

Что нового можно узнать о насекомых, изучая эпигенетику?



Т.Д. Колесникова

ИМКБ СО РАН



НГУ (курс «Эпигенетические механизмы регуляции экспрессии генов»)

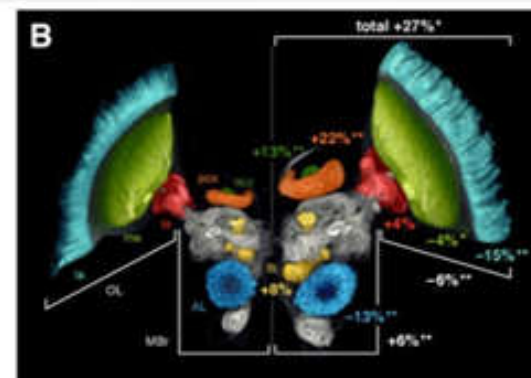




Figure 1. *Blatna detularia* caterpillars on birch (left) and willow (right). doi:10.1371/journal.pone.0001142.g001

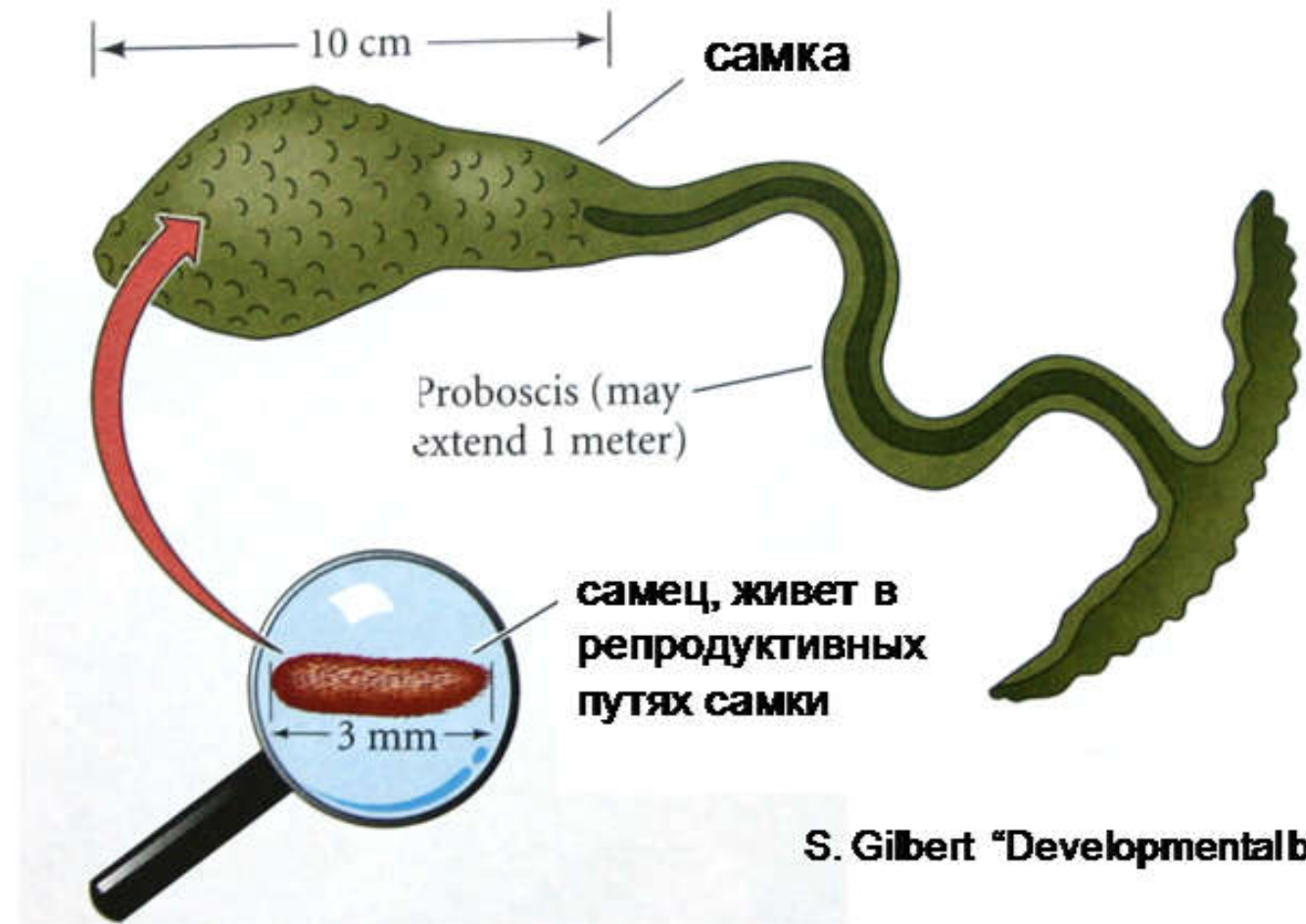
Полифенизм у насекомых

- *Полифенизм насекомых как уникальная эпигенетическая модель*
- *Что нового можно узнать о полифенизме насекомых, изучая эпигенетику*



Полифенизм - способность одного и того же генотипа обеспечивать развитие двух или более дискретных фенотипов, причем выбор пути развития зависит от внешних условий.

Определение пола у *Bonnellia*



Способность к полифенизму – одна из важнейших причин эволюционного успеха насекомых.

Метаморфоз – распределение функций между стадиями: личинка питается и растет, имаго размножается и расселяется

Сезонные морфы – набор фенотипов, наиболее оптимально приспособленных к условиям сезона



Дискретные фенотипы, позволяющие приспособиться к различным условиям по количеству и типу пищи

Дискретные фенотипы, связанные с различными поведенческими стратегиями



Касты эусоциальных насекомых – разделение труда между морфами

Какие признаки чаще всего варьируют?



Simpson et al., Polyphenism in insects. Curr Biol. 2011

- **Различия по степени проявления морфологических признаков**
- **Варьирование длины крыльев (в том числе их полное отсутствие)**
- **Различия по фертильности или репродуктивной стратегии**
- **Различия по окраске тела или крыльев**

Какие признаки чаще всего варьируют?



Simpson et al., Polyphenism in insects.
Curr Biol. 2011

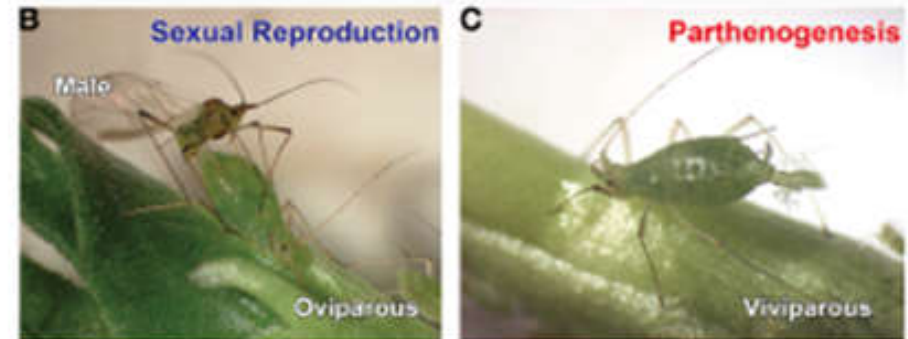


Xu et al., Nature. 2015 Mar 26;519(7544):464-7

- **Различия по степени проявления морфологических признаков**
- **Варьирование длины крыльев (в том числе их полное отсутствие)**
- **Различия по фертильности или репродуктивной стратегии**
- **Различия по окраске тела или крыльев**



Simpson et al., Polyphenism in insects.
Curr Biol. 2011



Ogawa, Miura, Aphid polyphenisms: trans-
generational developmental regulation through
viviparity
Front. Physiol., 24 January 2014

- **Различия по степени проявления морфологических признаков**
- **Варьирование длины крыльев (в том числе их полное отсутствие)**
- **Различия по фертильности или репродуктивной стратегии**
- **Различия по окраске тела или крыльев**



Wet-season (left) and dry-season (right) *Precis octavia* (fam. Nymphalidae) butterflies



Harlequin bugs, *Murgantia histrionica* (fam. Pentatomidae). Black and yellow individuals were reared at 22 and 30°C, respectively.

[Whitman, Agrawal](#). 2009. What is Phenotypic Plasticity and Why is it Important?

- **Различия по степени проявления морфологических признаков**
- **Варьирование длины крыльев (в том числе их полное отсутствие)**
- **Различия по фертильности или репродуктивной стратегии**
- **Различия по окраске тела или крыльев**

11 Endocrine Control of Insect Polyphenism

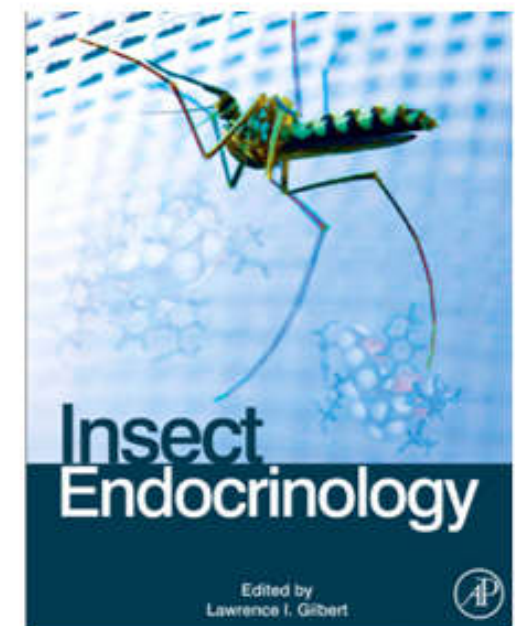
K. Hartfelder

Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto,
São Paulo, Brazil

D.J. Emlen

University of Montana, Missoula, MT, USA

© 2012 Elsevier B.V. All Rights Reserved



- **Варьирование длины крыльев (в том числе их полное отсутствие)**
- **Различия по фертильности или репродуктивной стратегии**
- **Различия по окраске тела или крыльев**
- **Различия по степени проявления морфологических признаков**

Выбор фенотипа определяется внешними условиями

Главные участники управления выбором направления развития – гормоны

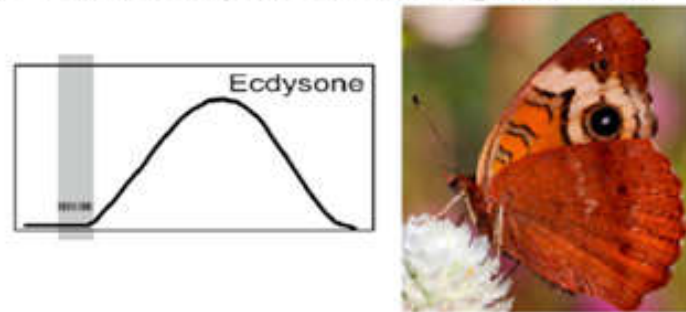
**juvenile hormone
ecdysteroids
insulin-signaling pathway**

Множество видов бабочек имеют сезонные морфы, различающиеся по цвету (темная-светлая окраска) и рисунку на крыльях

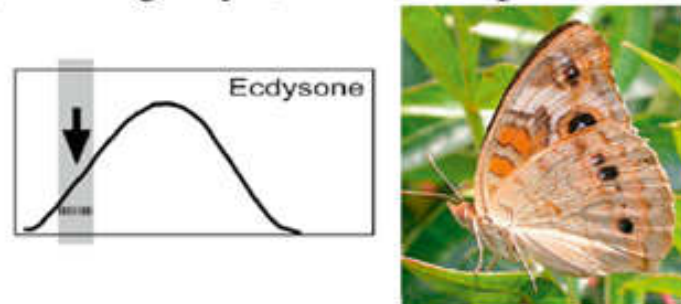
В основе вариаций лежит чувствительность к температуре и фотопериоду на стадии личинки

Junonia (Precis) coenia

(a) Short days, Cool temperatures

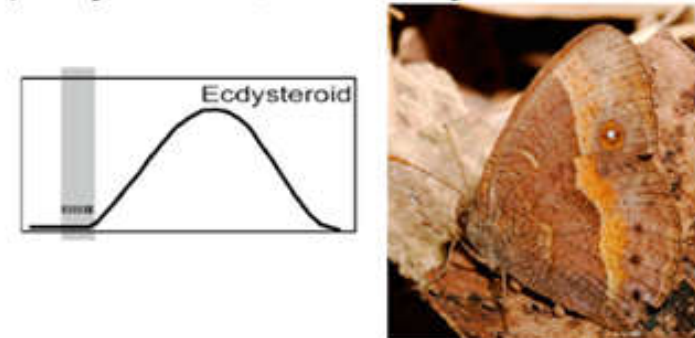


(b) Long days, Warm temperatures

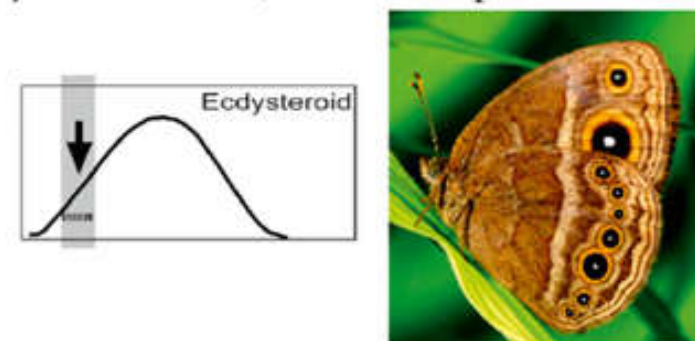


Bicyclus anynana

(a) Dry Season, Cool temperatures



(b) Wet Season, Warm temperatures

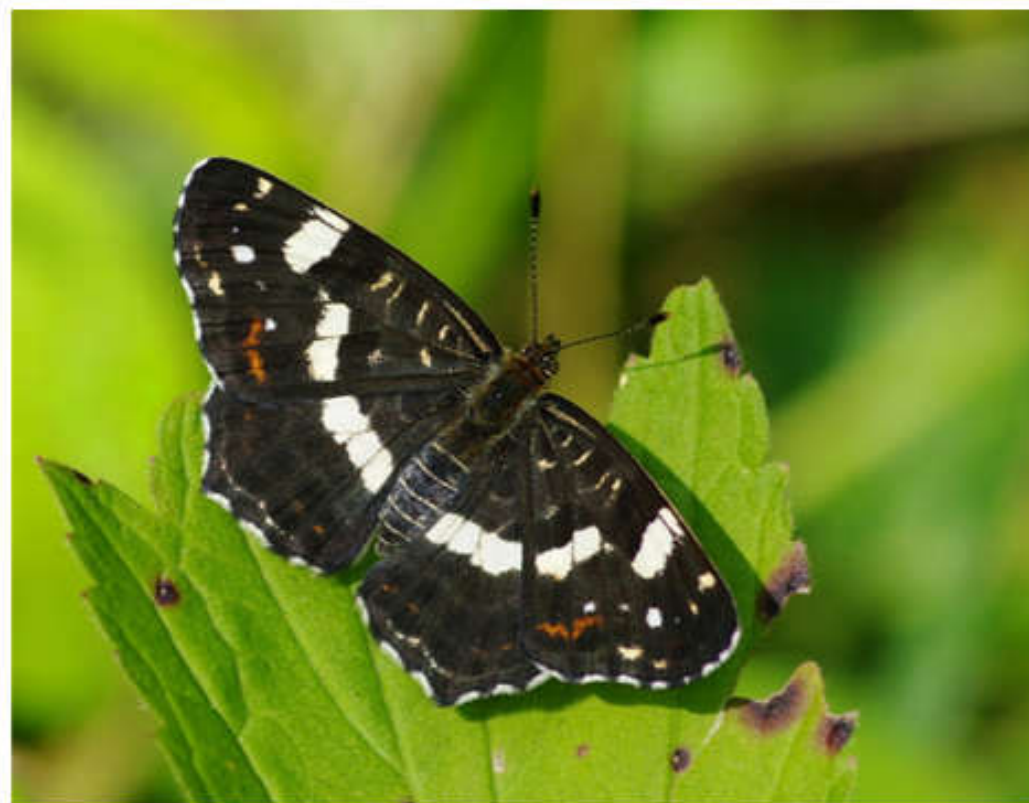


Сезонная изменчивость окраски крыльев у *Araschnia levana*

Пестрокрыльница изменчивая



Весеннее поколение



Летнее поколение

Полифенизм – частный случай фенотипической пластичности

Дискретность фенотипов может быть связана с развитием в дискретных условиях

Development and evolution of adaptive polyphenisms

H. Frederik Nijhout

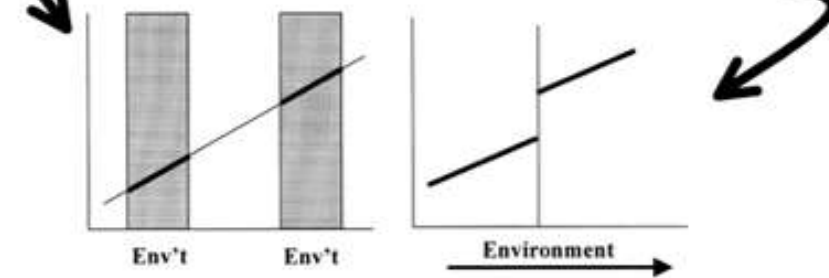
Department of Biology, Duke University, Durham, NC 27708, USA

Correspondence (e-mail: hfn@duke.edu)

EVOLUTION & DEVELOPMENT 2003

Polyphenisms come about in two very different ways:

1. through environmental discontinuity
2. through switching of developmental pathways



Фенотипическая пластичность у пестрокрыльницы изменчивой *Araschnia levana*. При создании промежуточных условий или при помощи инъекций экдизона можно получить промежуточные фенотипы.

A Reversible Color Polyphenism in American Peppered Moth (*Biston betularia cognataria*) Caterpillars

Mohamed A. F. Noor^{1*}, Robin S. Parnell, Bruce S. Grant

Biology Department, College of William & Mary in Virginia, Williamsburg, Virginia, United States of America

Abstract

Insect body color polyphenisms enhance survival by producing crypsis in diverse backgrounds. While color polyphenisms are often indirectly induced by temperature, rearing density, or diet, insects can benefit from immediate crypsis if they evolve polyphenisms directly induced by exposure to the background color, hence immediately deriving protection from predation. Here, we examine such a directly induced color polyphenism in caterpillars of the geometrid peppered moth (*Biston betularia*). This larval color polyphenism is unrelated to the genetic polymorphism for melanic phenotypes in adult moths. *B. betularia* caterpillars are generalist feeders and develop body colors that closely match the brown or green twigs of their host plant. We expand on previous studies examining the proximal cues that stimulate color development. Under controlled rearing conditions, we manipulated diets and background reflectance, using both natural and artificial twigs, and show that visual experience has a much stronger effect than does diet in promoting precise color matching. Their induced body color was not a simple response to reflectance or light intensity but instead specifically matched the wavelength of light to which they were exposed. We also show that the potential to change color is retained until the final (sixth) larval instar. Given their broad host range, this directly induced color polyphenism likely provides the caterpillars with strong protection from bird predation.



Figure 1. *Biston betularia* caterpillars on birch (left) and willow (right).
doi:10.1371/journal.pone.0003142.g001

visual experience has a much stronger effect than does diet in promoting precise color matching

specifically matched the wavelength of light to which they were exposed.

the potential to change color is retained until the final (sixth) larval instar.

**Выбор фенотипа определяется
количеством и типом пищи**

Две морфы у *Netoria arizonaria*



Весенняя морфа

развивается по умолчанию



**танин в
листьях?**



Летняя морфа

Science

AAAS

A Diet-Induced Developmental Polymorphism in a Caterpillar
Author(s): Erick Greene
Source: *Science*, New Series, Vol. 243, No. 4891 (Feb. 3, 1989), pp. 643-646

S. Gilbert "Developmental biology"

Nutrition strongly influences insect body size

Инсулиновый каскад — древняя сигнальная система, которая у многих животных, включая насекомых и млекопитающих, отвечает за адаптацию организма к колебаниям количества доступной пищи.

**insulin/insulin-like growth factor (IIS) каскад
Target of Rapamycin (TOR) signaling каскад**

IIS/TOR каскад влияют на размеры и форму тела, регулируя продукцию гормонов (ecdysone, juvenile hormone) и непосредственно управляя ростом и делением клеток.

frontiers in
PHYSIOLOGY

REVIEW ARTICLE
published: 26 September 2013
doi: 10.3389/fphys.2013.00263



Mechanisms regulating nutrition-dependent developmental plasticity through organ-specific effects in insects

*Takashi Koyama, Cláudia C. Mendes and Christen K. Mirth**

Development, Evolution and the Environment Laboratory, Instituto Gulbenkian de Ciência, Oeiras, Portugal

IIS/TOR каскад может влиять на рост и развитие разных органов непропорционально

Onthophagus taurus

Размер крыльев пропорционален размеру тела

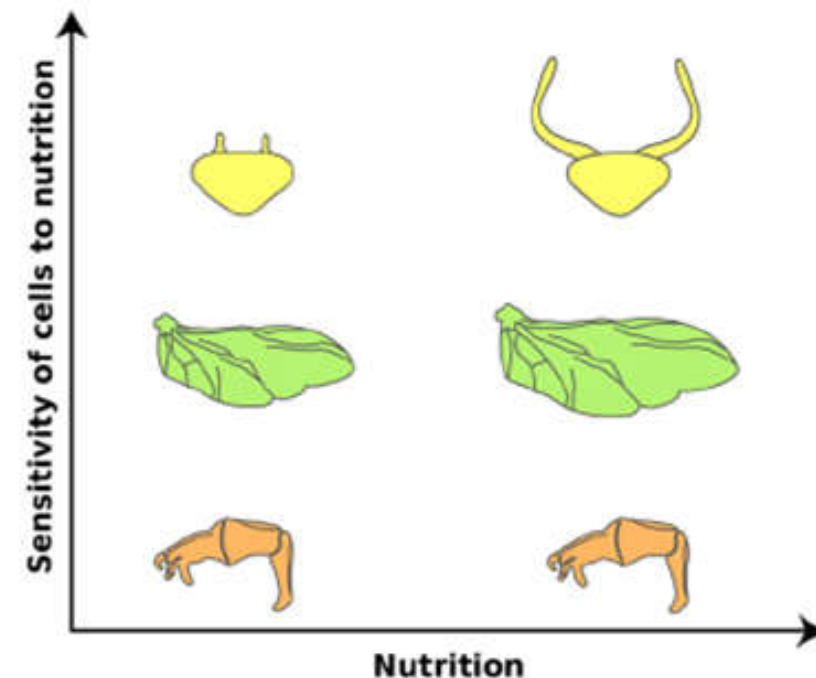
Размер гениталий почти не зависит от размера тела (достигается постоянным поддержанием высокого уровня активности IIS/TOR каскада независимо от внешних условий)

Крупные самцы имеют непропорционально большие рога (достигается повышенной чувствительностью зачатков органа к компонентам IIS/TOR каскада, пороговым эффектом)



Hartfelder, Emlen 2012

Onthophagus taurus



Пороговый эффект – дискретность фенотипов

frontiers in
PHYSIOLOGY

REVIEW ARTICLE
published: 26 September 2013
doi: 10.3389/fphys.2013.00263



Mechanisms regulating nutrition-dependent developmental plasticity through organ-specific effects in insects

Takashi Koyama, Cláudia C. Mendes and Christen K. Mirth*

Development, Evolution and the Environment Laboratory, Instituto Gulbenkian de Ciência, Oeiras, Portugal

Длина крыльев у рисовой цикадки регулируется инсулиновым сигнальным каскадом



Короткокрылая и длиннокрылая мигрирующая формы бурой рисовой цикадки *Nilaparvata lugens*.

на вероятность развития длиннокрылых и короткокрылых форм влияет плотность популяции и качество пищи.

[Two insulin receptors determine alternative wing morphs in planthoppers.](#)

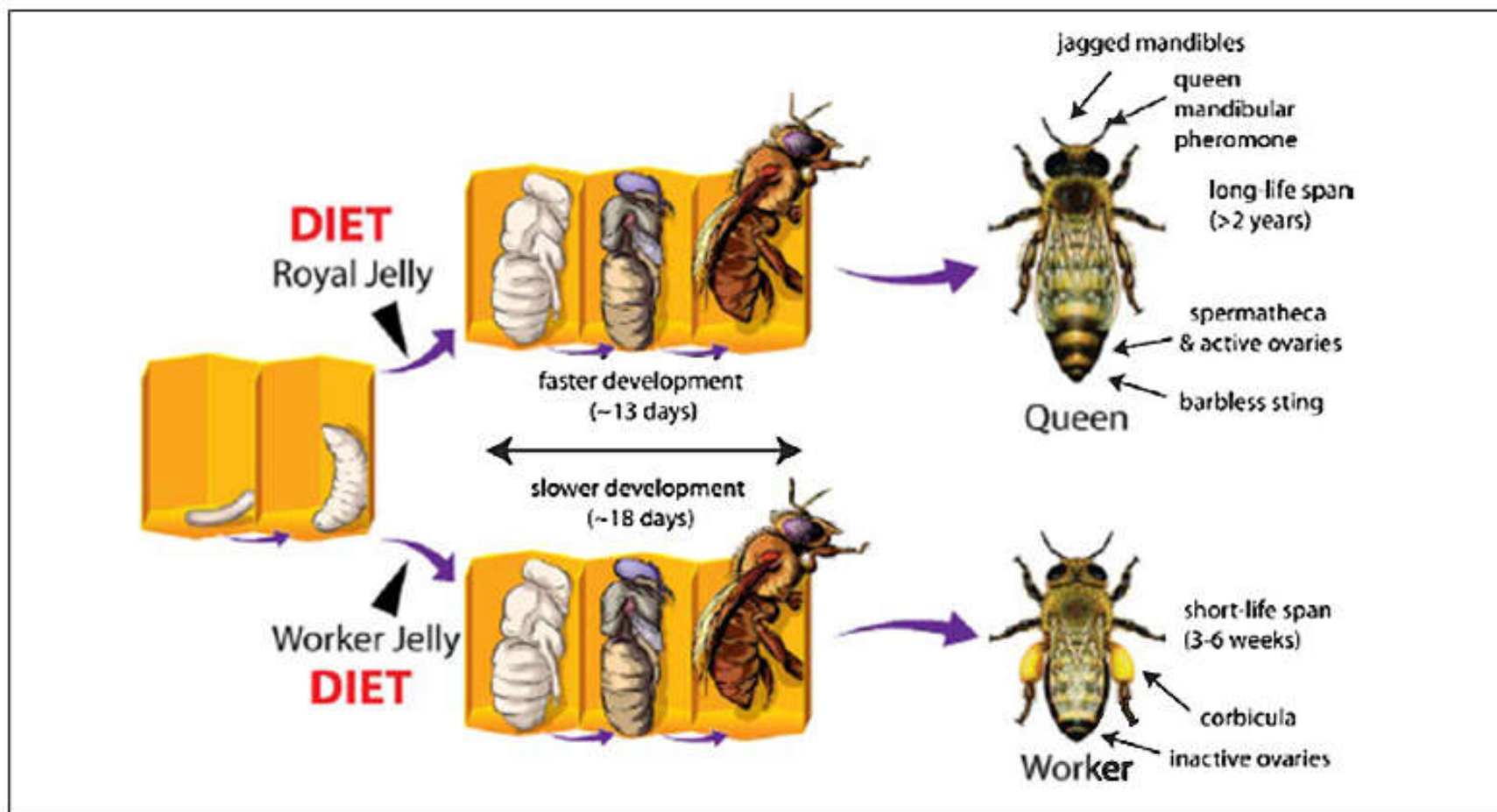
Xu et al, Nature. 2015 Mar 26;519(7544):464-7

[Insulin receptors and wing dimorphism in rice planthoppers.](#)

Xu HJ, Zhang CX. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci. 2017 Feb 5;372(1713). pii: 20150489. Review.

http://elementy.ru/novosti_nauki/432441/Novoe_primenenie_dlya_drevney_regulyatomoy_sistemy_dlina_krylev_u_risovoy_tsikadki_reguliruet_sya_insulinovym_signalnym_kaskadom

Медоносная пчела



Nutrients 2015, 7, 1787-1797; doi:10.3390/nu7031787

OPEN ACCESS

nutrients

ISSN 2072-6643

www.mdpi.com/journal/nutrients

Review

What Do Studies of Insect Polyphenisms Tell Us about Nutritionally-Triggered Epigenomic Changes and Their Consequences?

Andrew G. Cridge [†], Megan P. Leask [†], Elizabeth J. Duncan [†] and Peter K. Dearden ^{*}

Маточное молочко



Ювенильный гормон



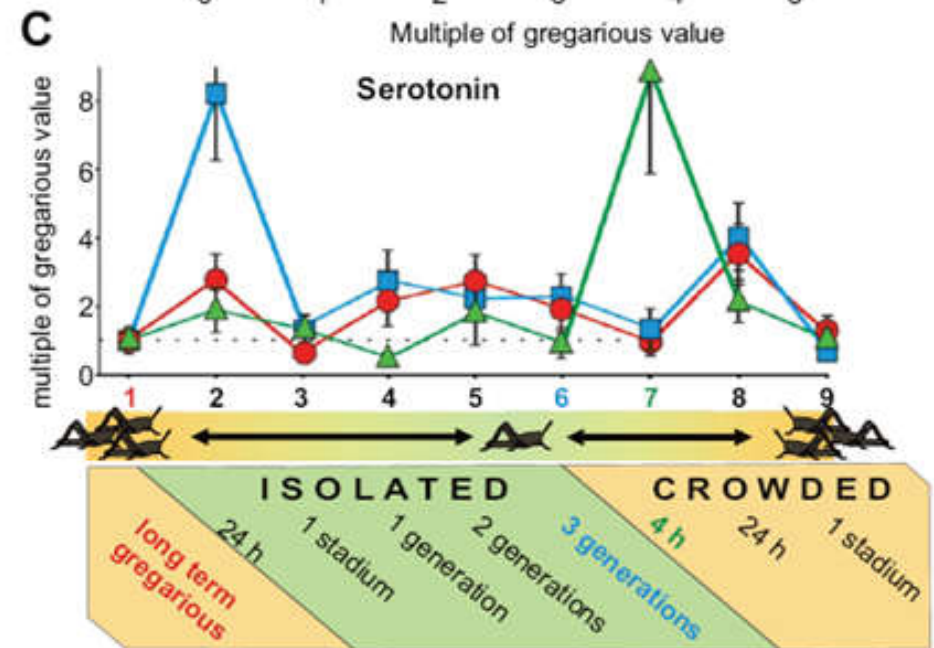
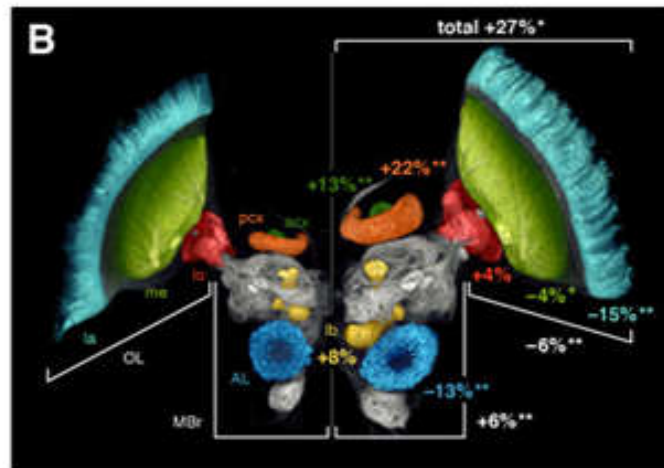
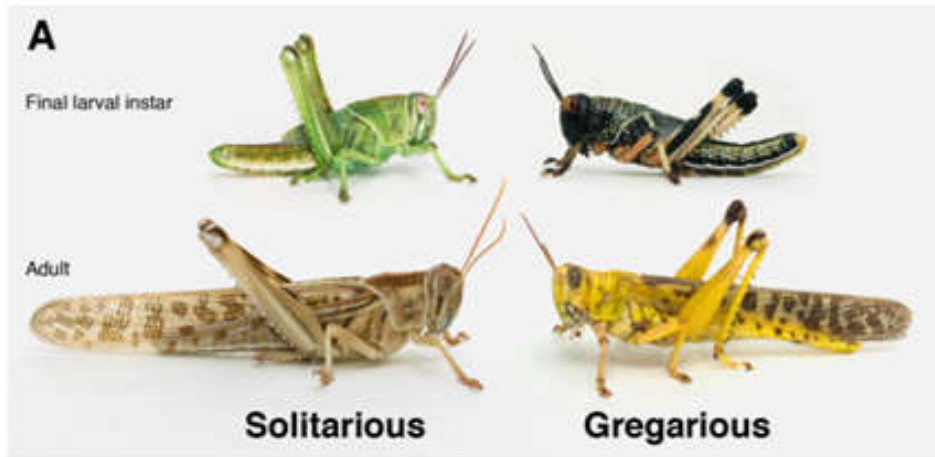
Инсулиновый каскад

Фазовая изменчивость у саранчи

Впервые на это явление у саранчовых, в частности у азиатской саранчи, обратил внимание в 1911 г. Б.П. Уваров.

migratory locust (*Locusta migratoria*)
desert locust (*Schistocerca gregaria*)

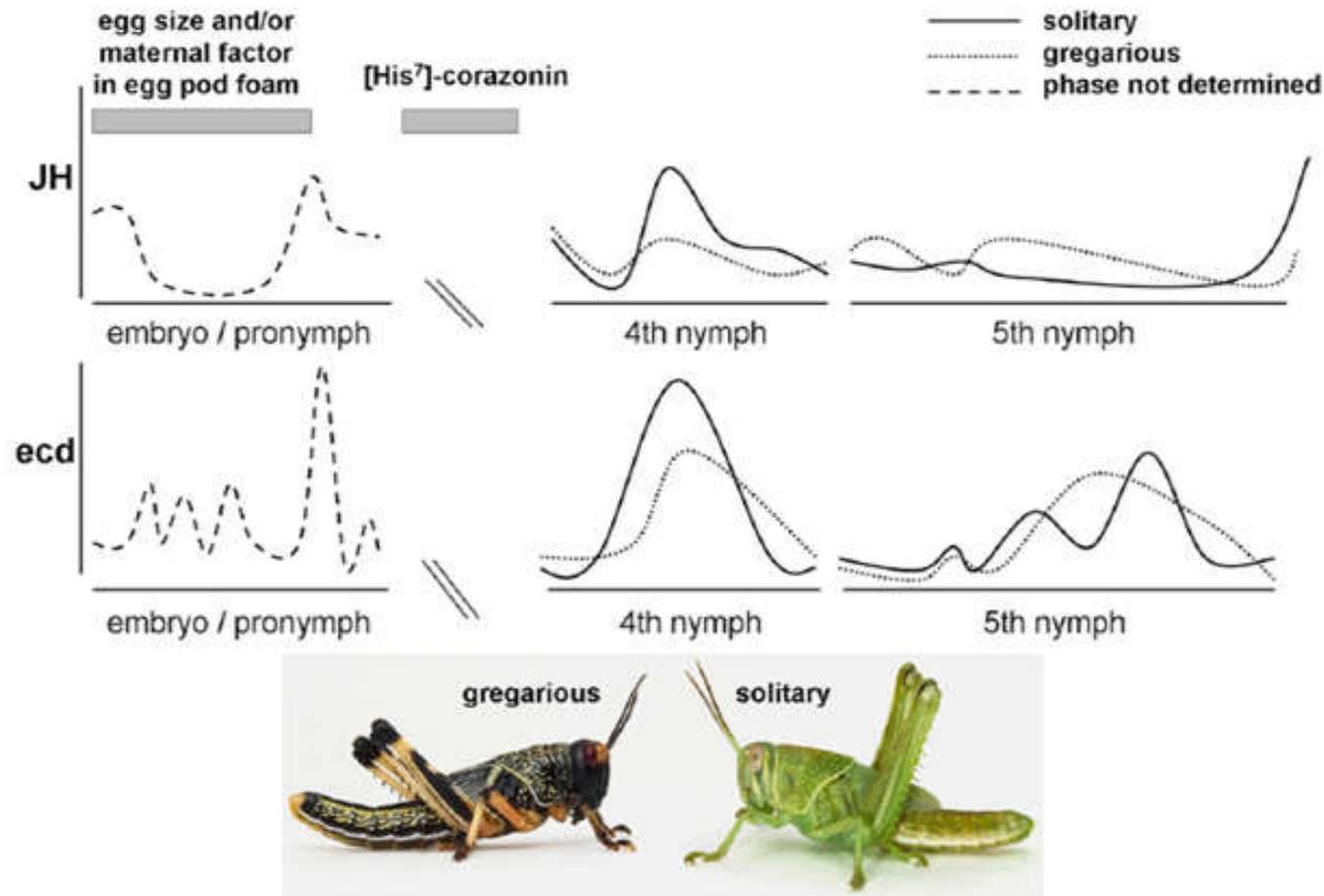
Выбор фенотипа определяется плотностью скопления особей



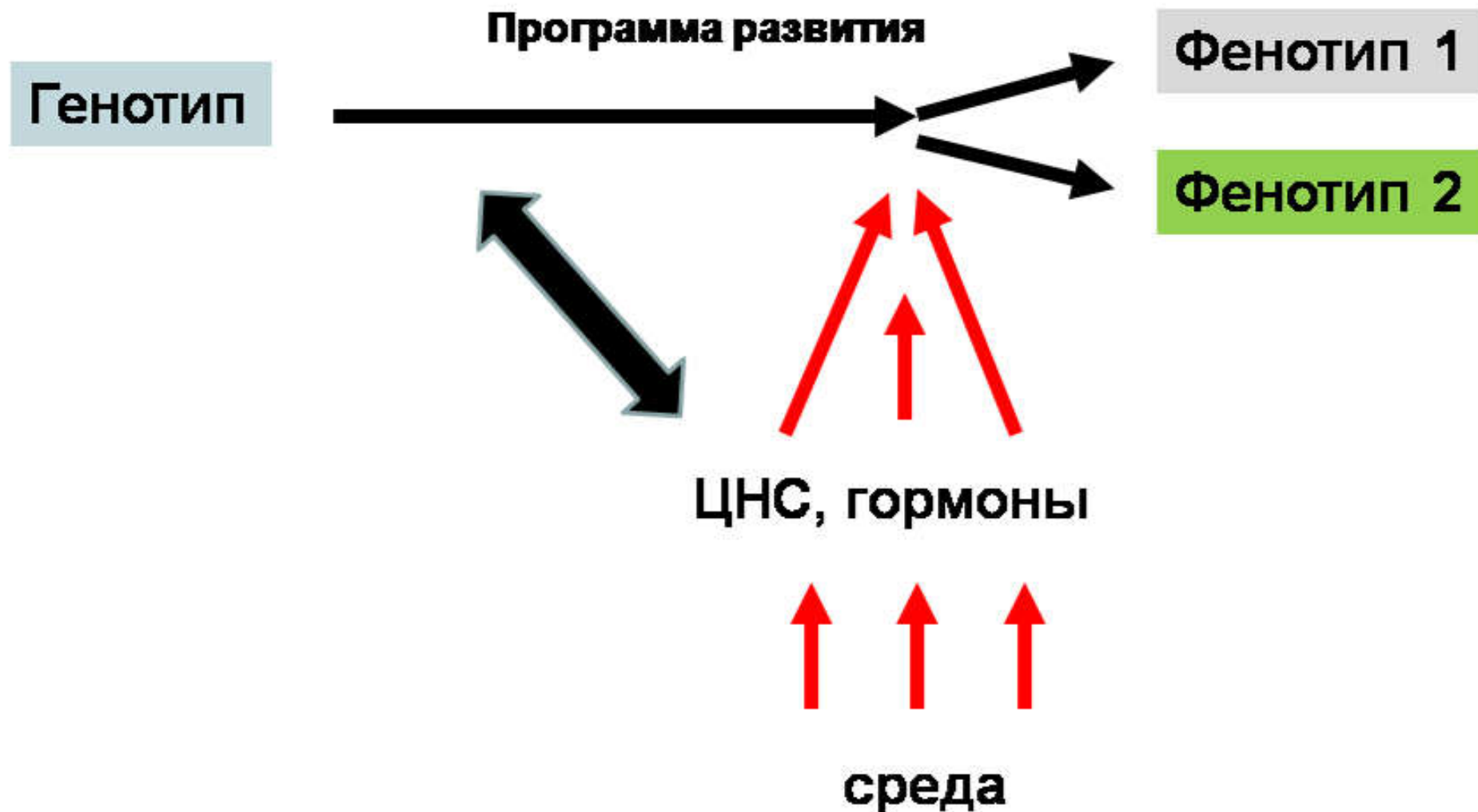
Переход от одной фазы к другой можно запустить:

- Тактильными контактами
- Визуальными стимулами
- Химическими веществами (гормоны, alkylated L-DOPA analogue from egg foam, ...)

Juvenile hormone and ecdysteroid titers during embryonic and post-embryonic development of solitary and gregarious morphs of migratory locusts (*Locusta migratoria* and *Schistocerca gregaria*).

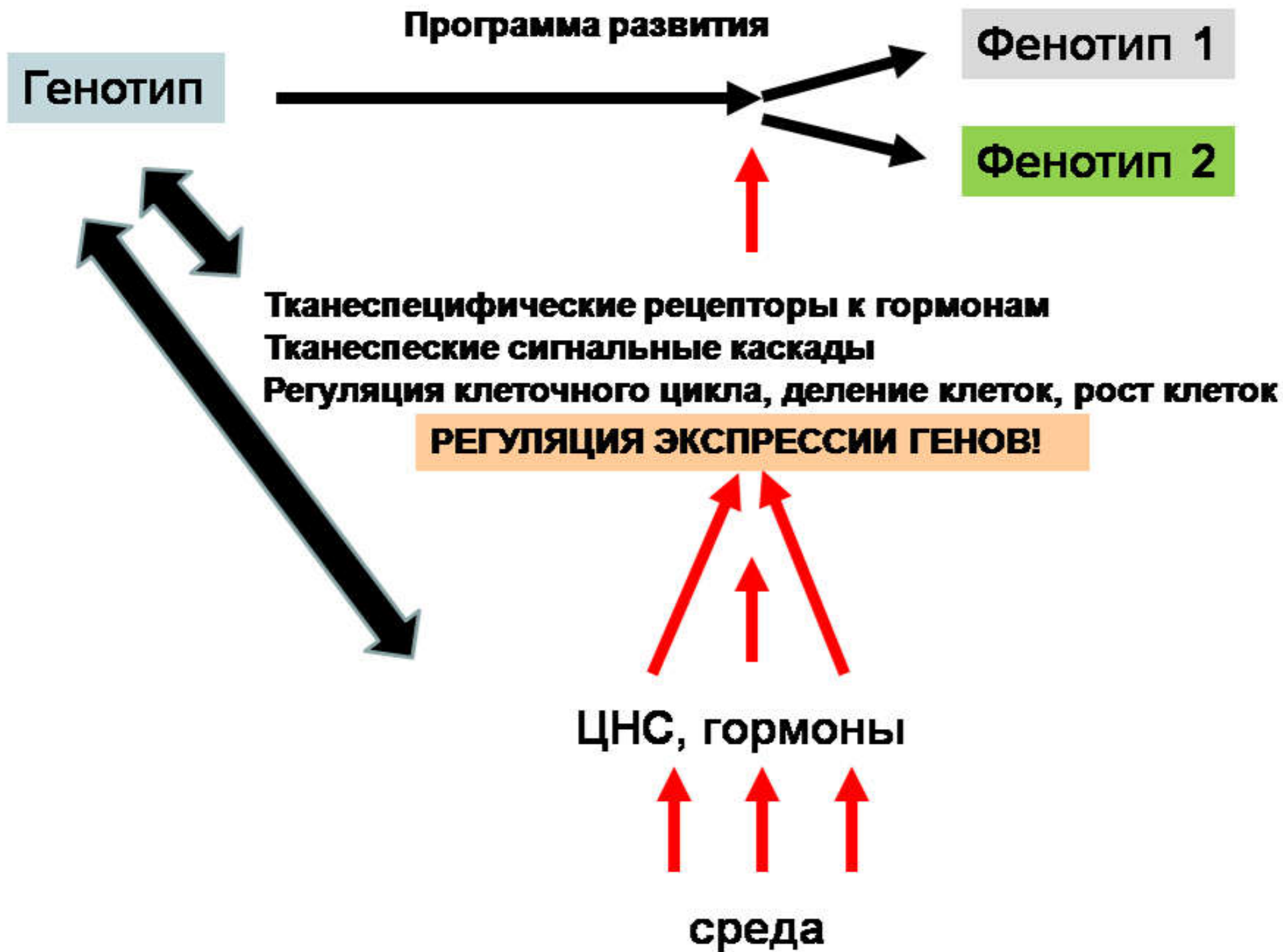


S. gregaria



Гормоны – кратковременно действующие факторы!

Как кратковременно действующие факторы приводят к формированию стабильных дискретных фенотипов?



И тут на сцену выходит эпигенетика!

Основная догма молекулярной биологии:

ДНК → РНК → БЕЛОК

Основная догма молекулярной биологии:



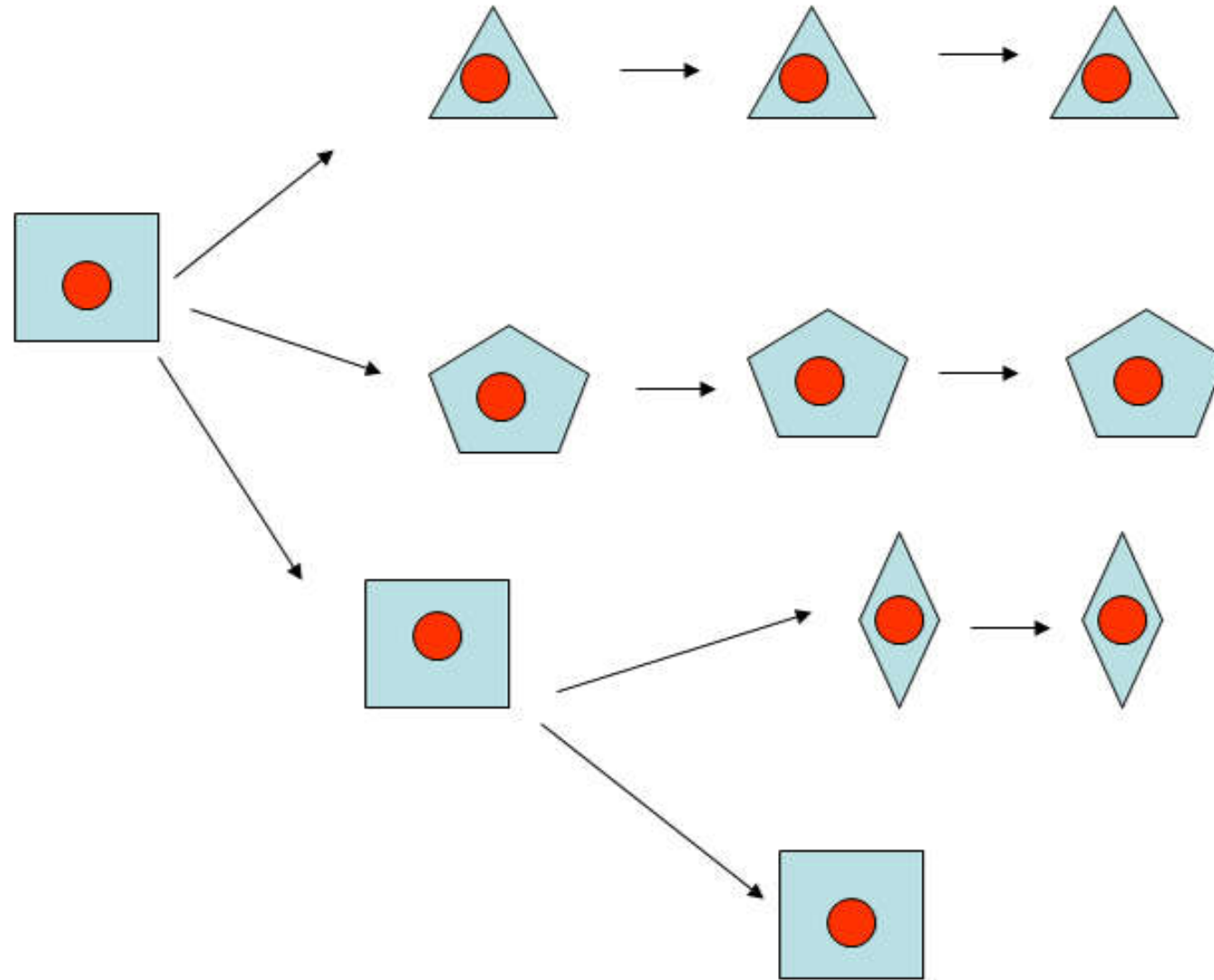
(согласно классической генетике)

ДНК ответственна за хранение, передачу и реализацию наследственной информации

То есть, в ДНК закодирована вся наследственная информация?

Одинаковый генотип – разные клеточные фенотипы

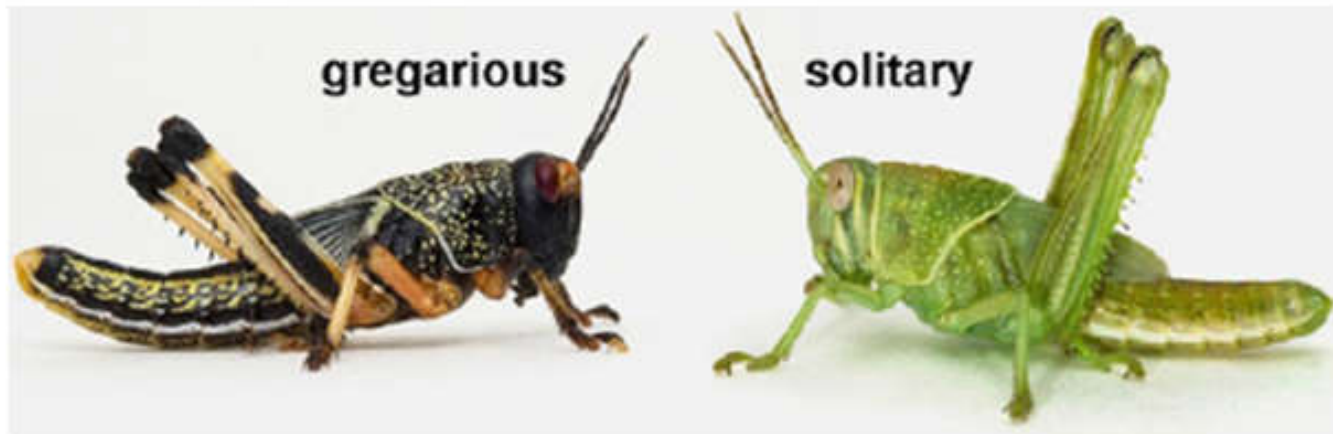
Клеточный фенотип может эпигенетически наследоваться



Одинаковый генотип – разные фенотипы

Наследование фенотипа через поколение на уровне организма

Schistocerca gregaria



Что такое ЭПИГЕНЕТИКА?

В более общем смысле предметом эпигенетики являются явления, связанные с развитием различных фенотипов клеток или организмов на основе одного генотипа

В более узком смысле эпигенетика - раздел генетики, который изучает наследуемые изменения активности генов во время развития организма или деления клеток.

Эпигенетическое наследование – наследование паттерна экспрессии генов

(архитектуры ядра, центромеры, времени репликации...)

Множество явлений, объединяемых по сходству молекулярных механизмов



«Память» на разных уровнях

- Клеточный уровень** наследование состояния дифференцировки
- Внутриклеточный уровень** наследование центромеры, архитектуры ядра и др.
- Организменный уровень** наследование особенностей метаболизма, память
- Трансгенерационное наследование**



«Память» на разных уровнях

Клеточный уровень

Внутриклеточный уровень

Организменный уровень

Трансгенерационное наследование

Эпигенетические механизмы регуляции экспрессии генов!

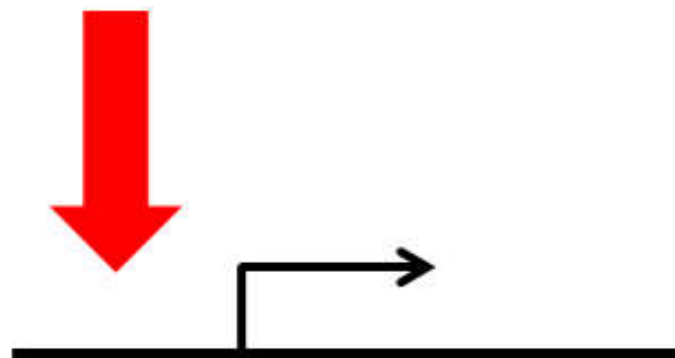
Как записана информация о дифференциальной экспрессии генов?

Как записана информация о дифференциальной экспрессии генов?

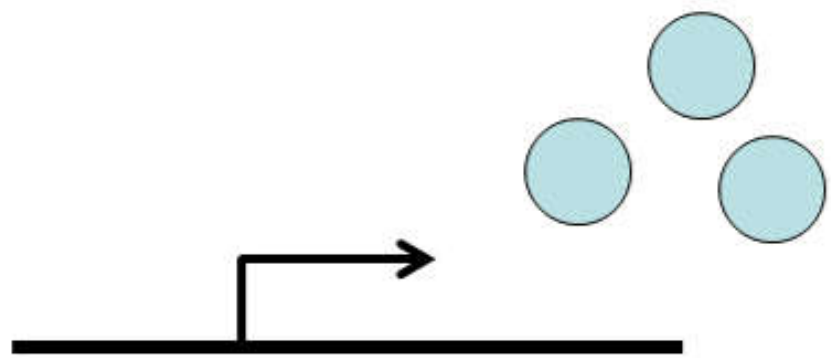
- **-В ДНК закодированы белки – регуляторы, узнающие метки, записанные в последовательности ДНК, модификациях структуры хроматина**

- **- Метки в последовательности ДНК для узнавания специфическими факторами транскрипции и др. белками, метки для позиционирования нуклеосом**

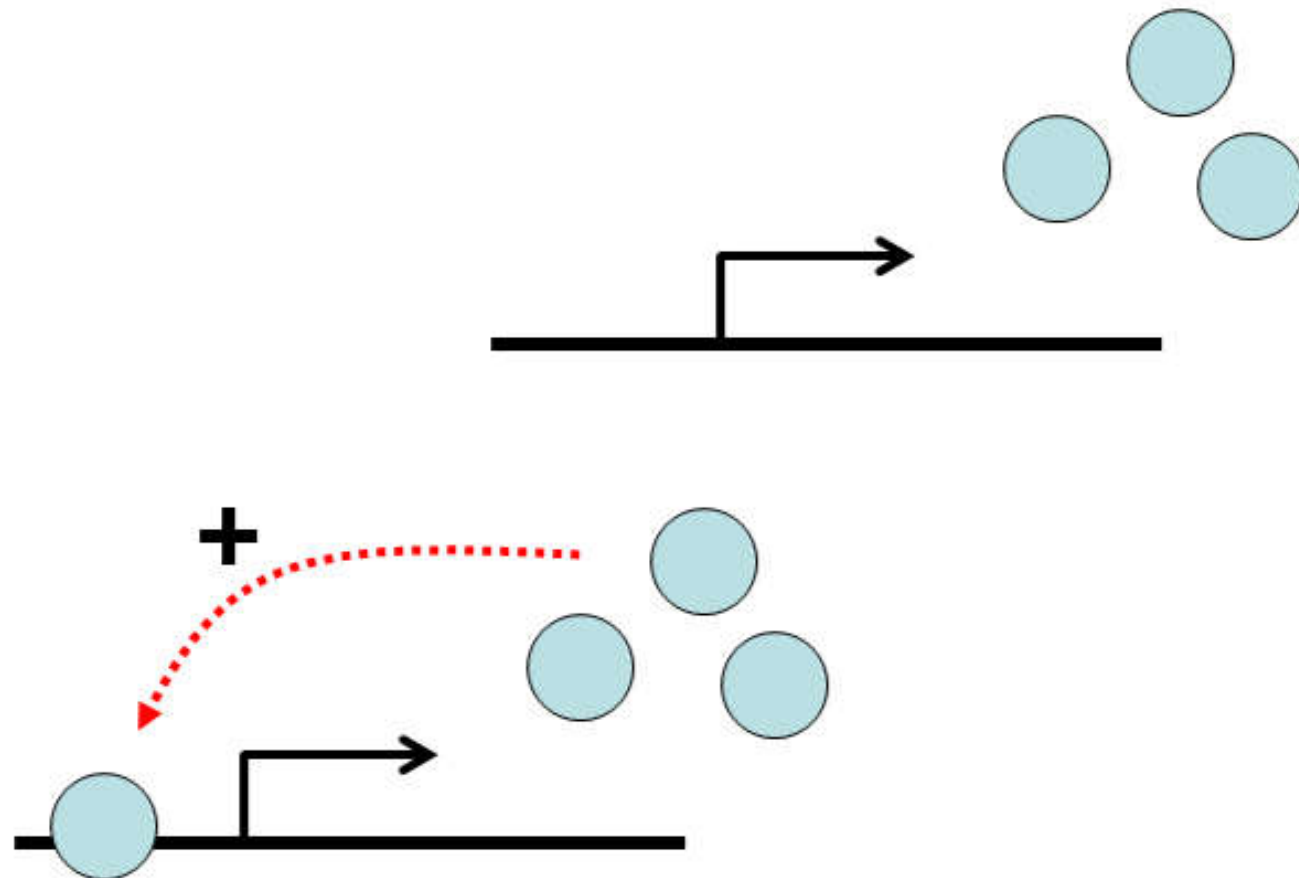
Петля положительной обратной связи позволяет поддерживать ген в активном состоянии



Петля положительной обратной связи позволяет поддерживать ген в активном состоянии

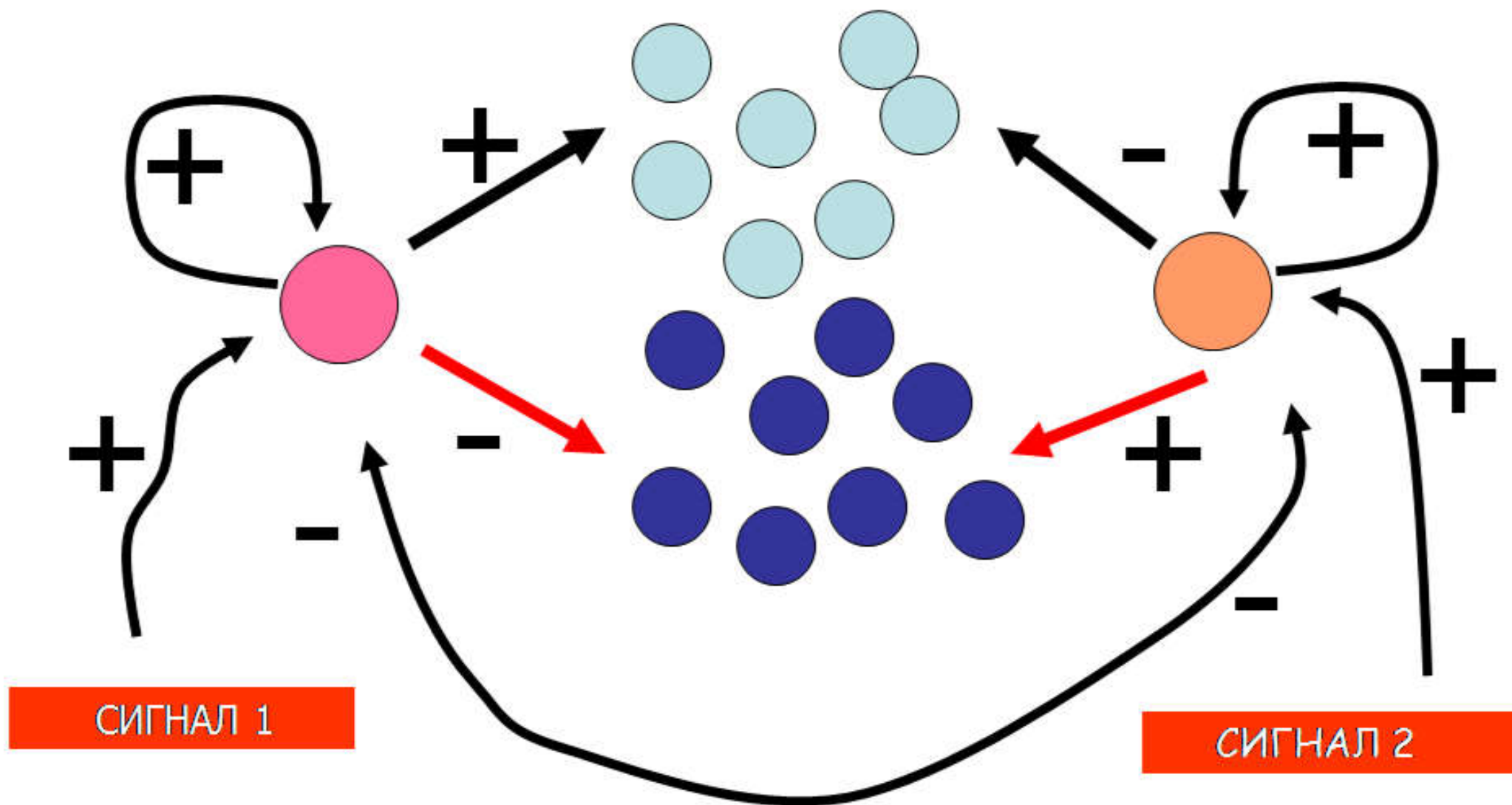


Петля положительной обратной связи позволяет поддерживать ген в активном состоянии



Положительная обратная связь

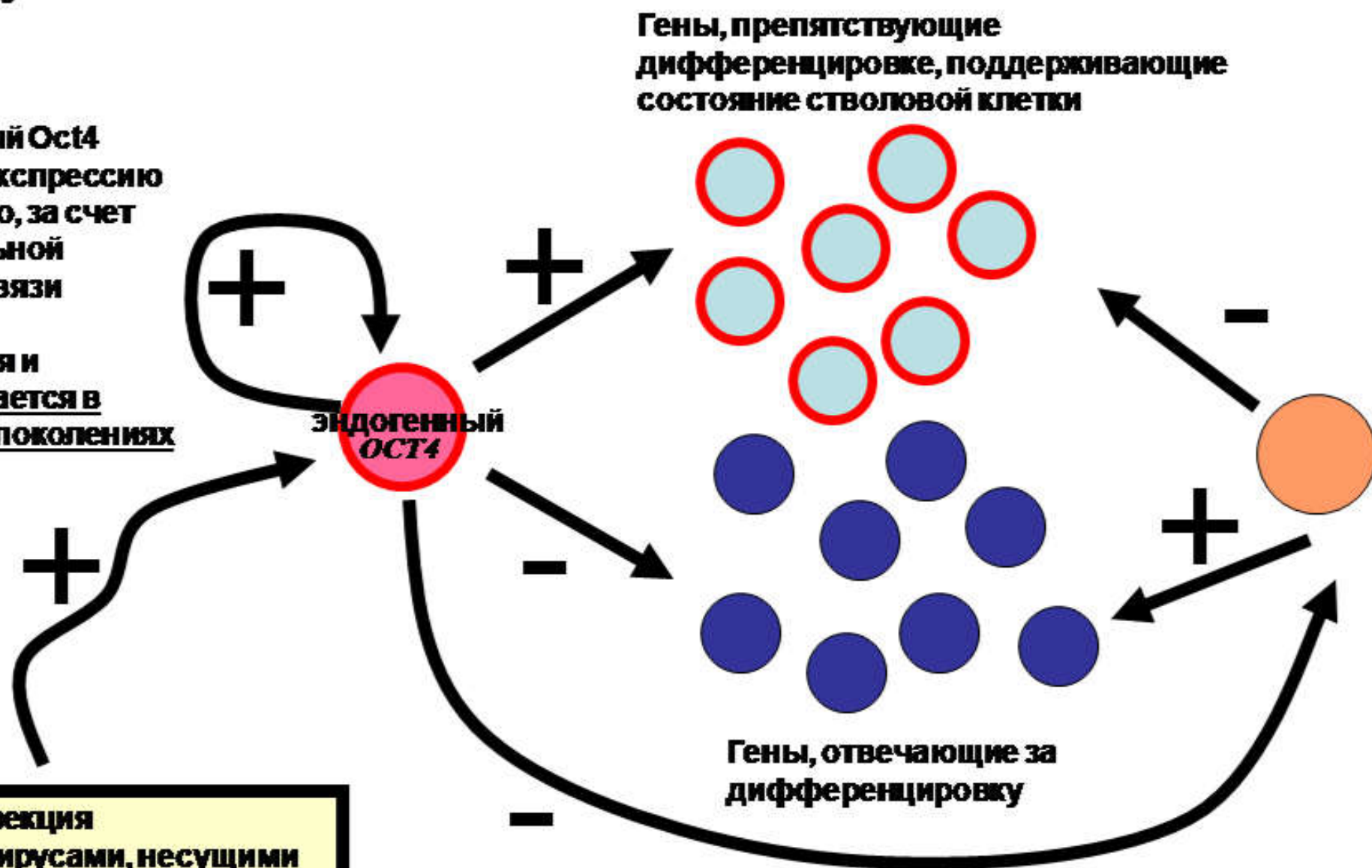
Генные сети. Контуры + и - обратных связей



Два дискретных устойчивых состояния системы!

Экспериментальное перепрограммирование соматической клетки в стволовую

Трансгенный *Ost4* запускает экспрессию эндогенного, за счет положительной обратной связи экспрессия усиливается и поддерживается в клеточных поколениях

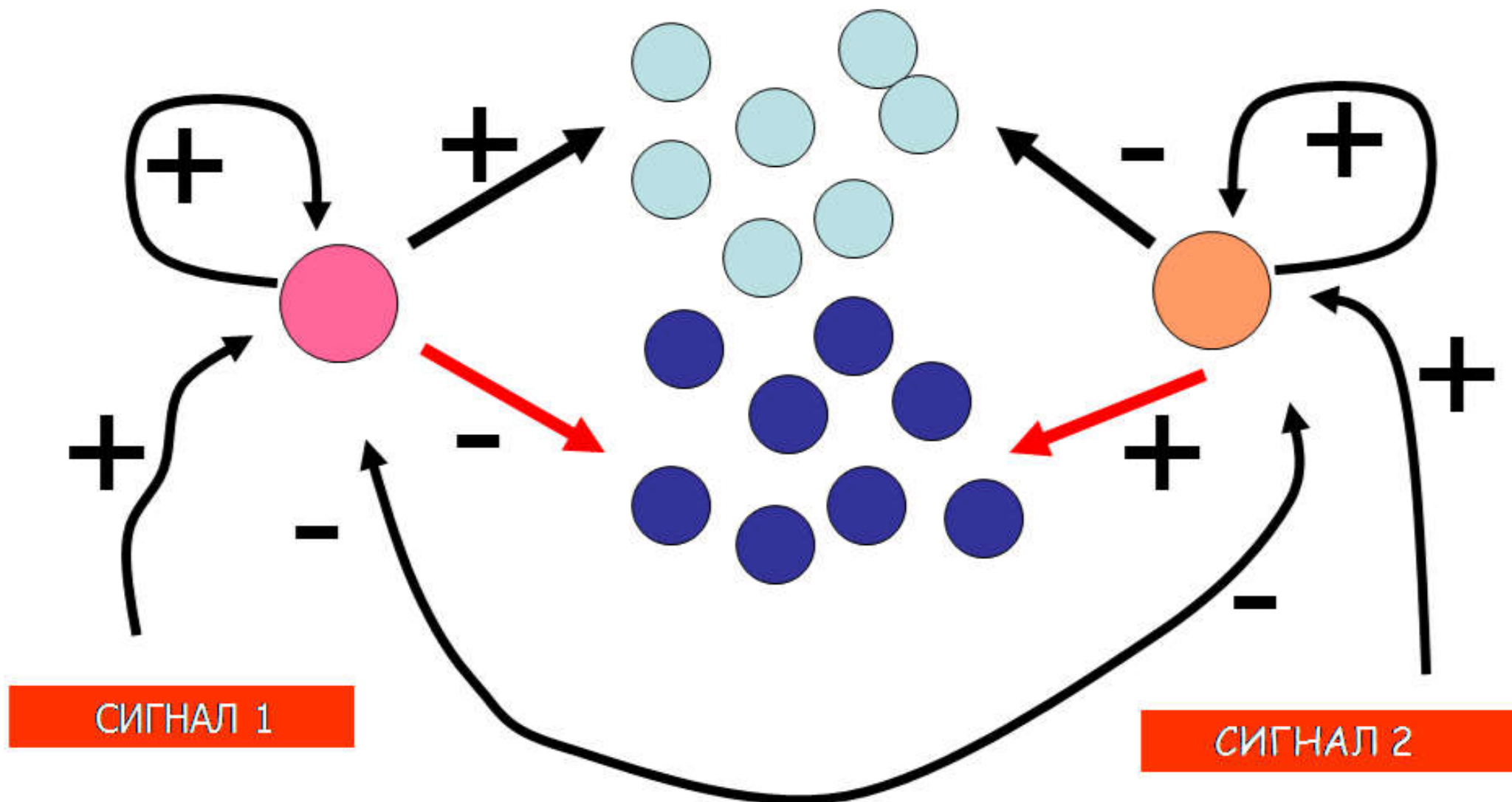


Трансфекция ретровирусами, несущими несколько трансгенов, в т.ч. *Ost4*, работающий постоянно

По: *Takahashi, K. & Yamanaka, S. Cell (2006)*
Wernig, M. et al. Nature (2007)

(Схема значительно упрощена)

Генные сети. Контуры + и - обратных связей



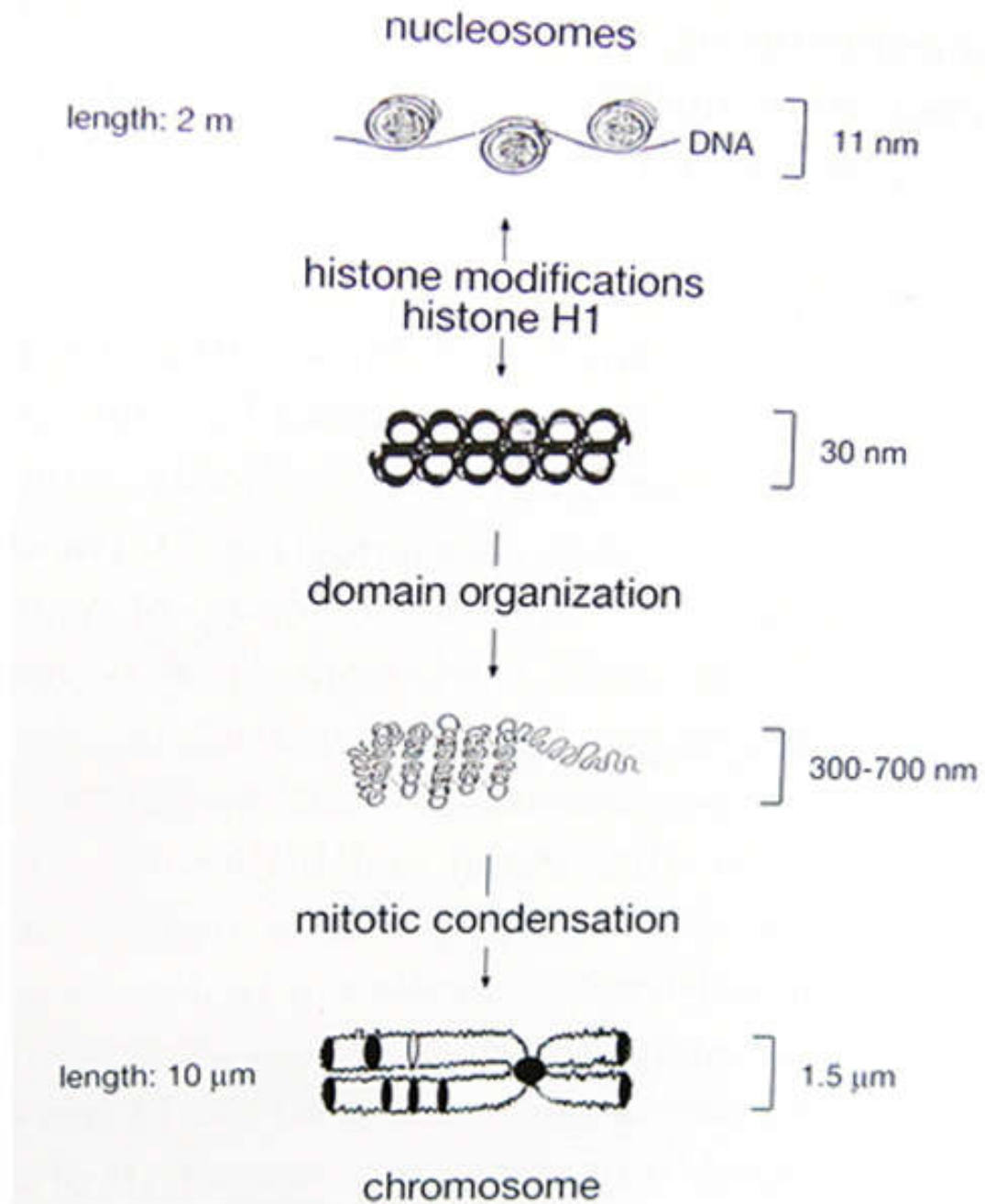
Сигнал внутренний
Сигнал внешний!

Как записана информация о дифференциальной экспрессии генов?

У эукариот уровень экспрессии гена в значительной степени определяется состоянием хроматина.

Состояние хроматина может наследоваться в клеточных поколениях

Уровни организации хроматина



Компоненты хроматина, участвующие в регуляции экспрессии генов

(которые принято связывать с эпигенетикой)

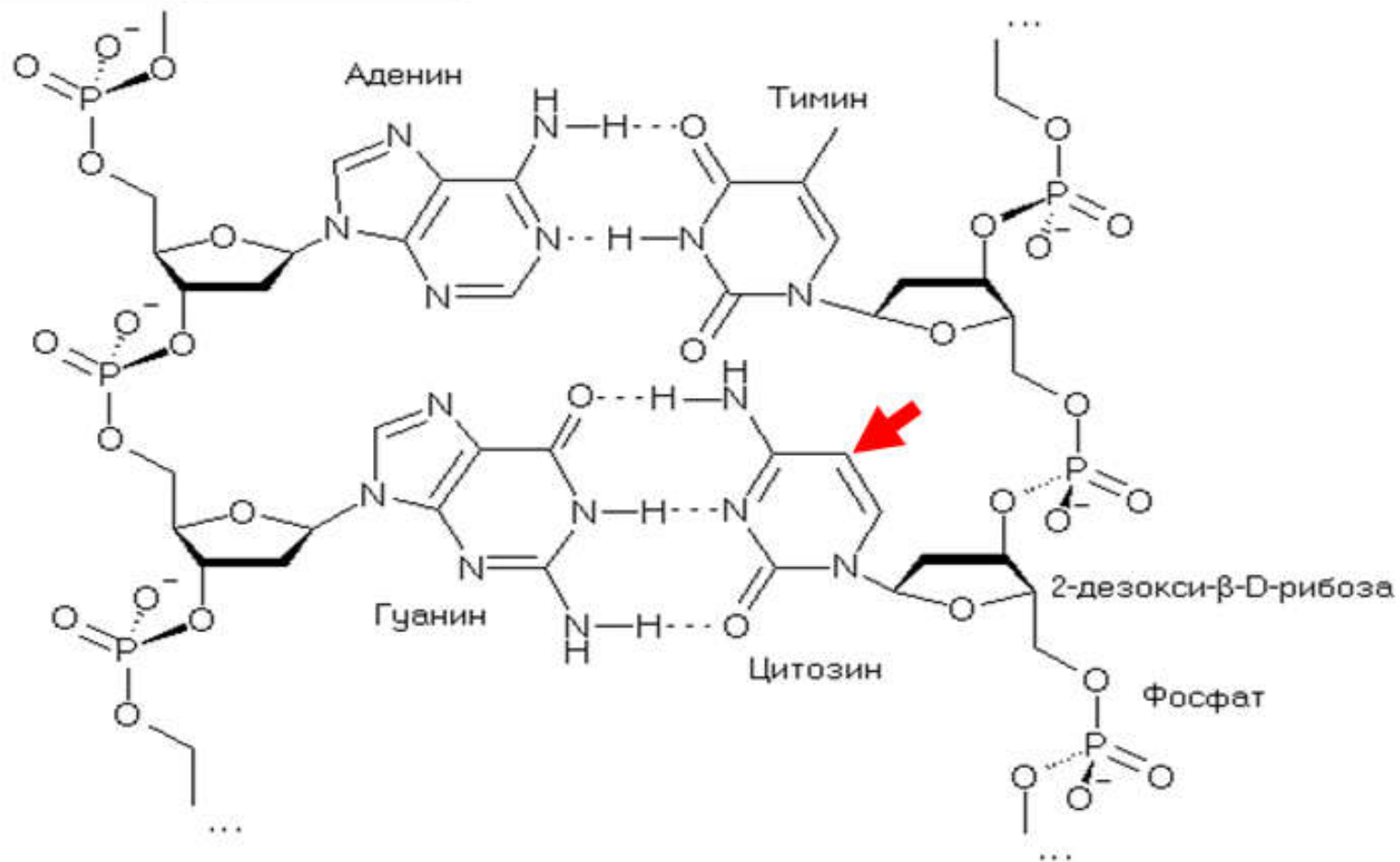
- Метилирование ДНК
- Ковалентные модификации гистонов
- Варианты гистонов

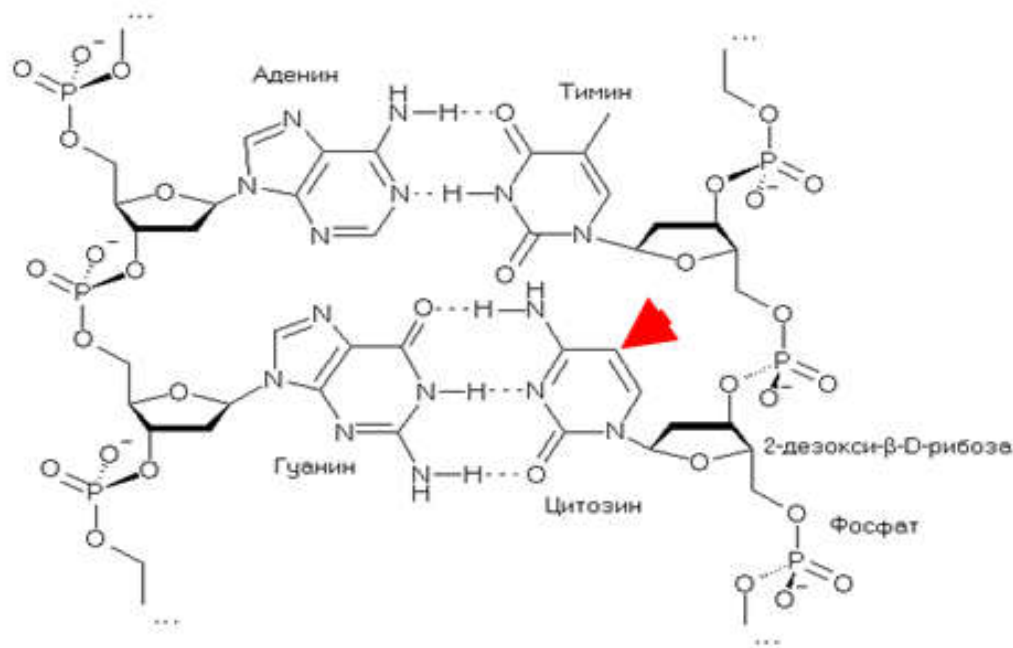
МОГУТ НАСЛЕДОВАТЬСЯ ПРИ РЕПЛИКАЦИИ ДНК И МИТОЗЕ!

- -Некодирующие РНК

Малые некодирующие РНК (siRNA, miRNA, piRNA)
Длинные некодирующие РНК (lncDNA)

Метилирование ДНК





- Управление экспрессией генов
- Управление альтернативным сплайсингом
- Может частично передаваться в следующие поколения
- Может использоваться для направленного программирования молчащего состояния генов в следующее поколение (геномный импринтинг)
- Консервативная система, но множество вариаций

D. melanogaster – DNMT1 и DNMT3 отсутствуют

Шелкопряд, хрущ *Tribolium castaneum* DNMT3 отсутствует

У эусоциальных насекомых и у саранчи присутствует обе ДНК-метилтрансферазы

Структура нуклеосомы

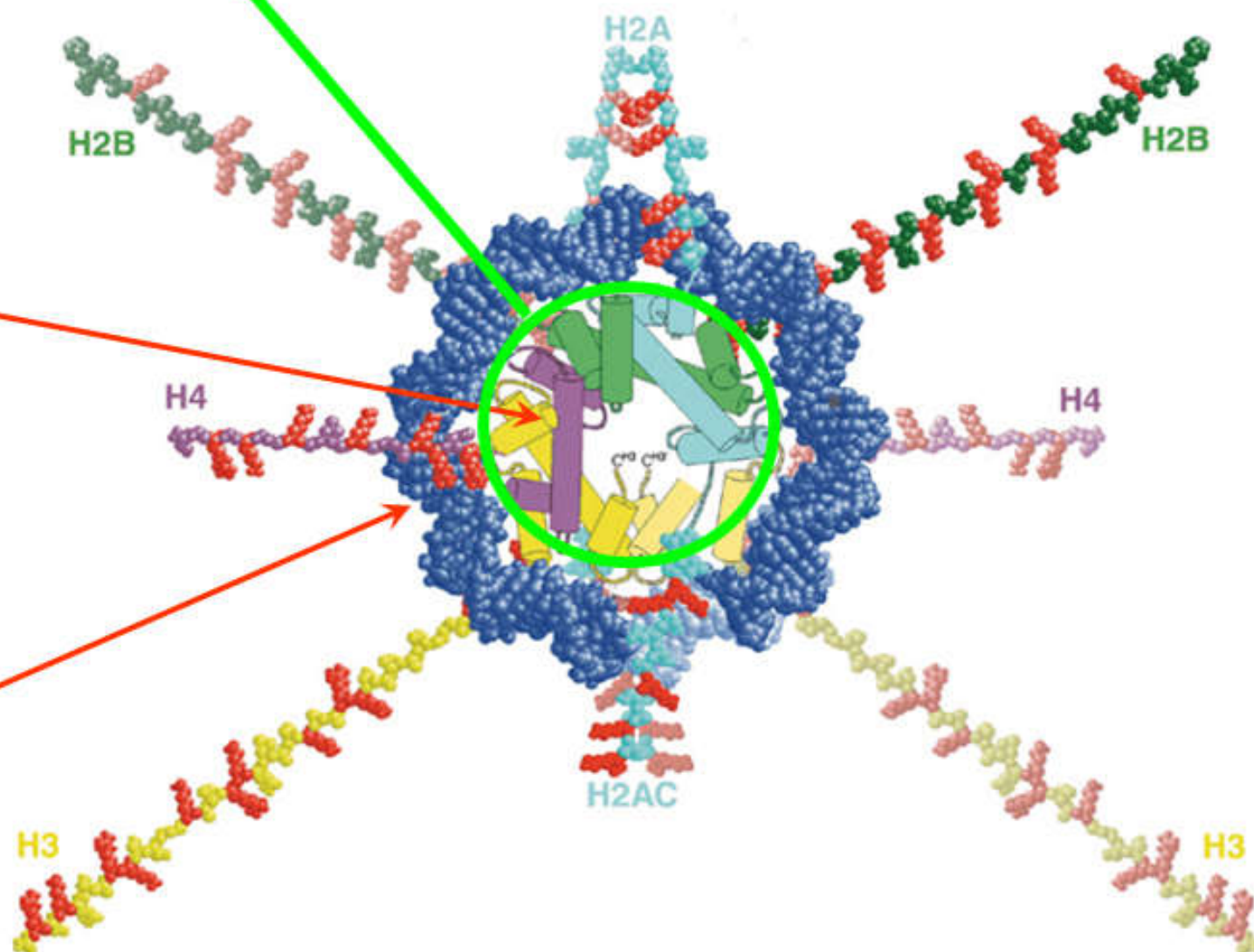
Нуклеосомный
кор

Гистоновый
октамер

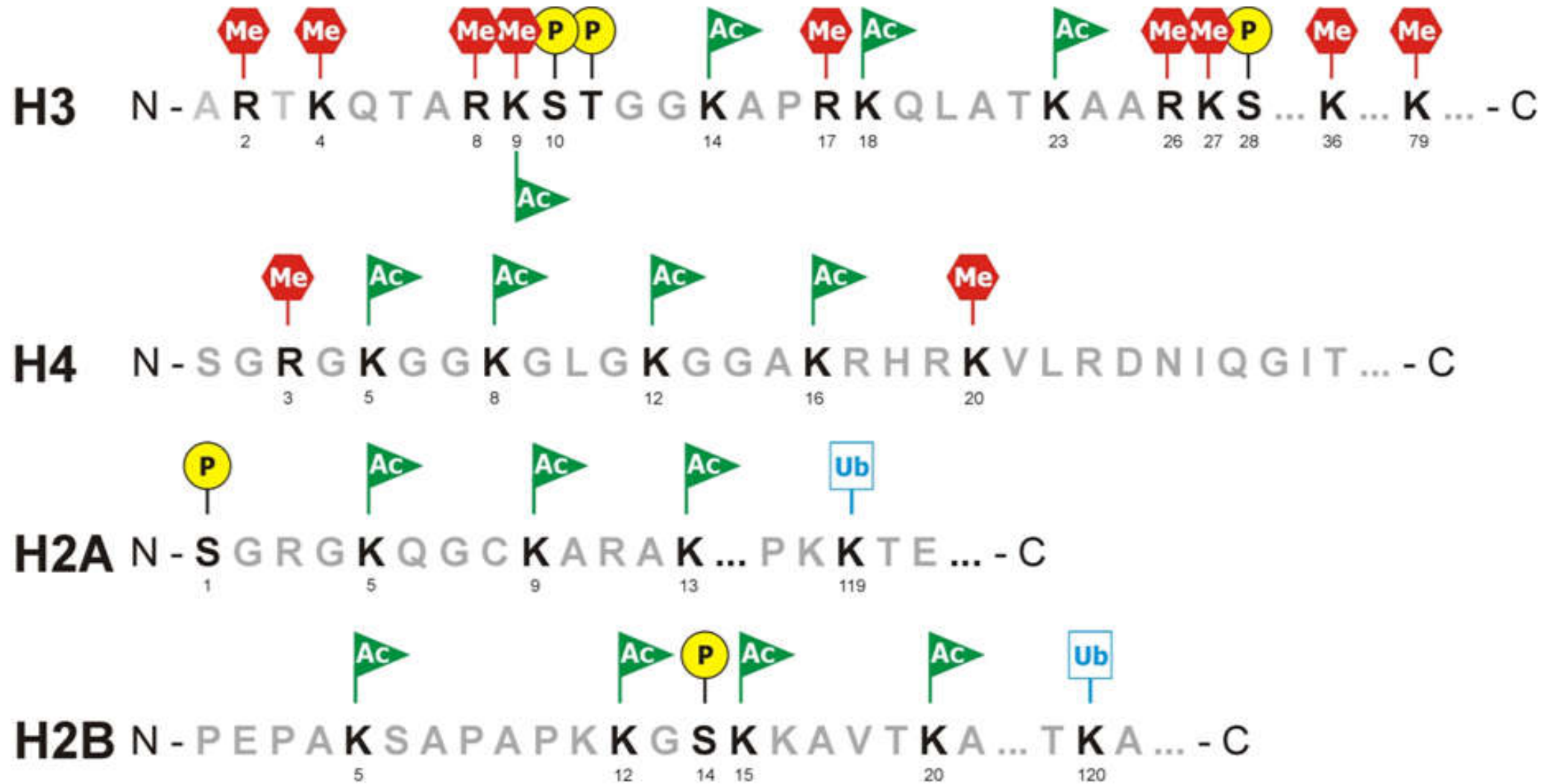
2 x (H2A+H2B)
2 x (H3+H4)

ДНК

146 п.н.



Пост-трансляционные модификации гистонов



Компоненты хроматина, участвующие в регуляции экспрессии генов

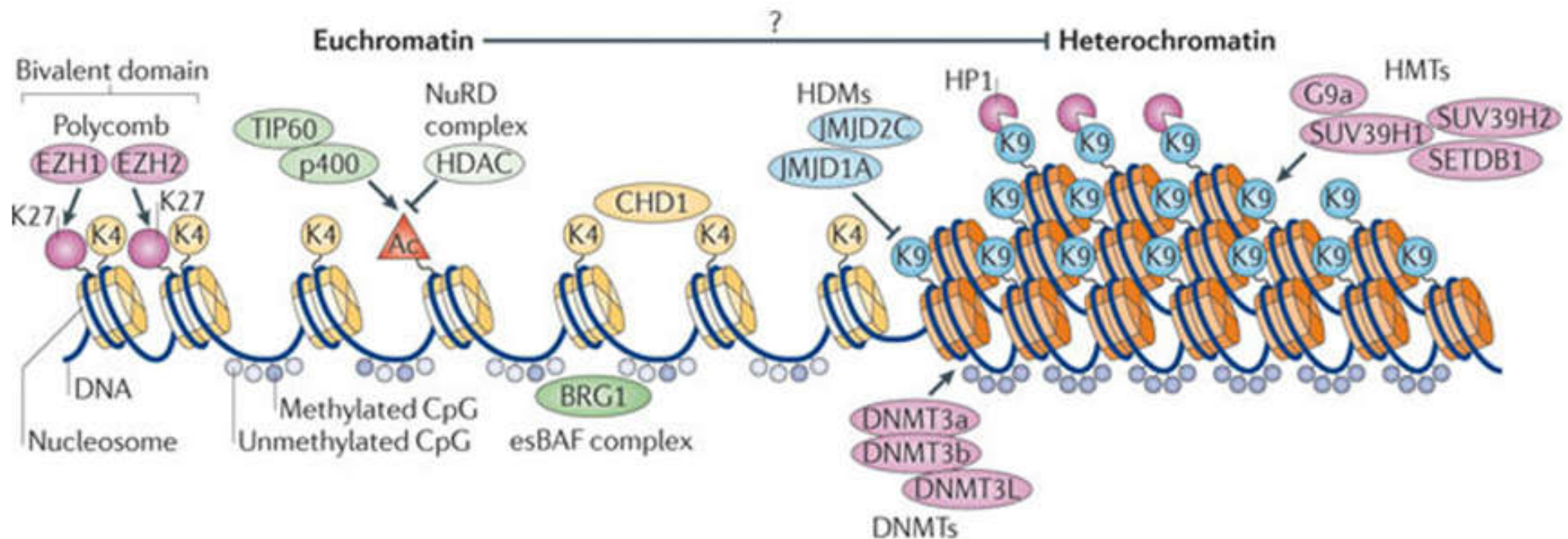
(которые принято связывать с эпигенетикой)

- Метилирование ДНК
- Варианты гистонов
- Ковалентные модификации гистонов

Стабильность двойной спирали ДНК

Стабильность связывания нуклеосом

Молекулярные метки



Компоненты хроматина, участвующие в регуляции экспрессии генов

(которые принято связывать с эпигенетикой)

● Метилирование ДНК

● Варианты гистонов

● Ковалентные модификации гистонов

Стабильность двойной спирали ДНК

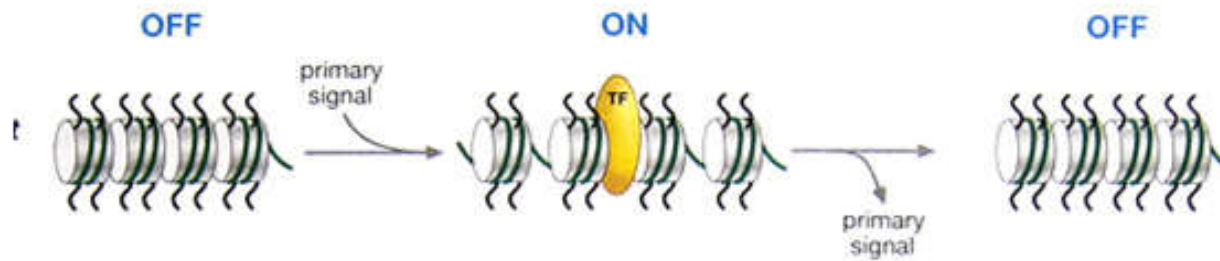
Стабильность связывания нуклеосом

Молекулярные метки



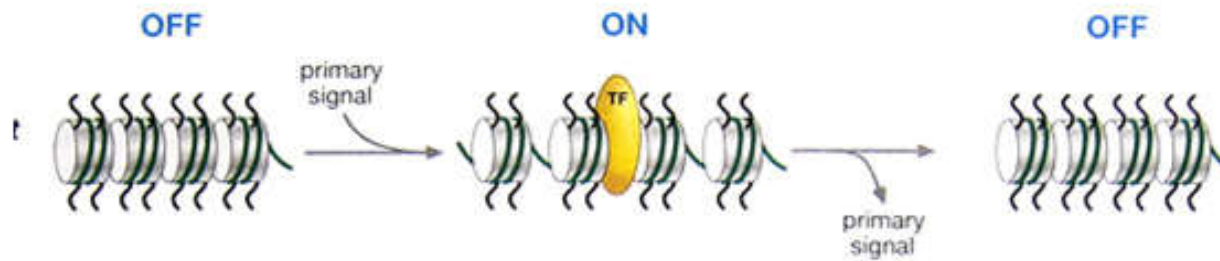
Как происходит эпигенетически наследуемая стабилизация транскрипции

Временный
сигнал

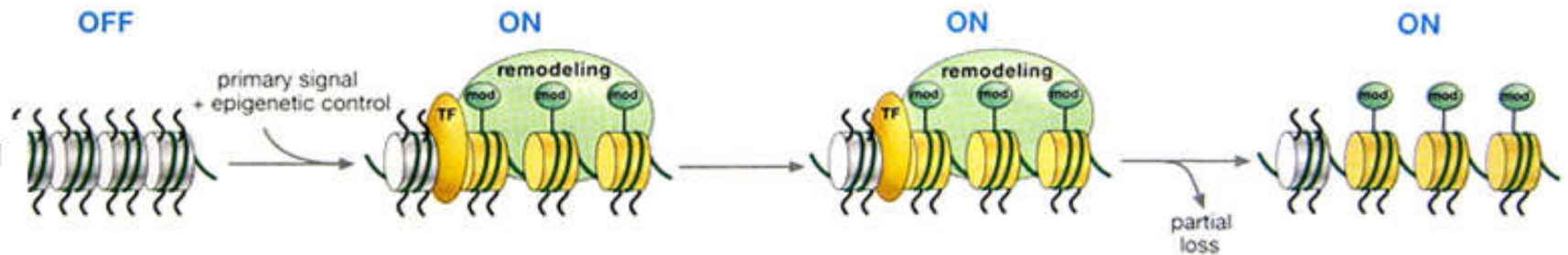


Как происходит эпигенетически наследуемая стабилизация транскрипции

Временный сигнал

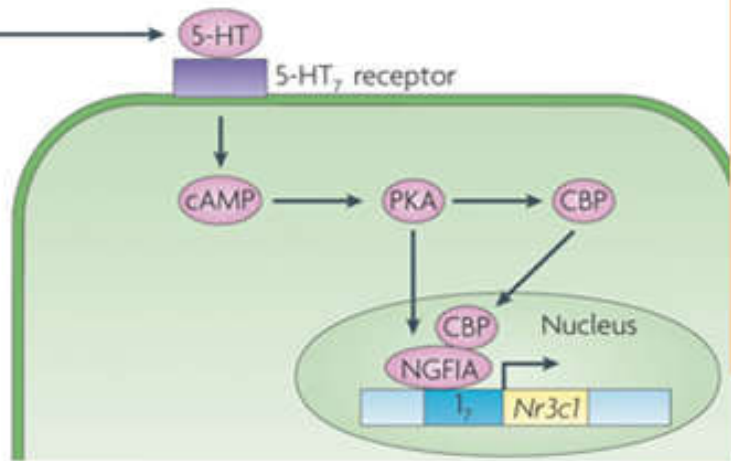


Эпигенетическая программа



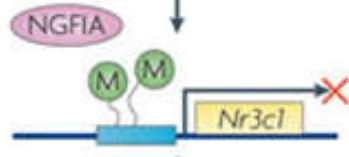
Сигнал (TF) больше не требуется, состояние активности наследуется

a Tactile stimulation (maternal licking and grooming)



**Гормон действует
кратковременно,
паттерн экспрессии
гена рецептора
кортизола меняется на
всю жизнь!**

b Low maternal licking and grooming



↓ GR expression

High corticosterone levels
High anxiety
Low licking or grooming

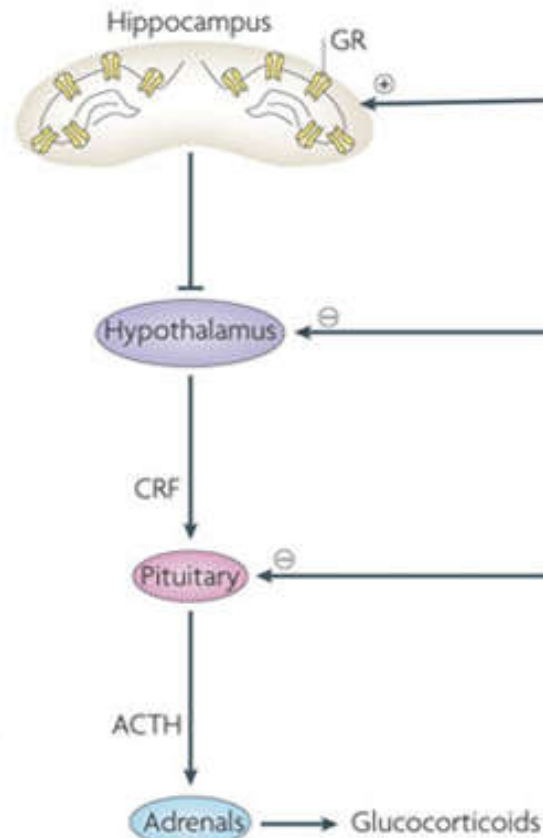
High licking maternal and grooming



↑ GR expression

Low corticosterone levels
Low anxiety
High licking or grooming

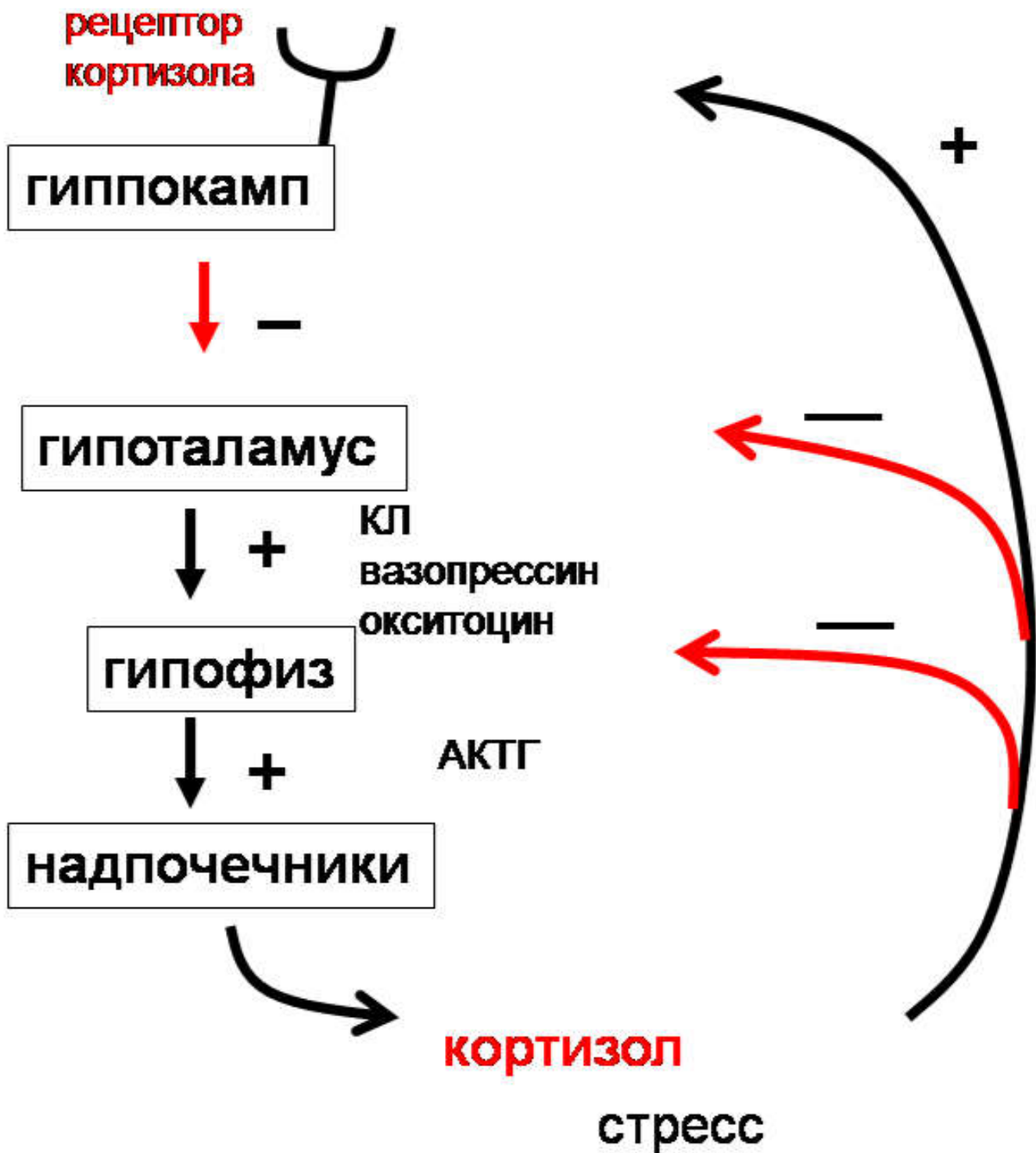
c



Socioeconomic status and the brain: mechanistic insights from human and animal research

Daniel A. Hackman, Martha J. Farah & Michael J. Meaney

Nature Reviews Neuroscience 11, 651-659 (September 2010)



**Гормон действует
кратковременно,
паттерн экспрессии
гена рецептора
кортизола меняется на
всю жизнь!**

Важнейшие вопросы в рамках эпигенетики – как события, происходящие на ранних этапах развития влияют на здоровье, поведение... (ФЕНОТИП!) в более поздние периоды

Полифенизм насекомых – прекрасная модель!

Что нового уже узнали о полифенизме насекомых, применяя эпигенетическую методологию

Что нового уже узнали о полифенизме насекомых, применяя эпигенетическую методологию

Эпигеномные подходы:

Анализ транскриптомов, метиломов, распределения модификаций гистонов...

Что происходит при отключении эпигенетических механизмов или их компонентов

Для анализа паттернов экспрессии генов нужно отсеквенировать геном

Геномы эусоциальных насекомых

2006 г. Доступна лишь чероновая сборка генома *A. mellifera*

Honeybee Genome Sequencing, C. Insights into social insects from the genome of the honeybee *Apis mellifera*. *Nature* 443, 931–949 (2006).

Революция в технологиях секвенирования, секвенирование нового поколения (next-generation sequencing technologies)

Bonasio, R. *et al.* Genomic comparison of the ants *Camponotus floridanus* and *Harpegnathos saltator*. *Science* 329, 1068–1071 (2010).

Gadau, J. *et al.* The genomic impact of 100 million years of social evolution in seven ant species. *Trends Genet.* 28, 14–21 (2012).

Oxley, P. R. *et al.* The genome of the clonal raider ant *Cerapachys biroi*. *Curr. Biol.* 24, 451–458 (2014).

Kocher, S. D. *et al.* The draft genome of a socially polymorphic halictid bee, *Lasioglossum albipes*. *Genome Biol.* 14, R142 (2013).

NCBI Resources How To

Genome [Create alert](#) [Limits](#) [Advanced](#)

[See also 40 organelle- and plasmid-only records matching your search](#)

Display Settings: Summary, 20 per page Send to: ▾

Search results

Items: 21 to 40 of 51 << First < Prev Page 2 of 3 Next > Last >>

- [Monomorium pharaonis](#)
- 21. [Monomorium pharaonis RefSeq Other](#)
Kingdom: Eukaryota; Subgroup: Insects
Sequence data: genome assemblies:1
Date: 2015/02/06
ID: 37124
- [Wasmannia auropunctata](#)
- 22. [Wasmannia auropunctata overview](#)
Kingdom: Eukaryota; Subgroup: Insects
Sequence data: genome assemblies:1
Date: 2015/02/05
ID: 36651
- [Vollenhovia emeryi](#)
- 23. [Vollenhovia emeryi overview](#)
Kingdom: Eukaryota; Subgroup: Insects
Sequence data: genome assemblies:1
Date: 2015/03/03
ID: 36511
- [Fopius arisanus](#)
- 24. [Fopius arisanus overview](#)
Kingdom: Eukaryota; Subgroup: Insects
Sequence data: genome assemblies:1
Date: 2014/12/19
ID: 35518

NCBI Resources How To

Genome [Limits](#) [Advanced](#)

Apis mellifera (honey bee)
Representative genome: Apis mellifera (assembly Amel_4.5)
 Download sequences in FASTA format for [genome](#), [transcript](#), [protein](#)
 Download genome annotation in GFF, [GenBank](#) or [tabular](#) format
 BLAST against Apis mellifera [genome](#)
All 2 genomes for species:
[Browse the list](#)
[Download sequence and annotation from RefSeq or GenBank](#)

Display Settings: Overview Send to: ▾

Organism Overview : [Genome Assembly and Annotation report \[2\]](#) ; [Organelle Annotation Report \[1\]](#) ID: 48



Apis mellifera (honey bee)

The honey bee is a social insect, important for agricultural and biomedical research studies

Lineage: Eukaryota[2425]; Metazoa[812]; Ecdysozoa[377]; Arthropoda[289]; Hexapoda[253]; Insecta[250]; Pterygota[250]; Neoptera[246]; Holometabola[213]; Hymenoptera[51]; Apocrita[47]; Aculeata[35]; Apoidea[14]; Apidae[11]; Apis[4]; Apis mellifera[1]

The honey bee (*Apis mellifera*) is a valuable organism for study due to its unique behavioral traits and social instincts. *A. mellifera* is important to the agricultural community as a pollinator and to researchers as a model for studies in immunity and diseases of the X chromosome. These characteristics of the honey bee were instrumental in its assignment as a high priority organism for genome sequencing by the National Human Genome Research Institute ([NHGRI](#)). [Less...](#)

ARTICLE

Received 6 Aug 2013 | Accepted 19 Nov 2013 | Published 14 Jan 2014

DOI: 10.1038/ncomms3957

OPEN

The locust genome provides insight into swarm formation and long-distance flight

Xianhui Wang¹, Xiaodong Fang², Pengcheng Yang^{1,3}, Xuanting Jiang², Feng Jiang^{1,3}, Dejian Zhao¹, Bolei Li¹, Feng Cui¹, Jianing Wei¹, Chuan Ma^{1,3}, Yundan Wang^{1,3}, Jing He¹, Yuan Luo¹, Zhifeng Wang¹, Xiaojiao Guo¹, Wei Guo¹, Xuesong Wang^{1,3}, Yi Zhang¹, Meiling Yang¹, Shuguang Hao¹, Bing Chen¹, Zongyuan Ma^{1,3}, Dan Yu¹, Zhiqiang Xiong², Yabing Zhu², Dingding Fan², Lijuan Han², Bo Wang², Yuanxin Chen², Junwen Wang², Lan Yang², Wei Zhao², Yue Feng², Guanxing Chen², Jinmin Lian², Qiye Li², Zhiyong Huang², Xiaoming Yao², Na Lv⁴, Guojie Zhang², Yingrui Li², Jian Wang², Jun Wang², Baoli Zhu⁴ & Le Kang^{1,3}

Locusts are one of the world's most destructive agricultural pests and represent a useful model system in entomology. Here we present a draft 6.5 Gb genome sequence of *Locusta migratoria*, which is the largest animal genome sequenced so far. Our findings indicate that the large genome size of *L. migratoria* is likely to be because of transposable element proliferation combined with slow rates of loss for these elements. Methylome and transcriptome analyses reveal complex regulatory mechanisms involved in microtubule dynamic-mediated synapse plasticity during phase change. We find significant expansion of gene families associated with energy consumption and detoxification, consistent with long-distance flight capacity and phytophagy. We report hundreds of potential insecticide target genes, including cys-loop ligand-gated ion channels, G-protein-coupled receptors and lethal genes. The *L. migratoria* genome sequence offers new insights into the biology and sustainable management of this pest species, and will promote its wide use as a model system.



We identified a total of 4,893 differentially expressed genes in at least one of the time points during both processes, and this accounted for 28.3% of the gene sets.

Gene ontology (GO) analyses showed these fell into a variety of categories, indicating that phase change induced a broad range of changes in CNS gene expression.

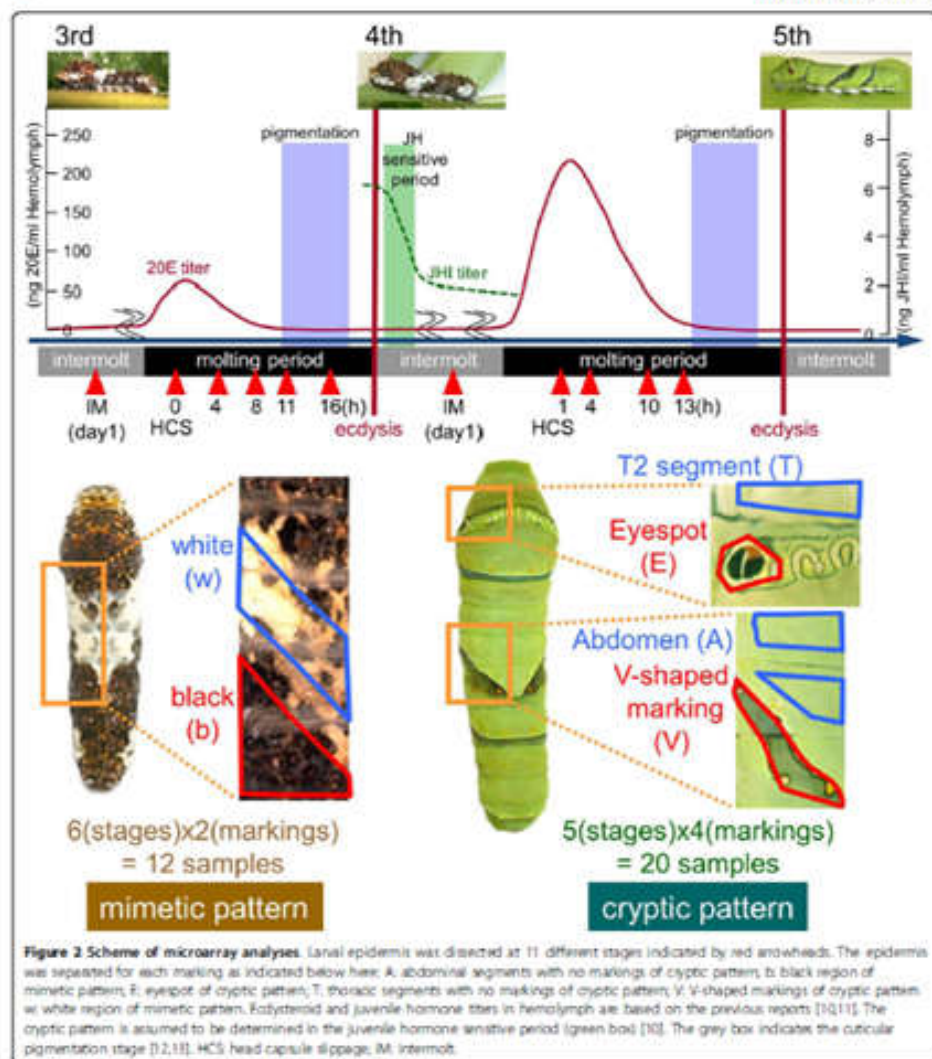
Comprehensive microarray-based analysis for stage-specific larval camouflage pattern-associated genes in the swallowtail butterfly, *Papilio xuthus*

Futahashi *et al.*



Futahashi *et al. BMC Biology* 2012, **10**:46

<http://www.biomedcentral.com/1741-7007/10/46> (31 May 2012)



Обнаружены транскрипционные факторы, участвующие в регуляции развития каст в разных группах эусоциальных насекомых

Simola, D. F. *et al.* Social insect genomes exhibit dramatic evolution in gene composition and regulation while preserving regulatory features linked to sociality. *Genome Res.* 23, 1235–1247 (2013).

Сравнение около 30 геномов одиночных и эусоциальных видов насекомых выявил особенности эволюции сайтов связывания транскрипционных факторов у эусоциальных насекомых.

В частности, быстро эволюционируют некоторые гены с нейроэндокринной функцией, и именно эти гены показывают сходную дифференциальную экспрессию при сравнении каст у разных видов муравьев и пчел.

Факты в пользу важности дифференциального метилирования ДНК при формировании каст у эусоциальных насекомых

Bombus terrestris



ru.wikipedia.org

Ингибирование ДНК-метилтрансферазы у земляного шмеля приводит к переходу рабочих особей к размножению

Amarasinghe et al., 2014 Methylation and worker reproduction in the bumble-bee (*Bombus terrestris*). *Proc. R. Soc. B* 281, 20132502 .

Личинки пчелиных маток у медоносной пчелы имеют более низкий общий уровень метилирования генома, чем личинки рабочих пчел. Нокаут гена, кодирующего DNMT3 у личинок рабочих пчел приводит к развитию фенотипа, близкого к фенотипу пчелиной матки, в частности, развиваются яичники.

Kucharski, R., Maleszka, J., Foret, S. & Maleszka, R. Nutritional control of reproductive status in honeybees via DNA methylation. *Science* 319, 1827–1830 (2008). This paper presents the first functional evidence of the regulatory role of DNA methylation in regulating caste fate in eusocial insects.

? Метилирование ДНК ингибирует развитие матки, маточное молочко снимает это ингибирование?

Маточное молочко влияет на инсулиновый каскад

Маточное молочко содержит ингибитор деацетилазы гистонов 10HDA.



D. F. Simola, C. Ye, N. S. Mutti, K. Dolezal, R. Bonasio, J. Liebig, D. Reinberg, S. L. Berger. **A chromatin link to caste identity in the carpenter ant *Camponotus floridanus*.** *Genome Research*, 2012;

Robinson et al., *Insect Mol Biol*. 2016
Alternative migratory locust phenotypes are associated with differences in the expression of genes encoding the methylation machinery.



Queen pheromones modulate DNA methyltransferase activity in bee and ant workers

Biol. Lett. 2016

Luke Holman¹, Kalevi Trontti^{2,3} and Heikki Helanterä^{3,4}

¹Division of Ecology, Evolution & Genetics, Research School of Biology, Australian National University, Canberra, Australian Capital Territory 2601, Australia

²Department of Biosciences, Division of Genetics, University of Helsinki, Helsinki 00014, Finland

³Centre of Excellence in Biological Interactions, Department of Biosciences, University of Helsinki, PO Box 65, Helsinki 00014, Finland

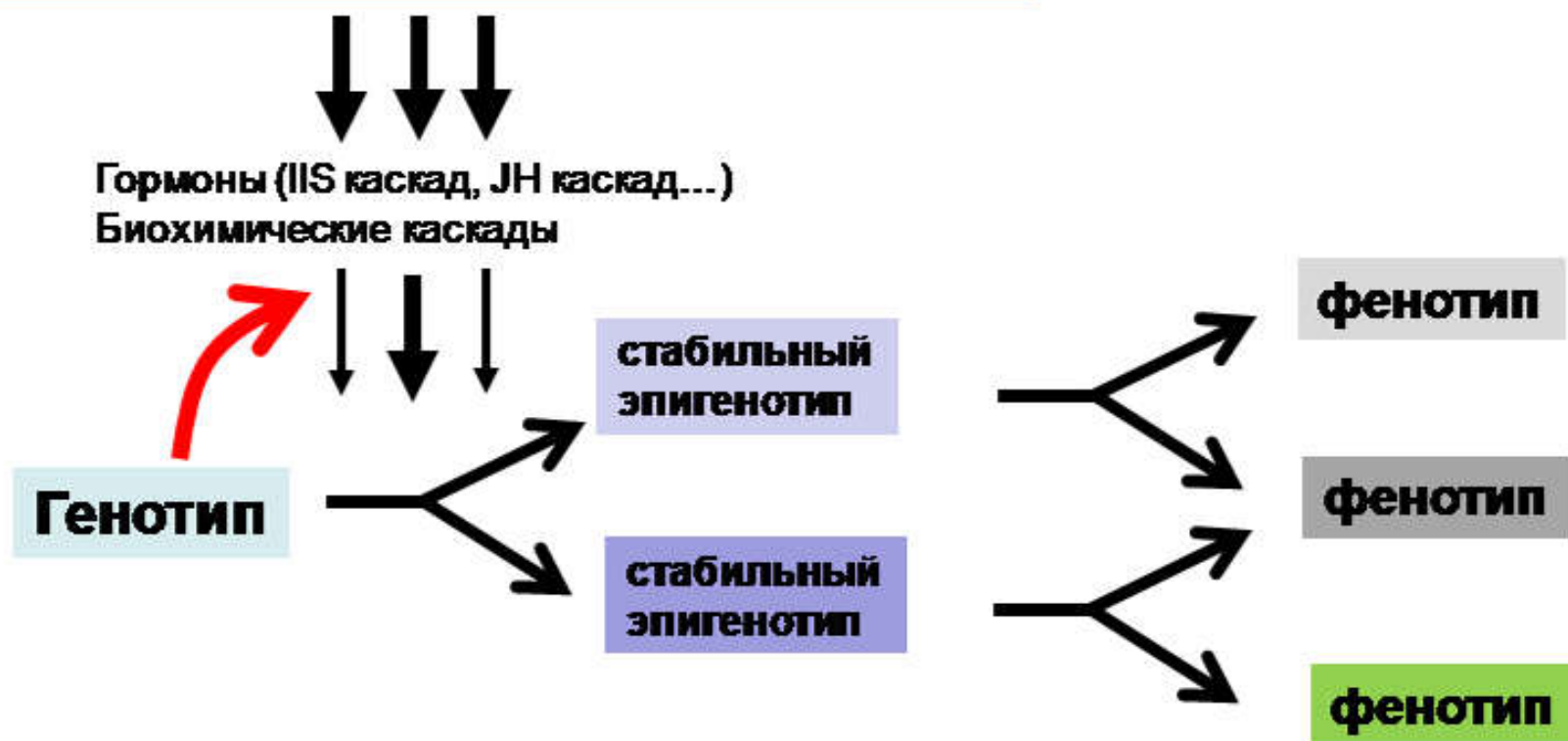
⁴Tvärminne Zoological Station, J. A. Palménin tie 260, Hanko 10900, Finland

DNA methylation is emerging as an important regulator of polyphenism in the social insects. Research has concentrated on differences in methylation between queens and workers, though we hypothesized that methylation is involved in mediating other flexible phenotypes, including pheromone-dependent changes in worker behaviour and physiology. Here, we find that exposure to queen pheromone affects the expression of two DNA methyltransferase genes in *Apis mellifera* honeybees and in two species of *Lasius* ants, but not in *Bombus terrestris* bumblebees. These results suggest that queen pheromones influence the worker methylome, pointing to a novel proximate mechanism for these key social signals.

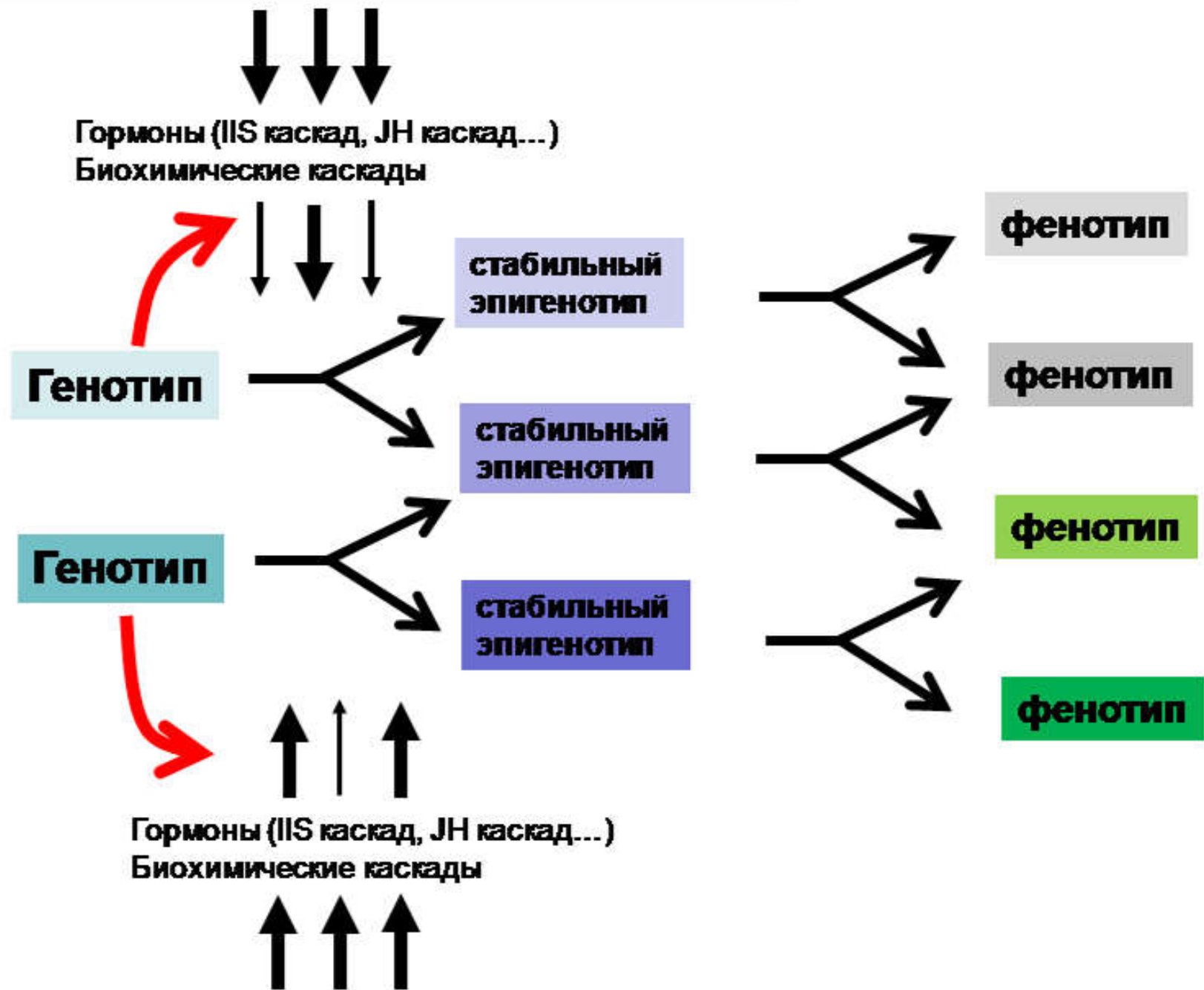
Our data provide evidence that adult *A. mellifera*, *L. niger* and *L. flavus* workers change their DNA methylation profile in response to queen pheromones.

Эпигенетика и полифенизм

Температура, питание, сигналы от органов чувств...



Температура, питание, сигналы от органов чувств...



Температура, питание, сигналы от органов чувств...

Nature versus nurture in social insect caste differentiation

Tanja Schwander^{1,4}, Nathan Lo², Madeleine Beekman², Benjamin P. Oldroyd² and Laurent Keller³

¹Simon Fraser University, Biological Sciences, 8888 University Drive, Burnaby V5A 1S6, Canada

²Behaviour and Genetics of Social Insects Laboratory, School of Biological Sciences A12, University of Sydney, Sydney, NSW 2006, Australia

³University of Lausanne, Biophore, 1015 Lausanne, Switzerland

	Species	Data type	References
Environmental factors	<i>Vespula maculifrons</i>	G	[24]
	<i>Formica exsecta</i>	G	[23]
	<i>Mycocepurus smithii</i>	I	[25,26]
	<i>Apis cerana</i>	G	[22]
	<i>A. mellifera</i>	I, E, G	[9–12,15–21]
	<i>F. truncorum</i>	G	[23]
	<i>Cardiocondyla kagutsuchi</i>	E	[31]
	<i>Pogonomyrmex badius</i>	G	[30]
	<i>P. rugosus</i>	E, G	[28]
	<i>Acromyrmex echinatior</i>	G	[29]
	<i>Harpagoxenus sublaevis</i>	E	[34,36]
	<i>Leptothorax</i> sp. A	E	[35]
	<i>Reticulitermes speratus</i>	E	[37]
	<i>Melipona</i> ssp	E	[39,40,45]
Genetic factors	<i>Pogonomyrmex</i> lineages	E, G	[50–52]
	<i>Solenopsis xyloni</i> x <i>geminata</i> hybrids	G	[57,58]
	<i>Vollenhovia emeryi</i>	G	[60,61]
	<i>Wasmannia auropunctata</i>	I, G	[59]

Species with strong genetic effects on caste

Many southern US populations of *Pogonomyrmex* contain differentiated genetic lineages, most or all of which derive from historical hybridization between the harvester ants *P. rugosus* and *P. barbatus* [47,48]. These lineages always occur in pairs [49] and queens in each lineage-pair mate multiple times with males of their own as well as with males of the alternate lineage. Interlineage offspring develop into workers, whereas intralineage offspring develop into queens [47,50–52]. Crossing experiments

Полифенизм насекомых - уникальная эпигенетическая модель

- **Механизмы дифференциальной экспрессии генов**
- **Связь генотипа и фенотипа**
- **Эпигенетика поведения**
- **Связь гормонов и экспрессии генов**
- **Эволюция регуляции экспрессии генов**
-