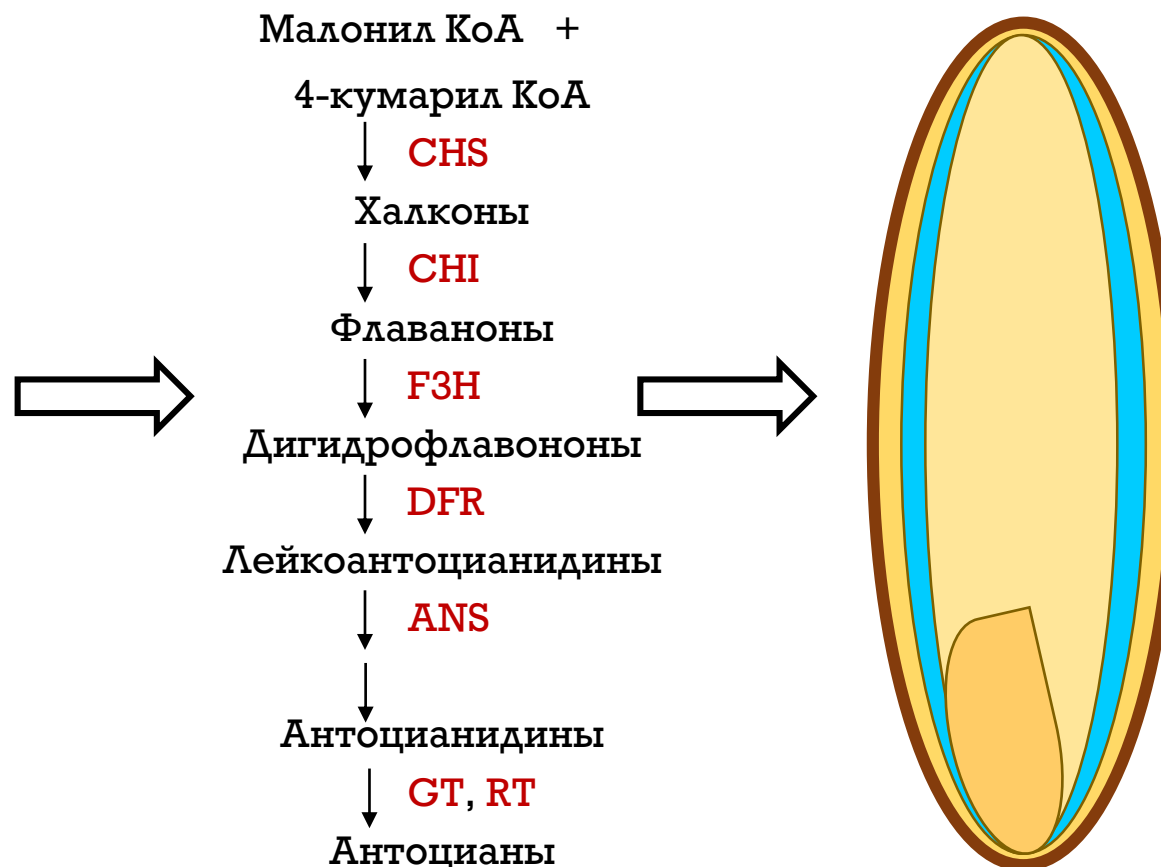
HvMyc2



bHLH

Антоциановая окраска зерновки

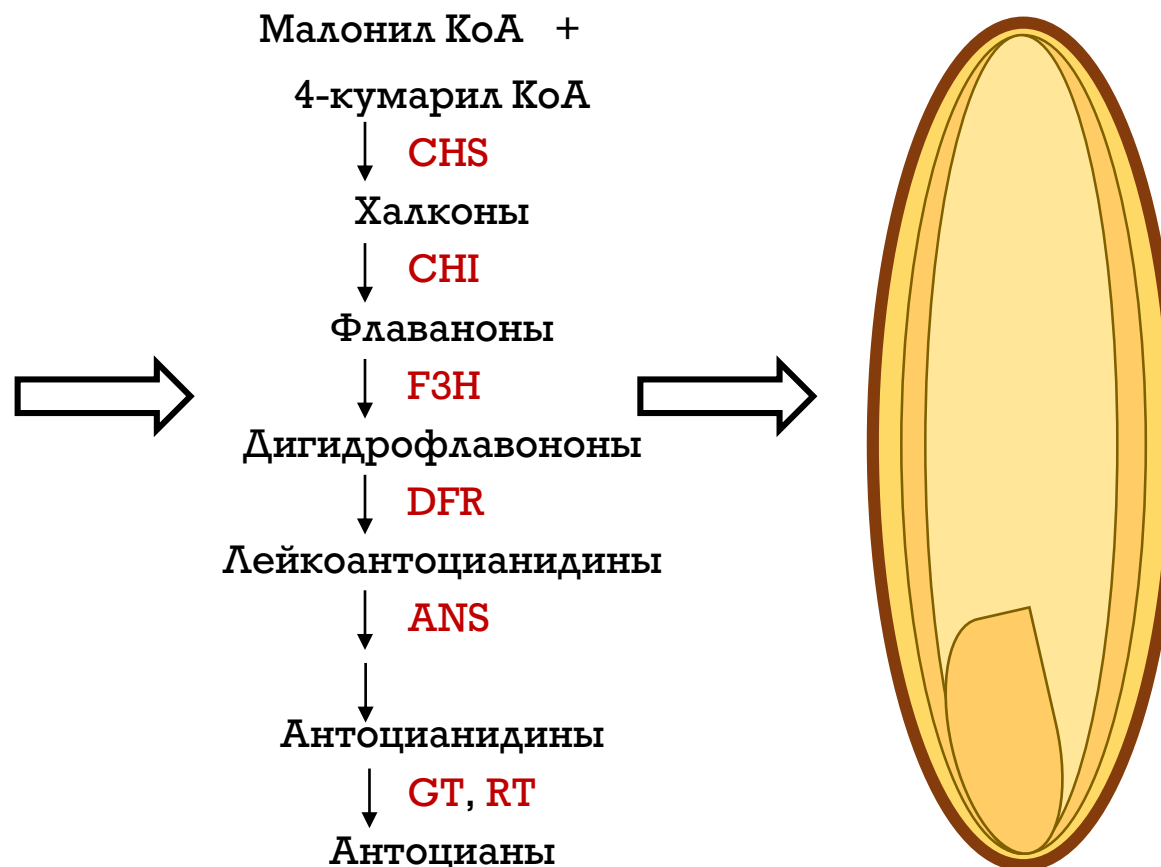
- Локусы:**
- ⇒ • Blx 1 – 4HL
 - Blx 2 – 7HL
 - ⇒ • Blx 3 – 4HL
 - ⇒ • Blx 4 – 4HL
 - Blx 5



Антоциановая окраска зерновки

Локусы:

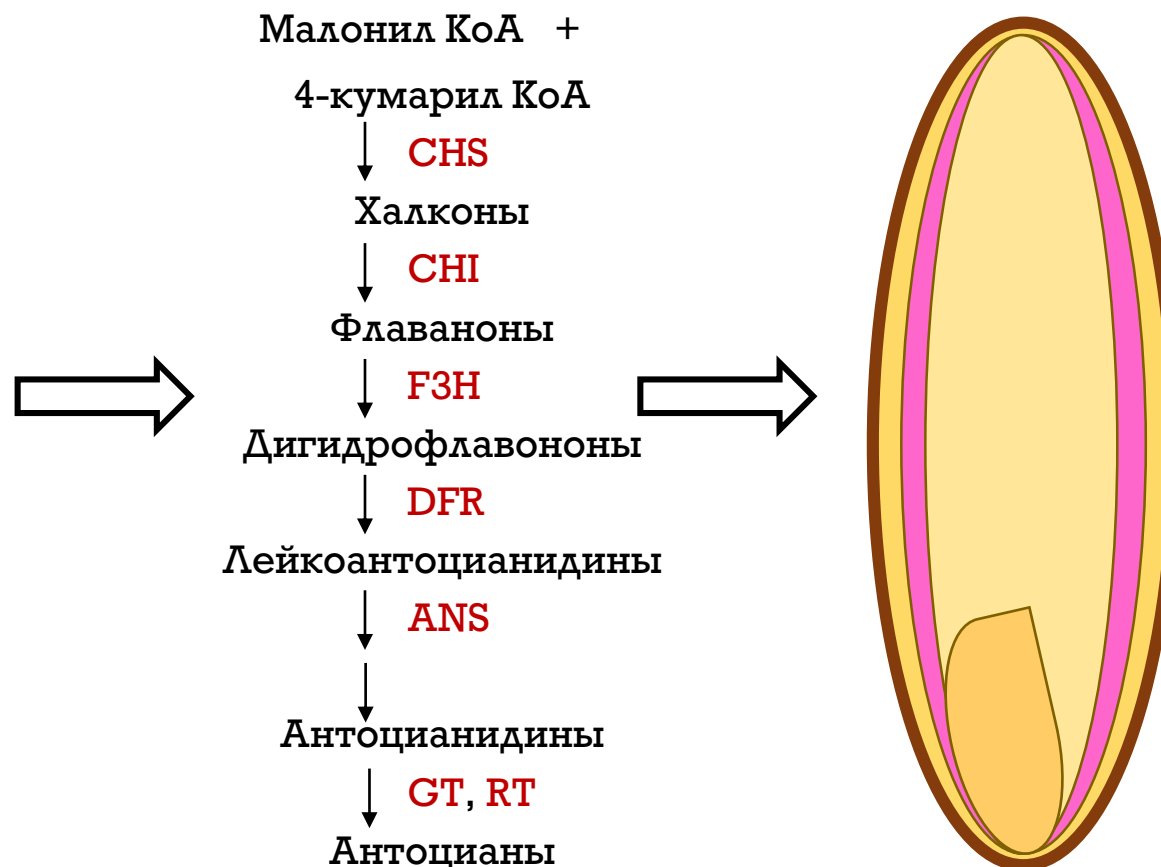
- Blx 1 – 4HL
- Blx 2 – 7HL
- Blx 3 – 4HL
- Blx 4 – 4HL
- Blx 5



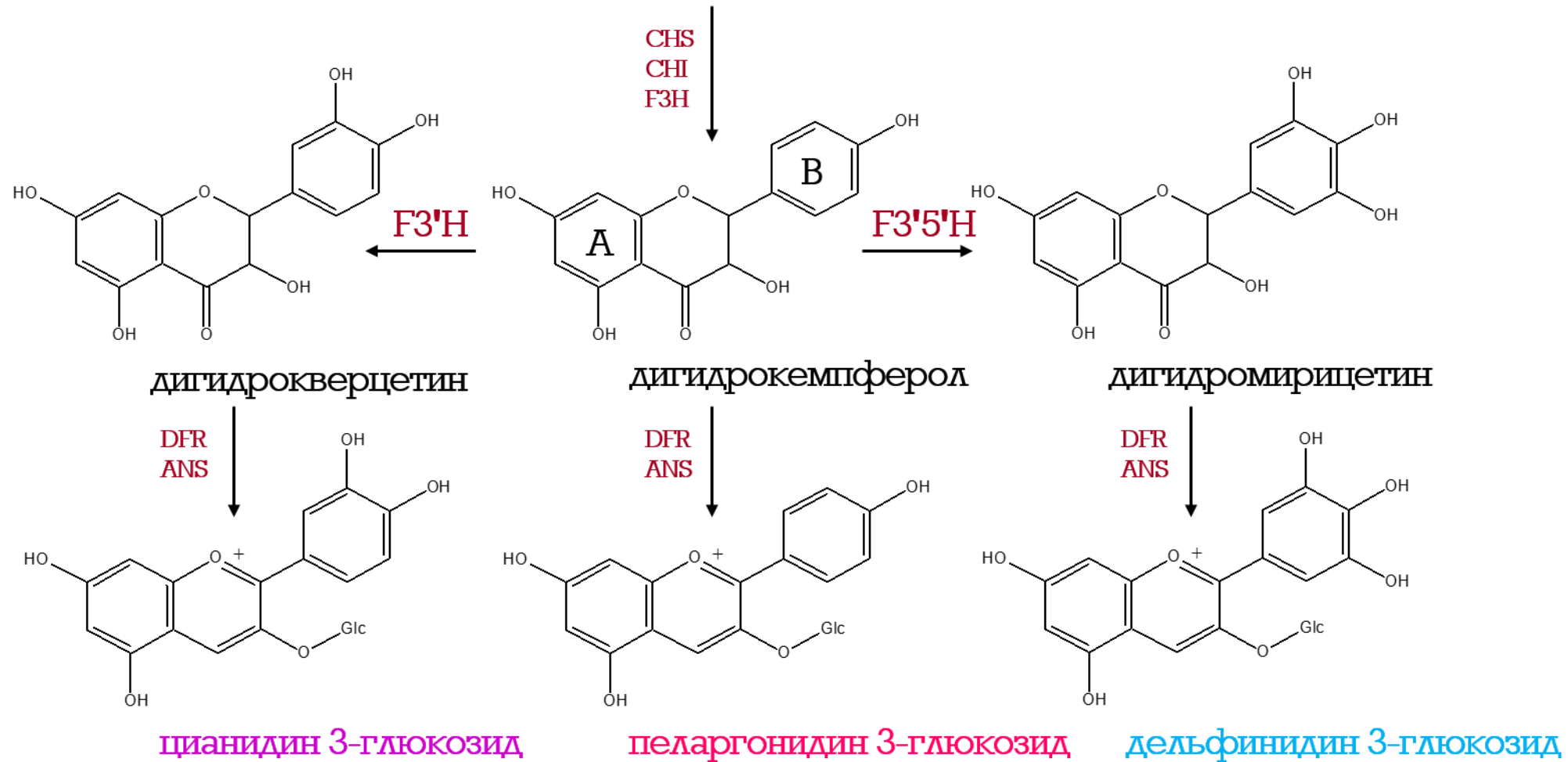
Антоциановая окраска зерновки

Локусы:

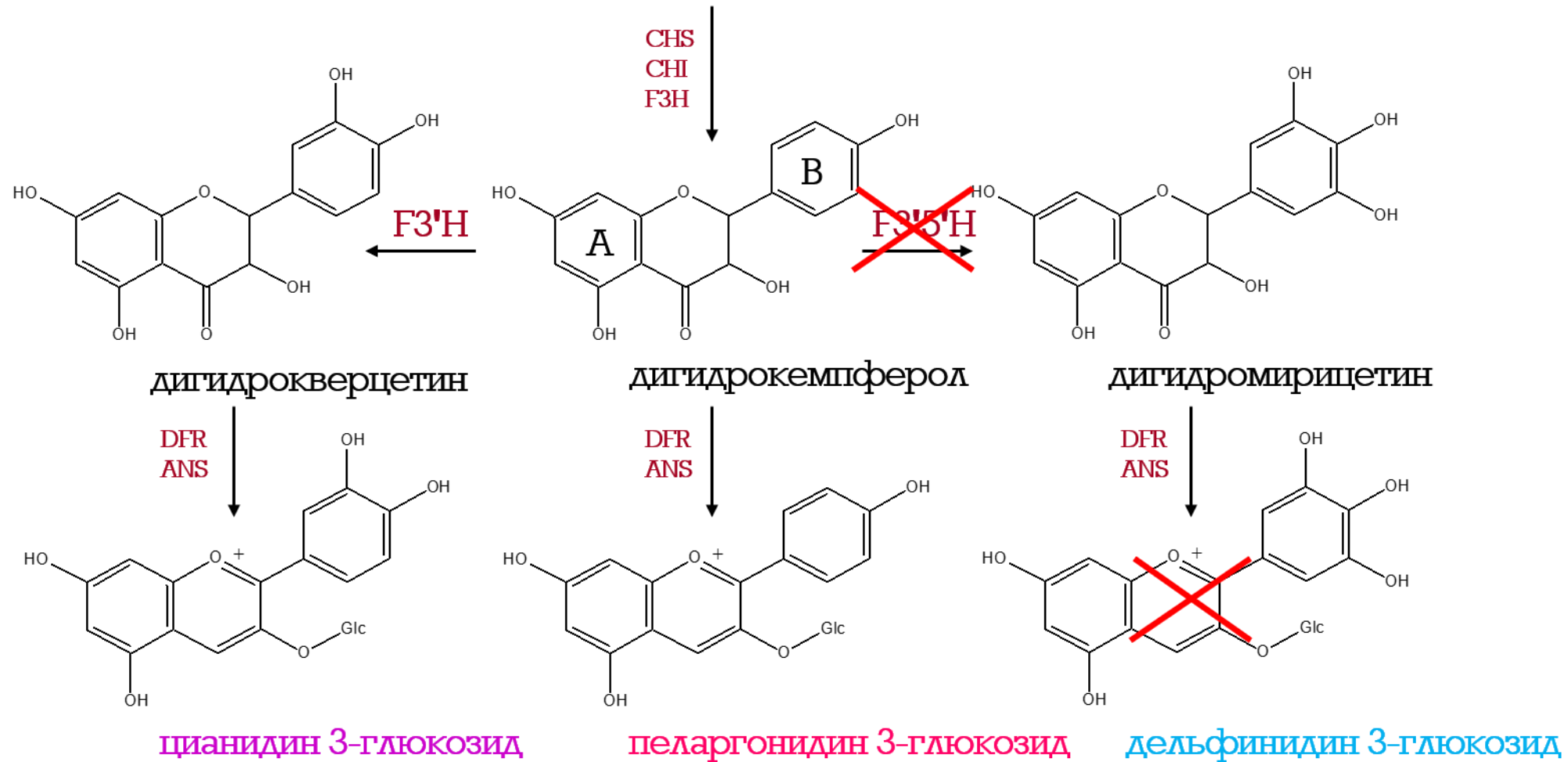
- Blx 1 – 4HL
- Blx 2 – 7HL
- Blx 3 – 4HL
- **Blx 4 – 4HL**
- Blx 5

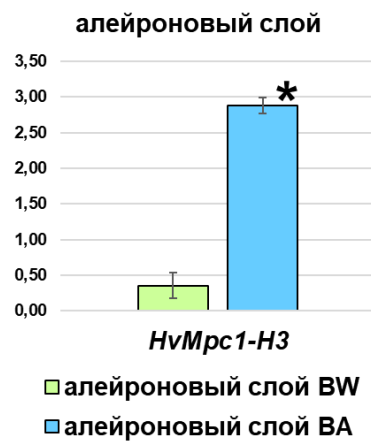


Путь биосинтеза антоцианов



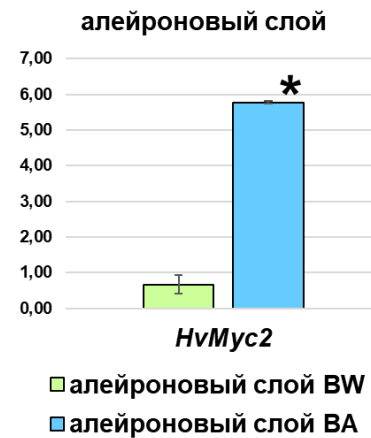
Путь биосинтеза антоцианов





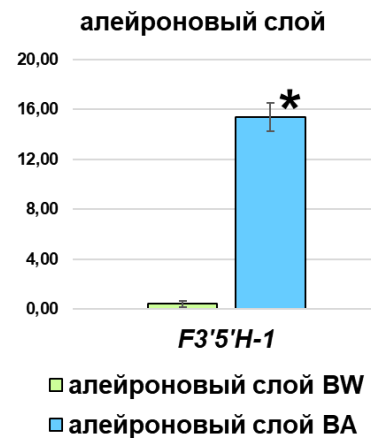
Blx-1

chr4H:533784301-
533784970



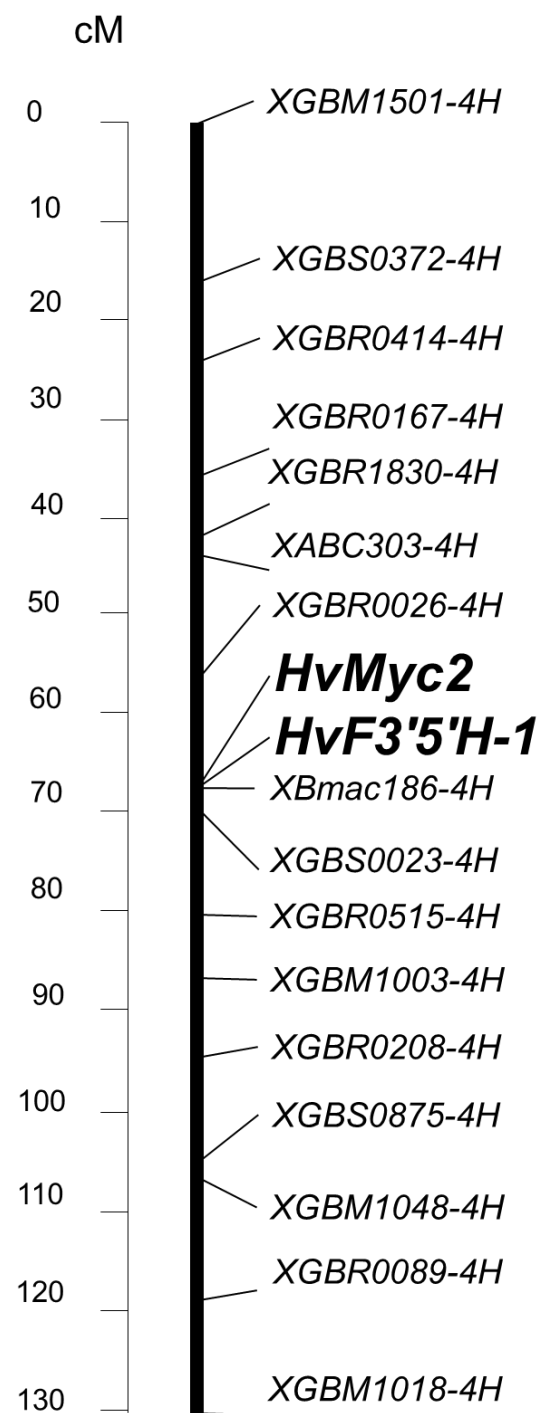
Blx-3

chr4H:534044159-
534066299



Blx-4

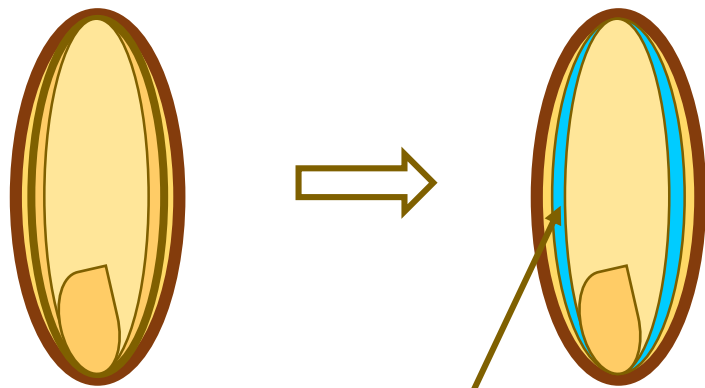
chr4H:534190658-
534192411



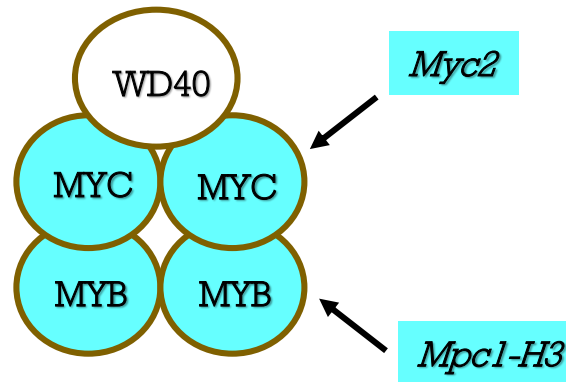
Гены *Blx* ячменя Хромосома 4H

Strygina et al., 2017
Strygina, Khlestkina, 2018
Vikhorev et al., 2018

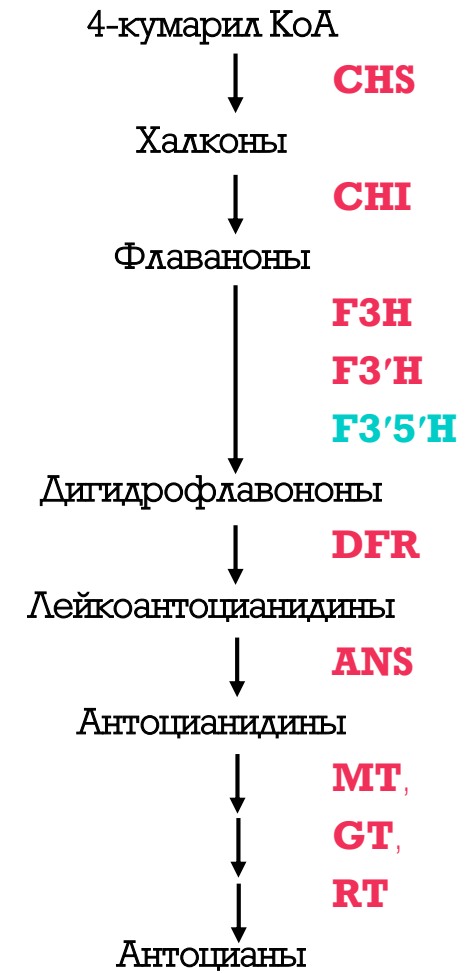
Антоциановая окраска зерновки



алейроновый
слой



+





Геномы растений:

- Большой разброс в размерах
- Большое число повторов
- Высоко динамичны