

Температура и живые системы: эксперименты, модели и практическая значимость

РАЗНООБРАЗИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

На клеточном и субклеточном уровнях:

Физическое состояние веществ, из которых состоит тело

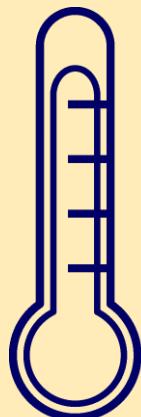
Растворимость веществ

Стабильность структуры белков

Активность ферментов

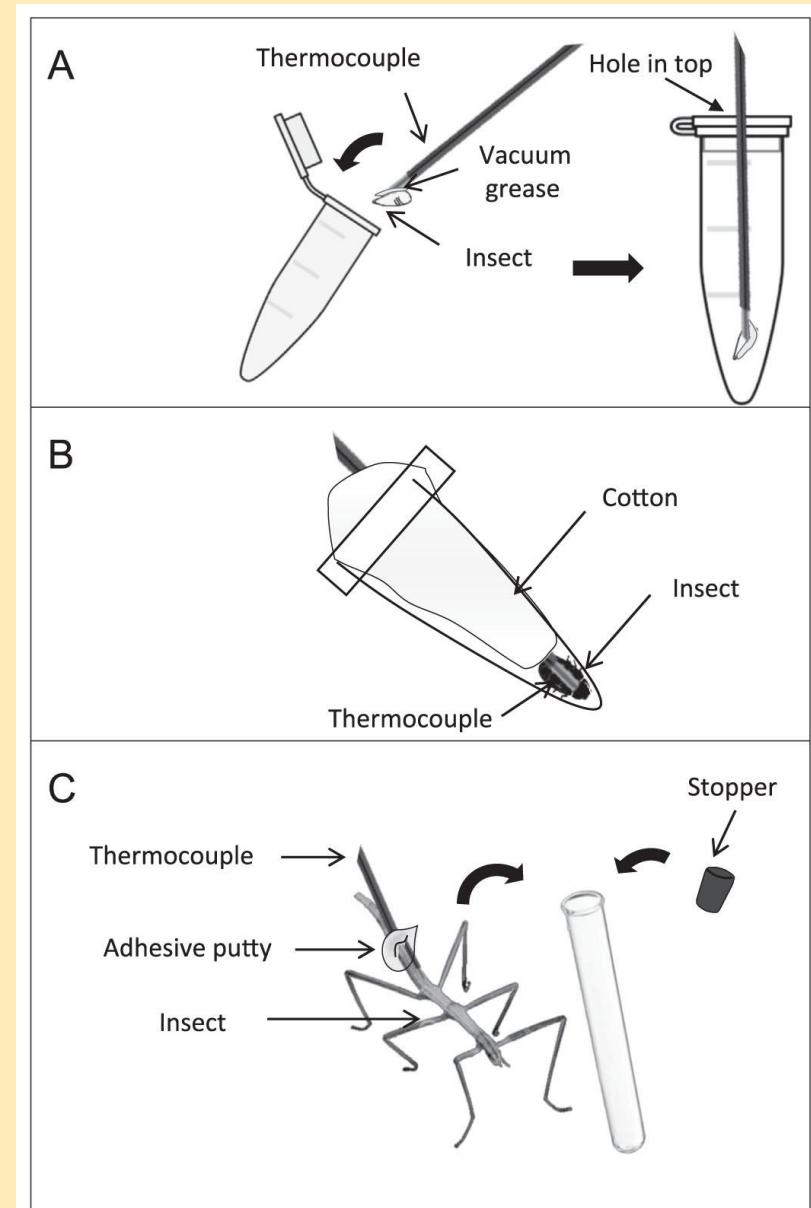
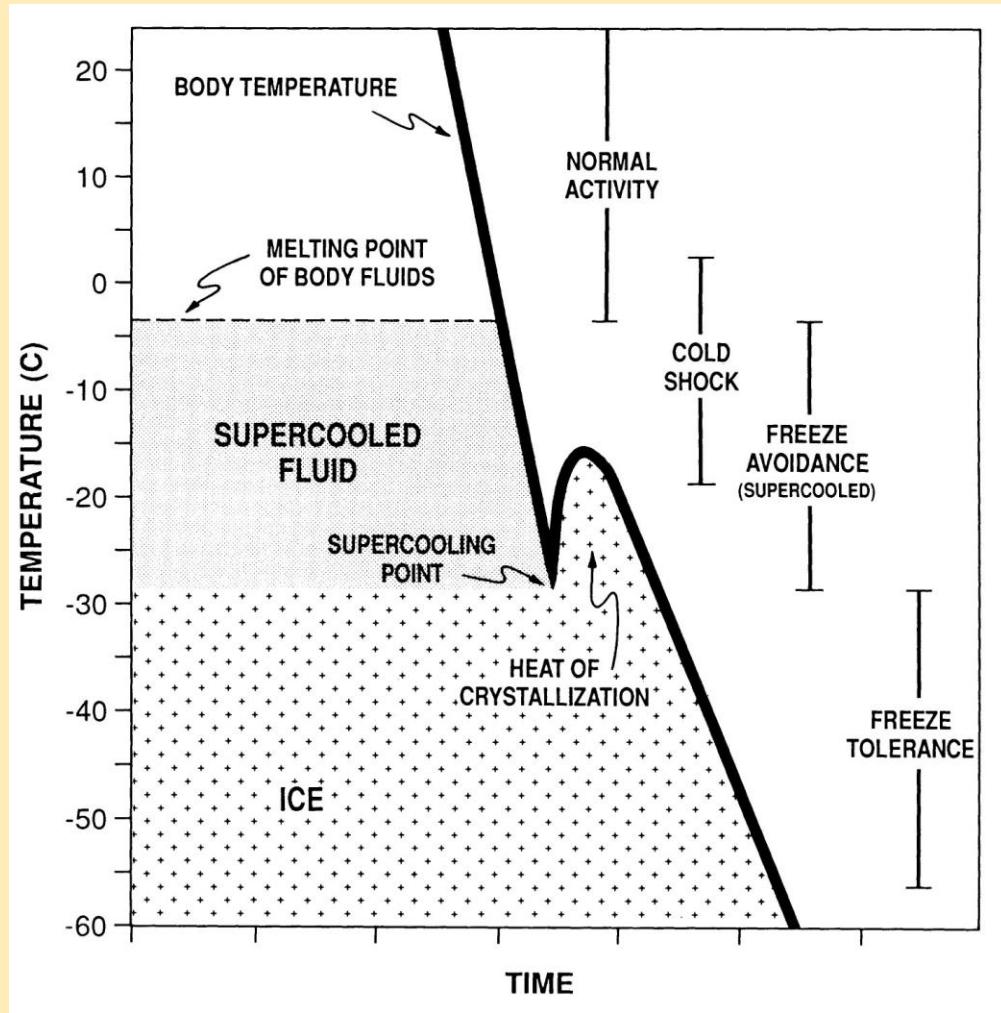
Скорость химических реакций

Экспрессия генов



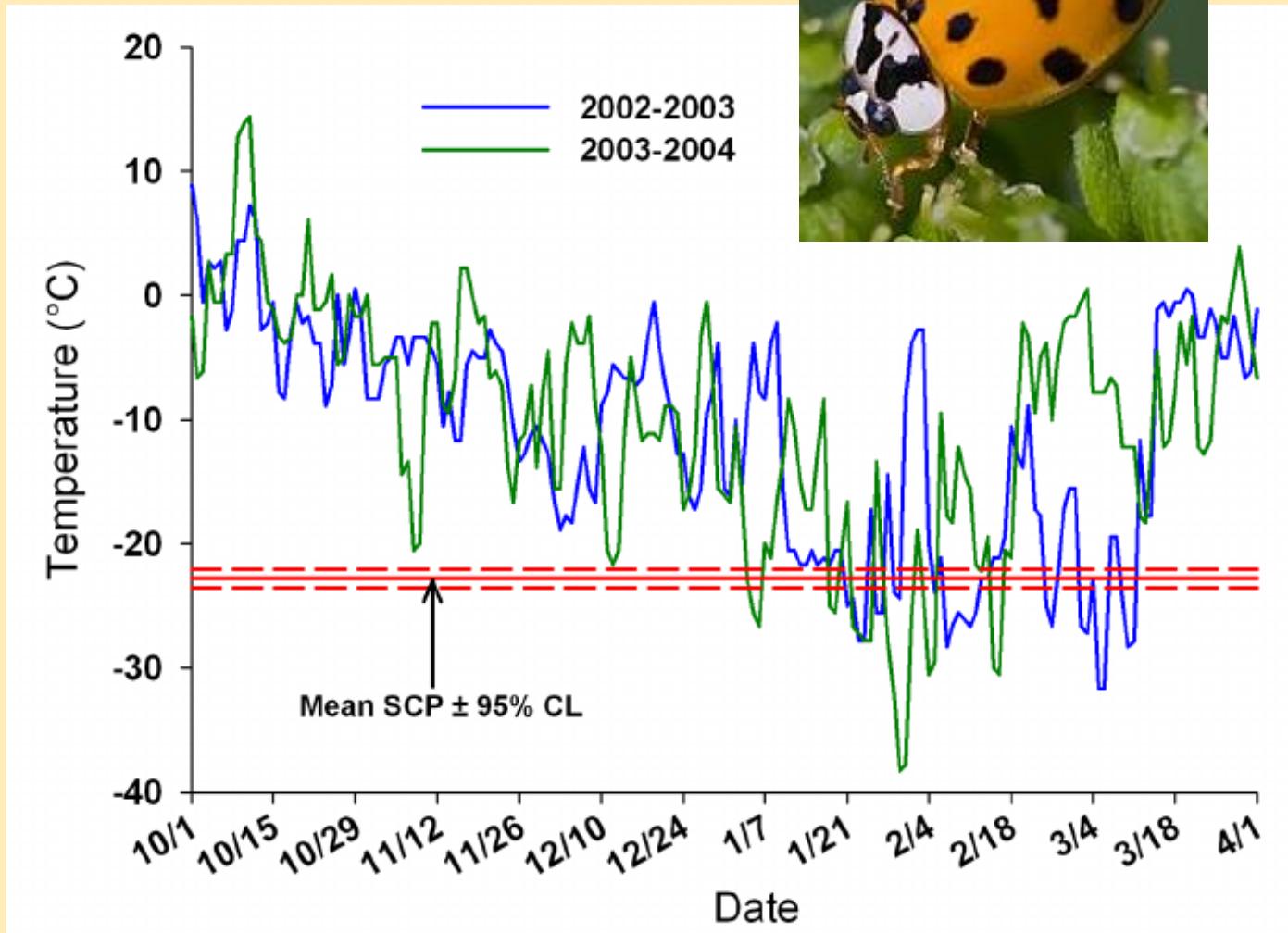
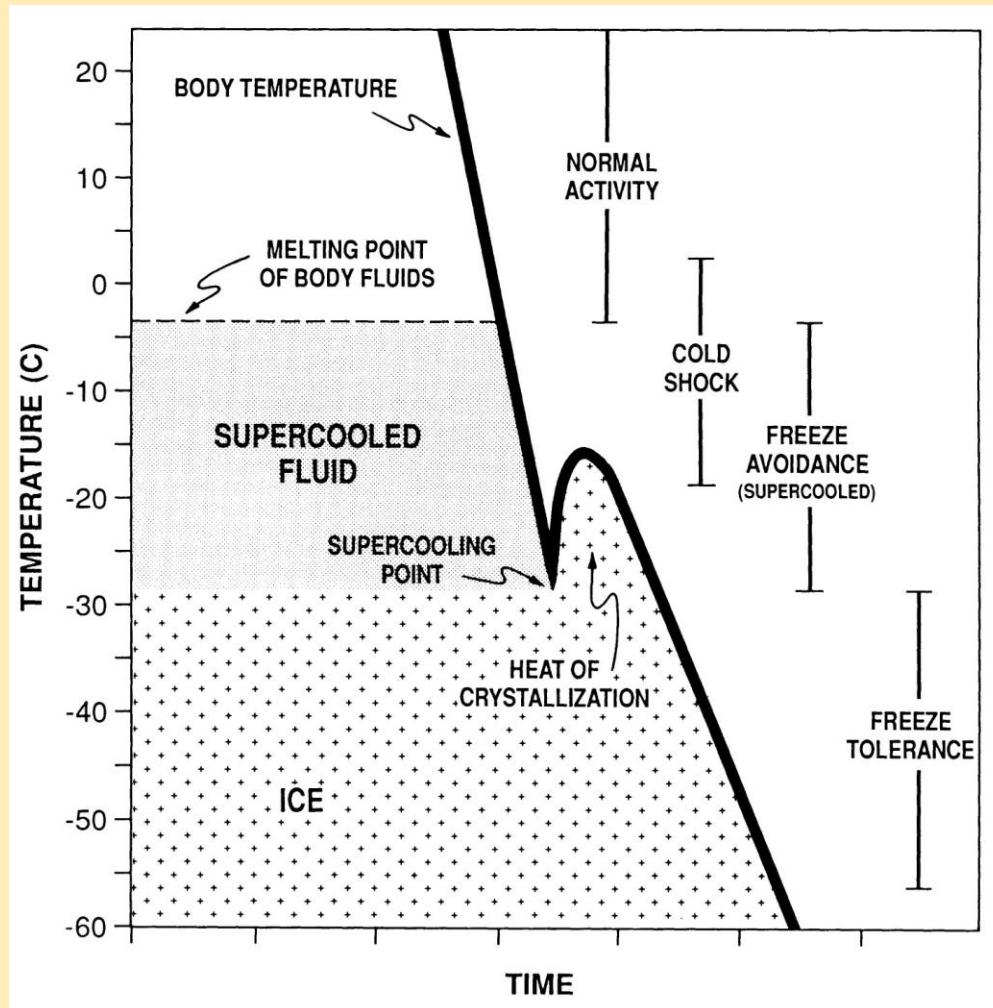
РАЗНООБРАЗИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

Измерение точки переохлаждения (supercooling point)



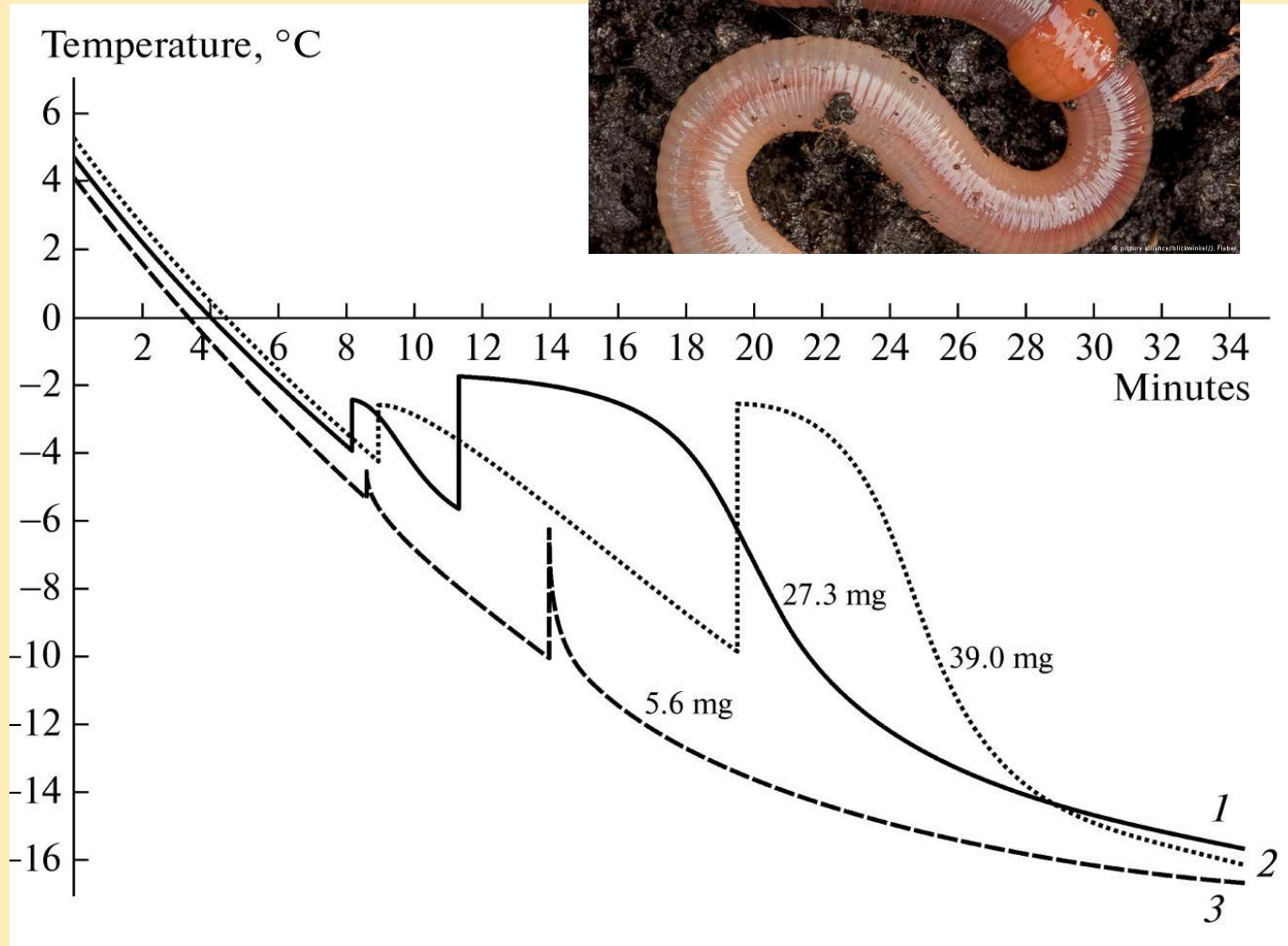
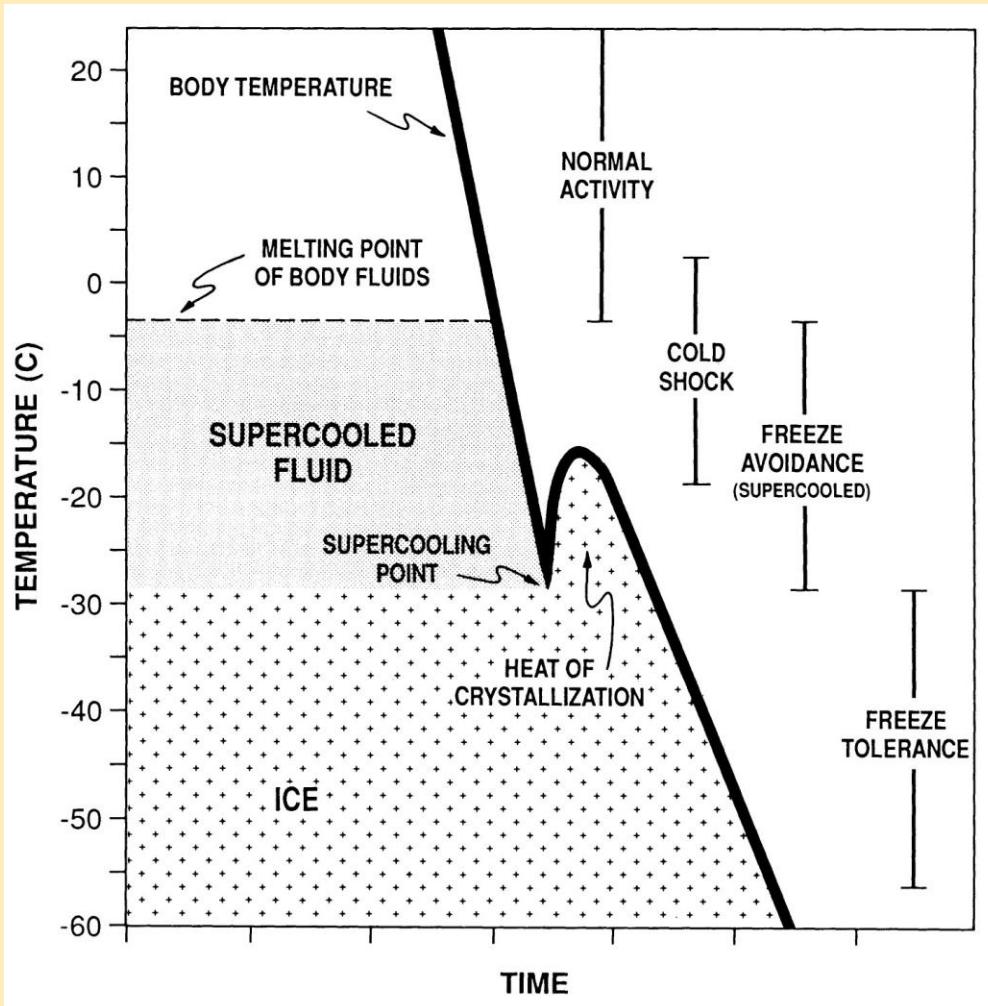
РАЗНООБРАЗИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

Измерение точки переохлаждения (supercooling point)



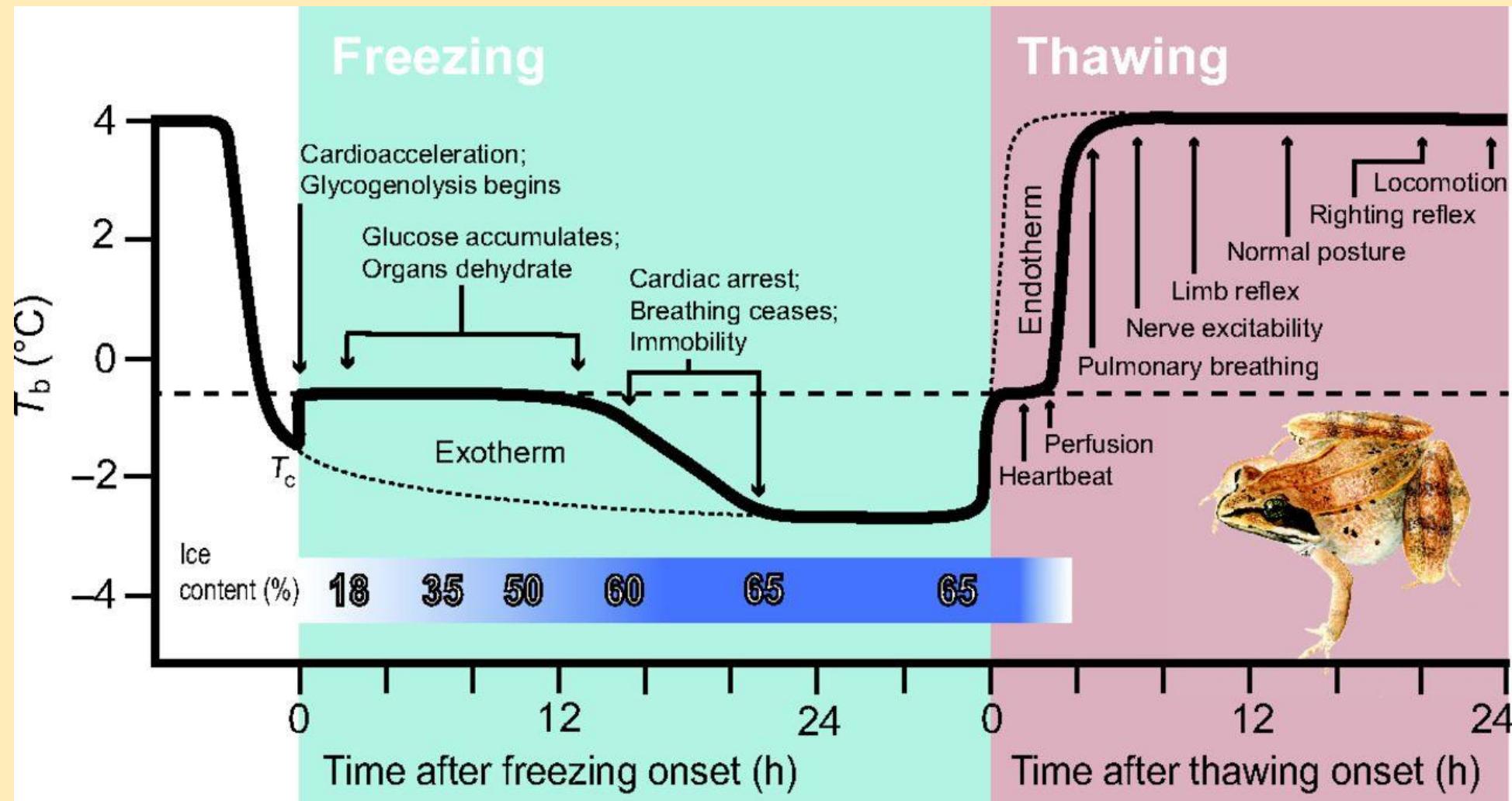
РАЗНООБРАЗИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

Измерение точки переохлаждения (supercooling point)



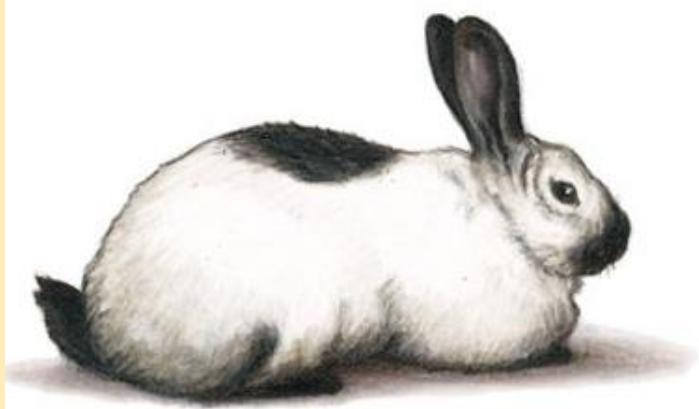
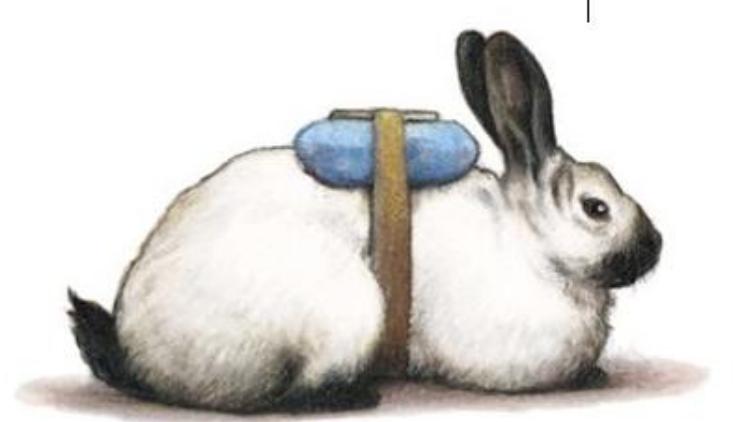
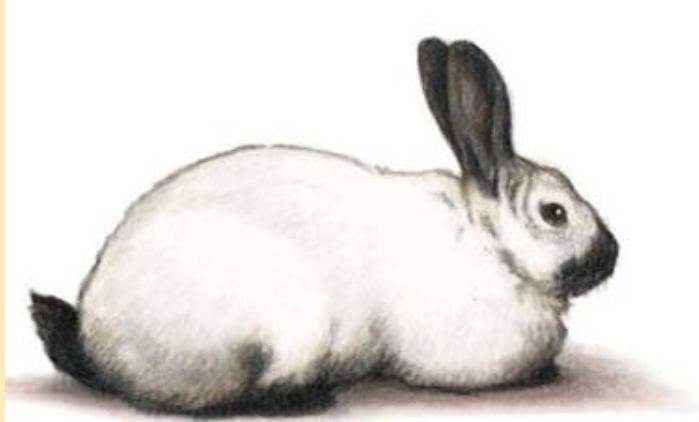
РАЗНООБРАЗИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

Измерение физиологических ответов на переохлаждение



РАЗНООБРАЗИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

Температура среды и экспрессия генов



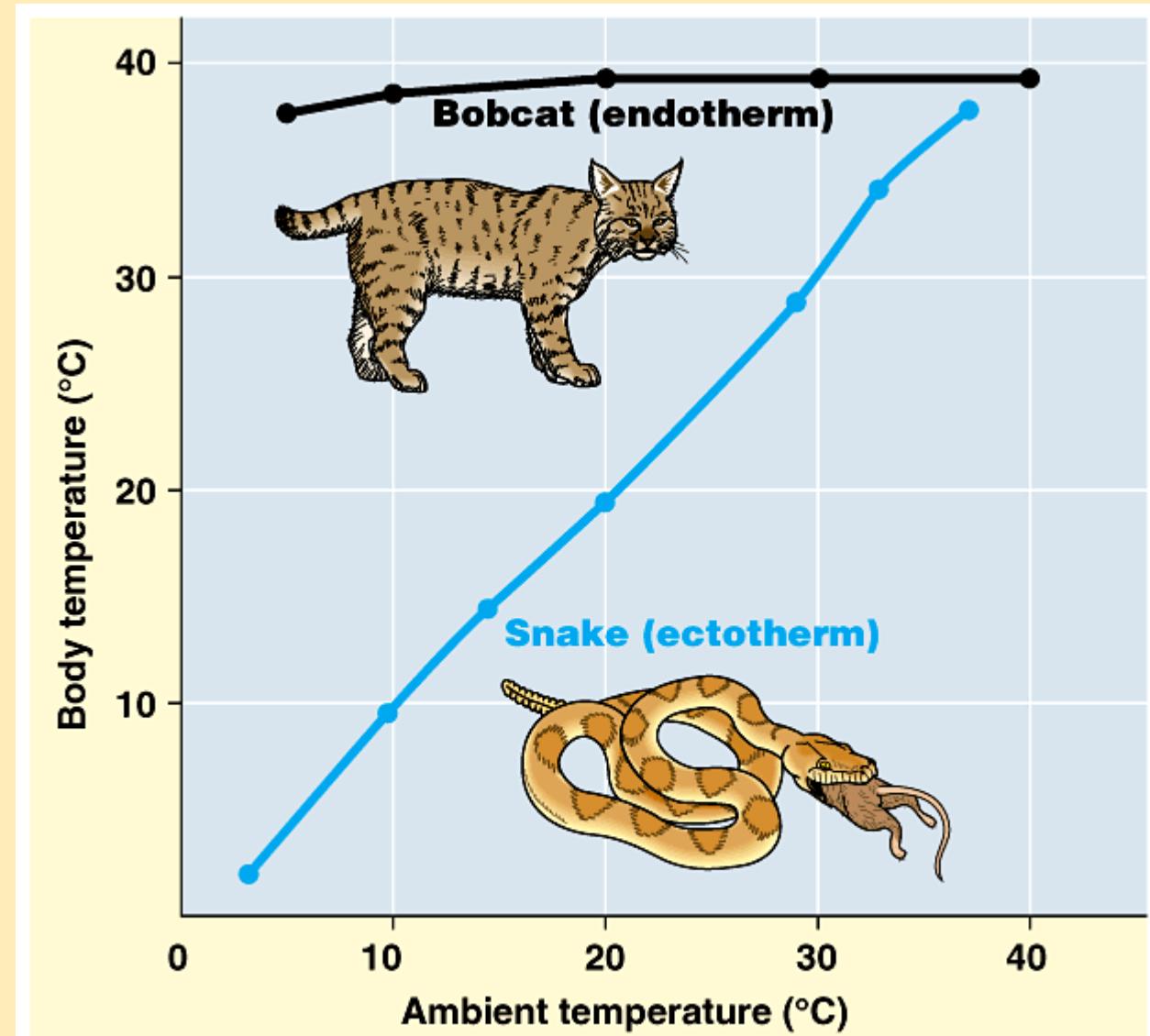
The effect of environment on the expression of a gene for fur color in the Himalayan rabbit.

Under normal conditions only the rabbit's feet, tail, ears, and nose are black. If fur is removed from a patch on the rabbit's back and an ice pack is placed there, creating a cold local environment, the new fur that grows in is black.



РАЗНООБРАЗИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

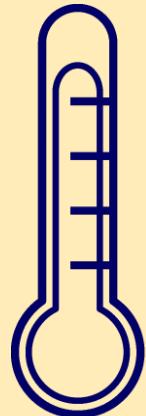
На уровне целого организма:



РАЗНООБРАЗИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

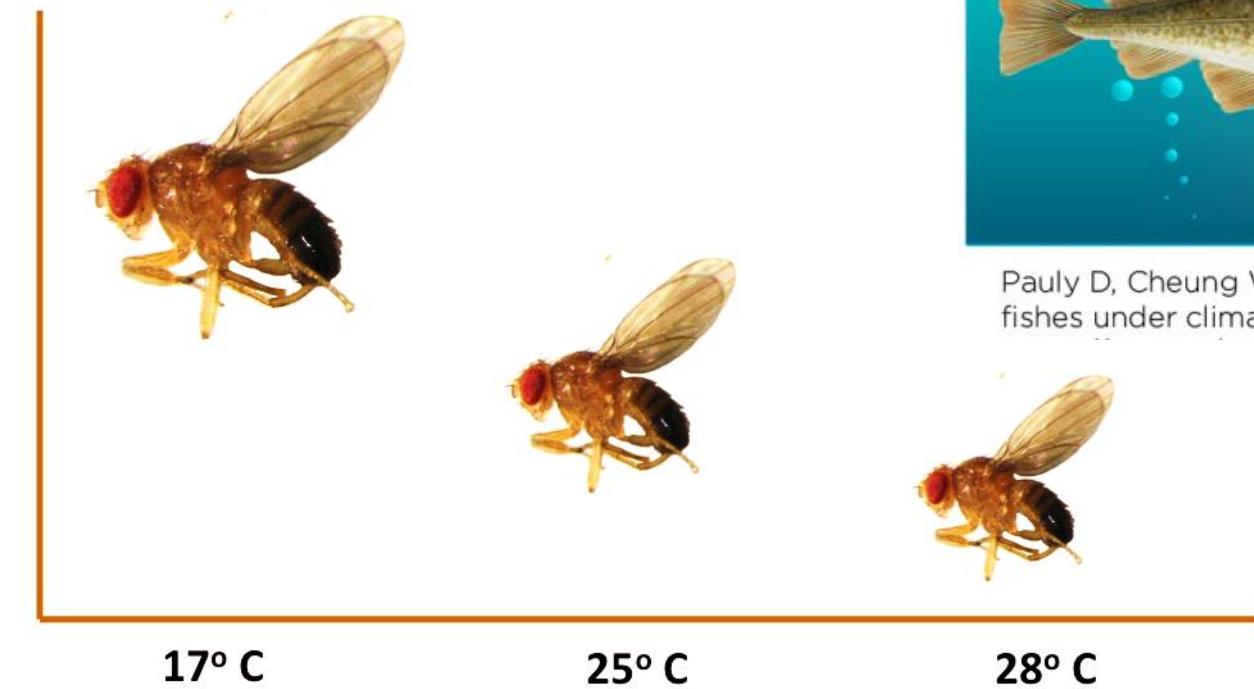
На уровне целого организма:

Форма, размеры, окраска тела



РАЗНООБРАЗИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

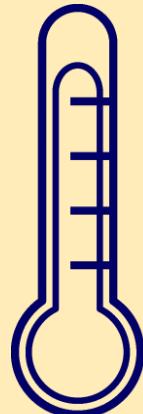
Правило «размер–температура» (temperature-size rule)



Pauly D, Cheung WWL. Sound physiological knowledge and principles in modeling shrinking of fishes under climate change. *Glob Change Biol.* 2017;00: 1-12.

РАЗНООБРАЗИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

На уровне целого организма:



Форма, размеры, окраска тела

Скорость метаболизма

Скорость локомоции

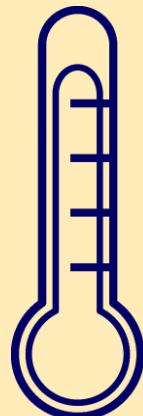
Темпы роста и развития

Суточная активность и фенология

Доступность питательных веществ

РАЗНООБРАЗИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

На уровне целого организма:



Форма, размеры, окраска тела

Скорость метаболизма

Скорость локомоции

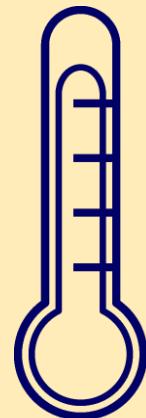
Темпы роста и развития

Суточная активность и фенология

Доступность питательных веществ

РАЗНООБРАЗИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

На уровне популяций и сообществ:



Биотические взаимодействия

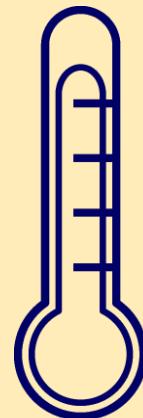
Размножение и расселение

Динамика популяций

Границы ареалов

РАЗНООБРАЗИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

На уровне популяций и сообществ:



Биотические взаимодействия

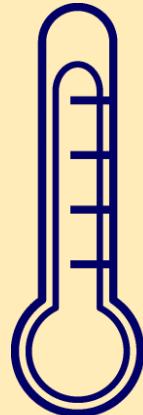
Размножение и расселение

Динамика популяций

Границы ареалов

РАЗНООБРАЗИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

На уровне биосферы:



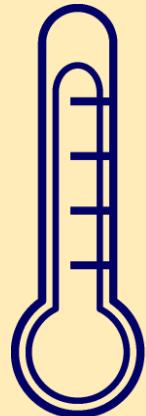
Динамика сообществ

Распределение биомов и биоразнообразия

Скорость биогеохимических круговоротов

РАЗНООБРАЗИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

На уровне биосферы:



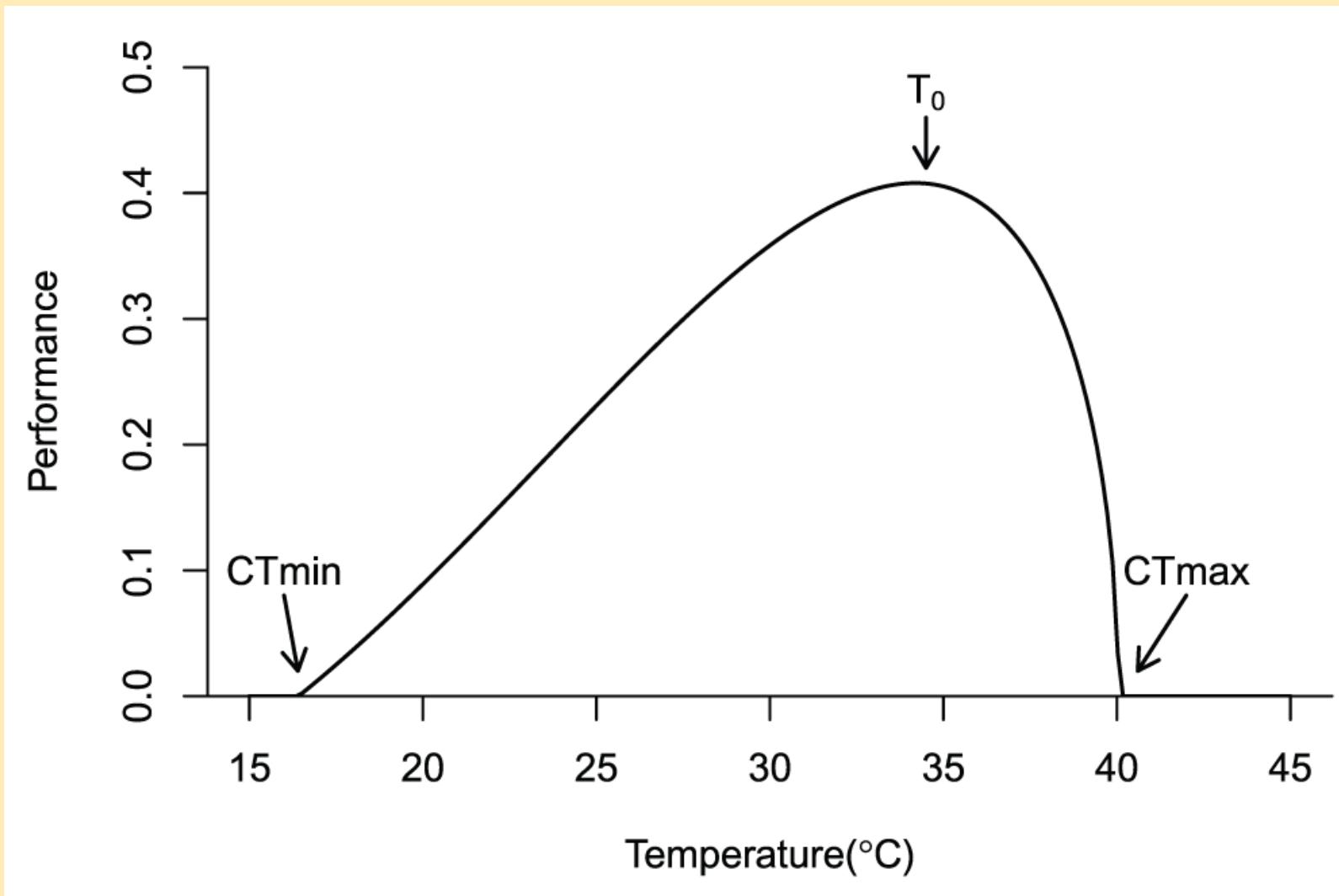
Динамика сообществ

Распределение биомов и биоразнообразия

Скорость биогеохимических круговоротов

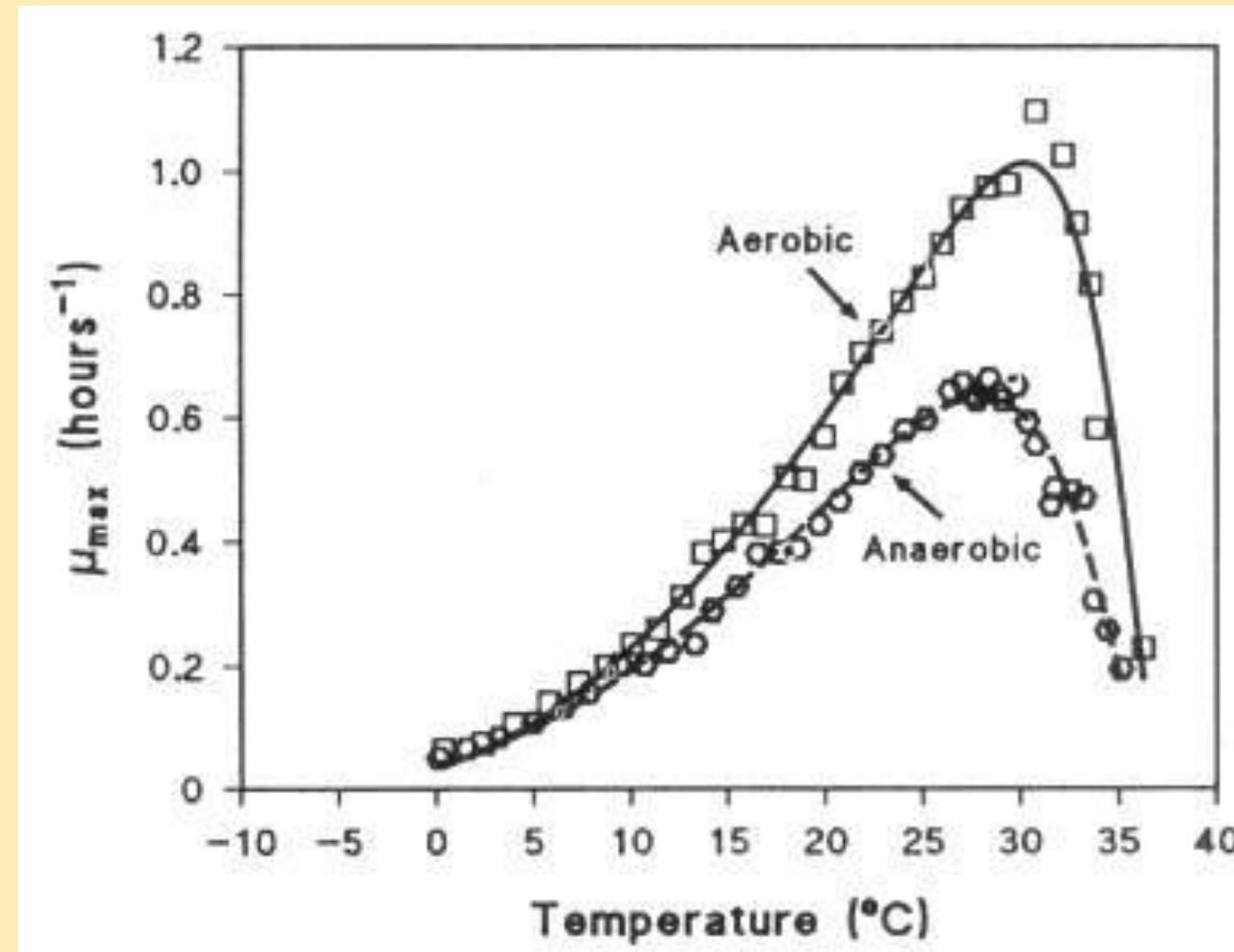
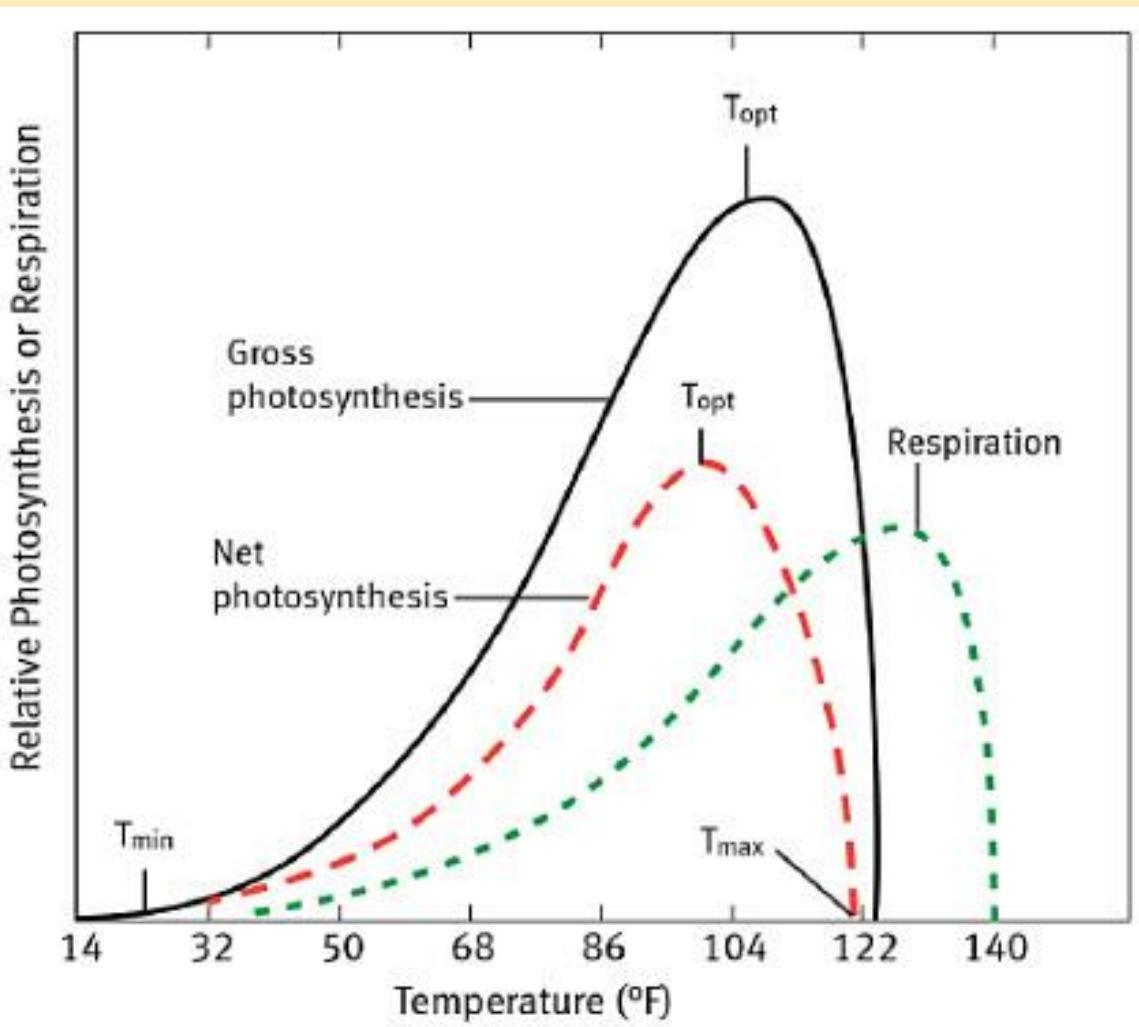
РАЗНООБРАЗИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

Типичная норма реакции на температуру (thermal reaction norm)



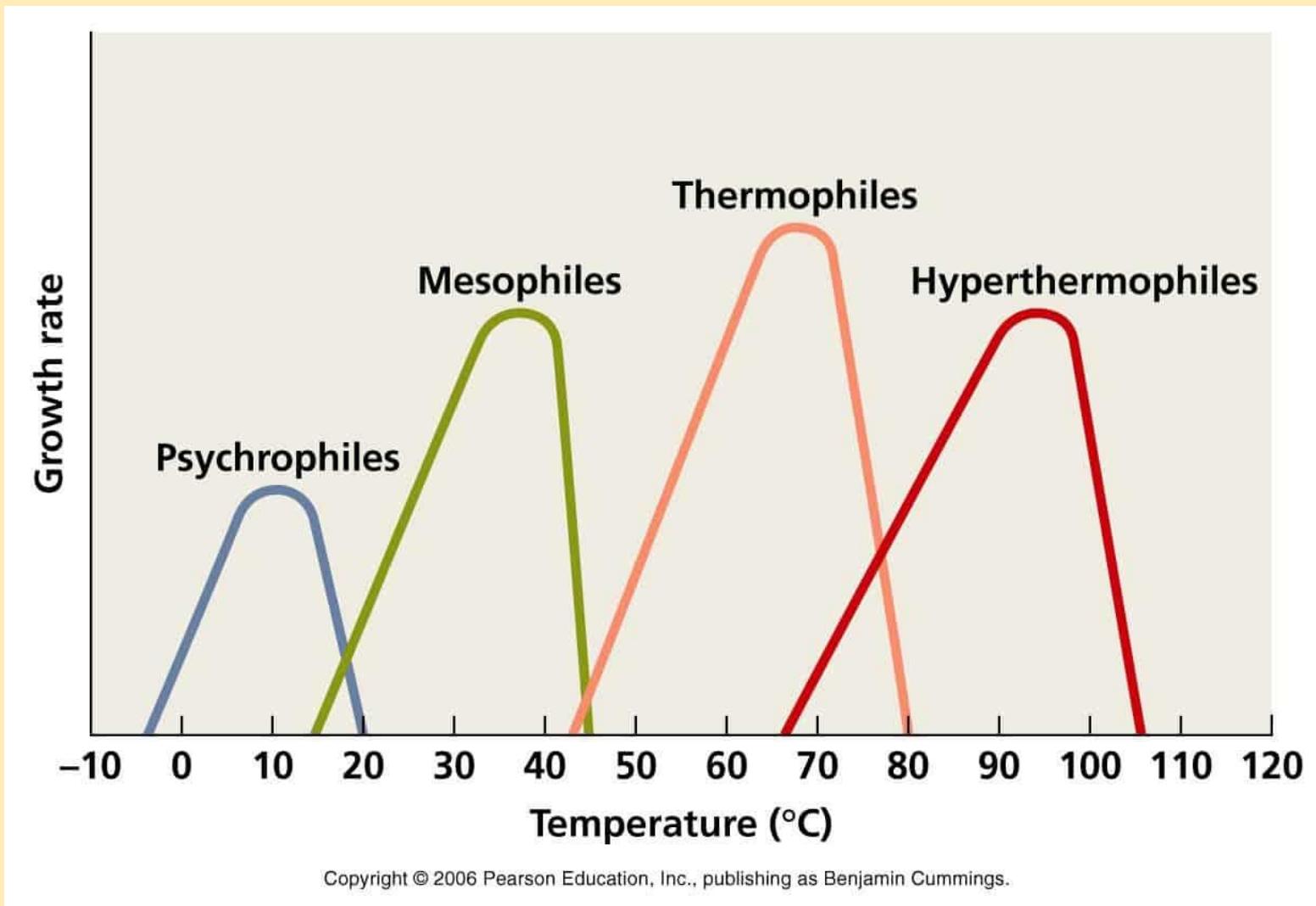
РАЗНООБРАЗИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

Примеры норм реакции на температуру (thermal reaction norms)



РАЗНООБРАЗИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭФФЕКТОВ

Примеры норм реакции на температуру (thermal reaction norms)

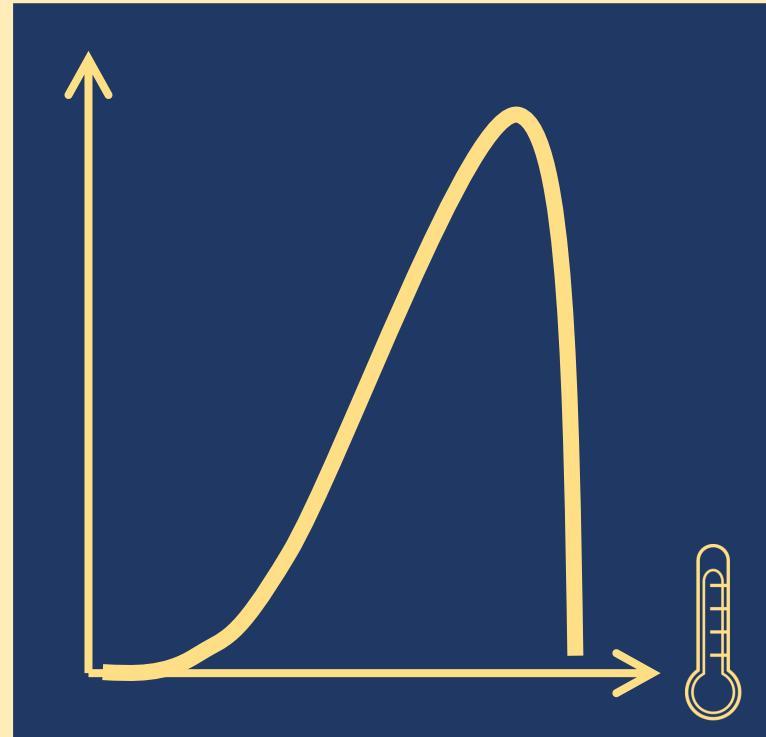


ТЕМПЕРАТУРА СРЕДЫ И РАЗВИТИЕ ЭКТОТЕРМОВ

Два теоретических (почти философских) подхода

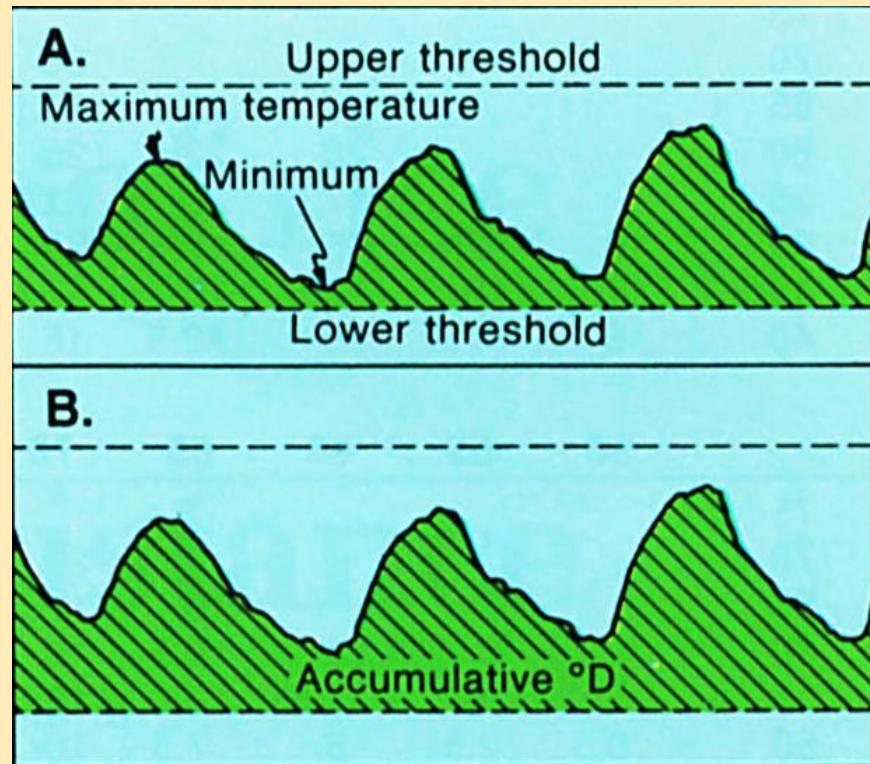


Подход, основанный
на «сумме эффективных
температур»



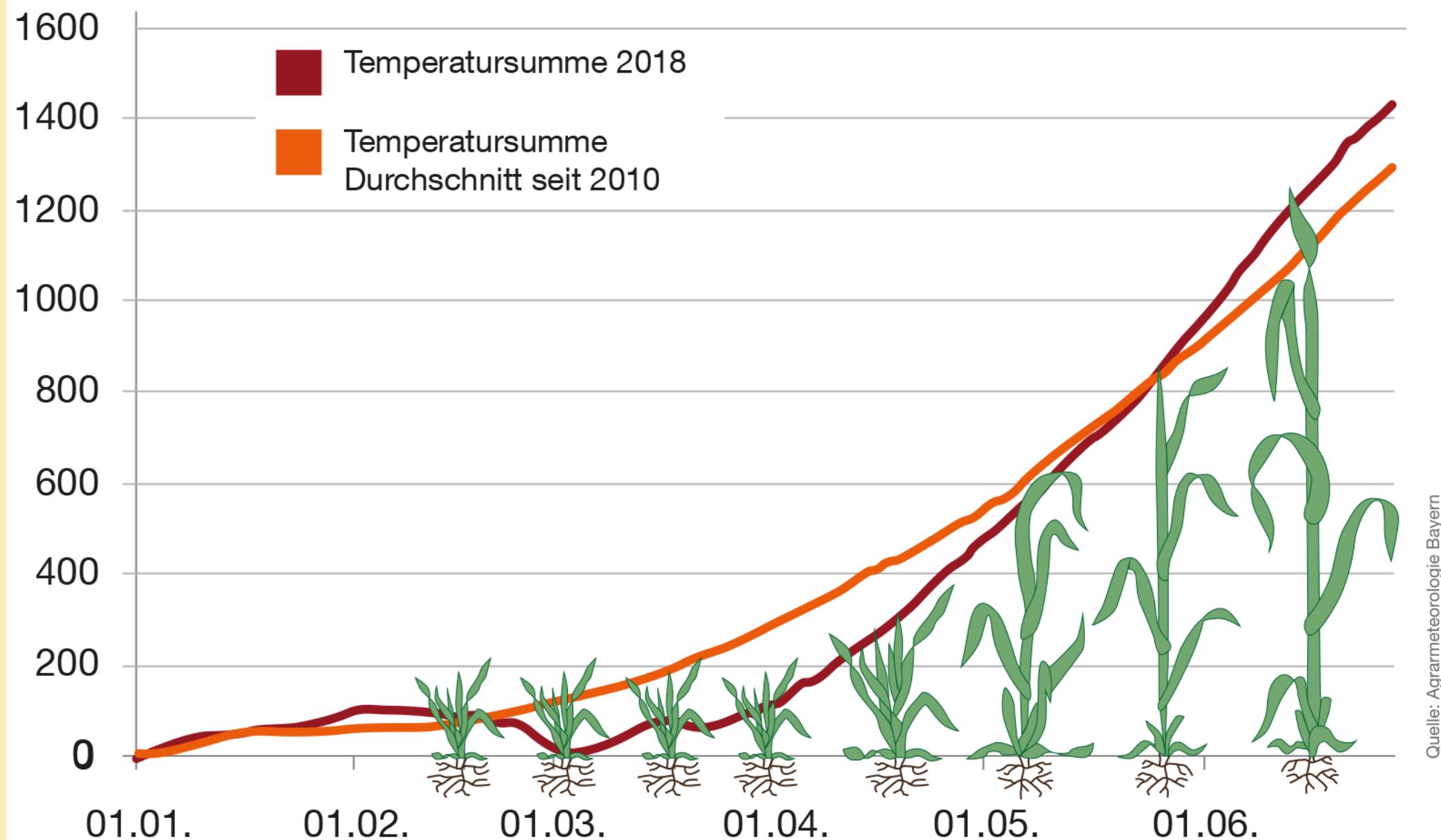
Подход, основанный
на нормах реакции

СУММА ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕМПЕРАТУР



$$CET = \sum_{i=1}^n (t_i - t_0) = (t - t_0) \times D$$

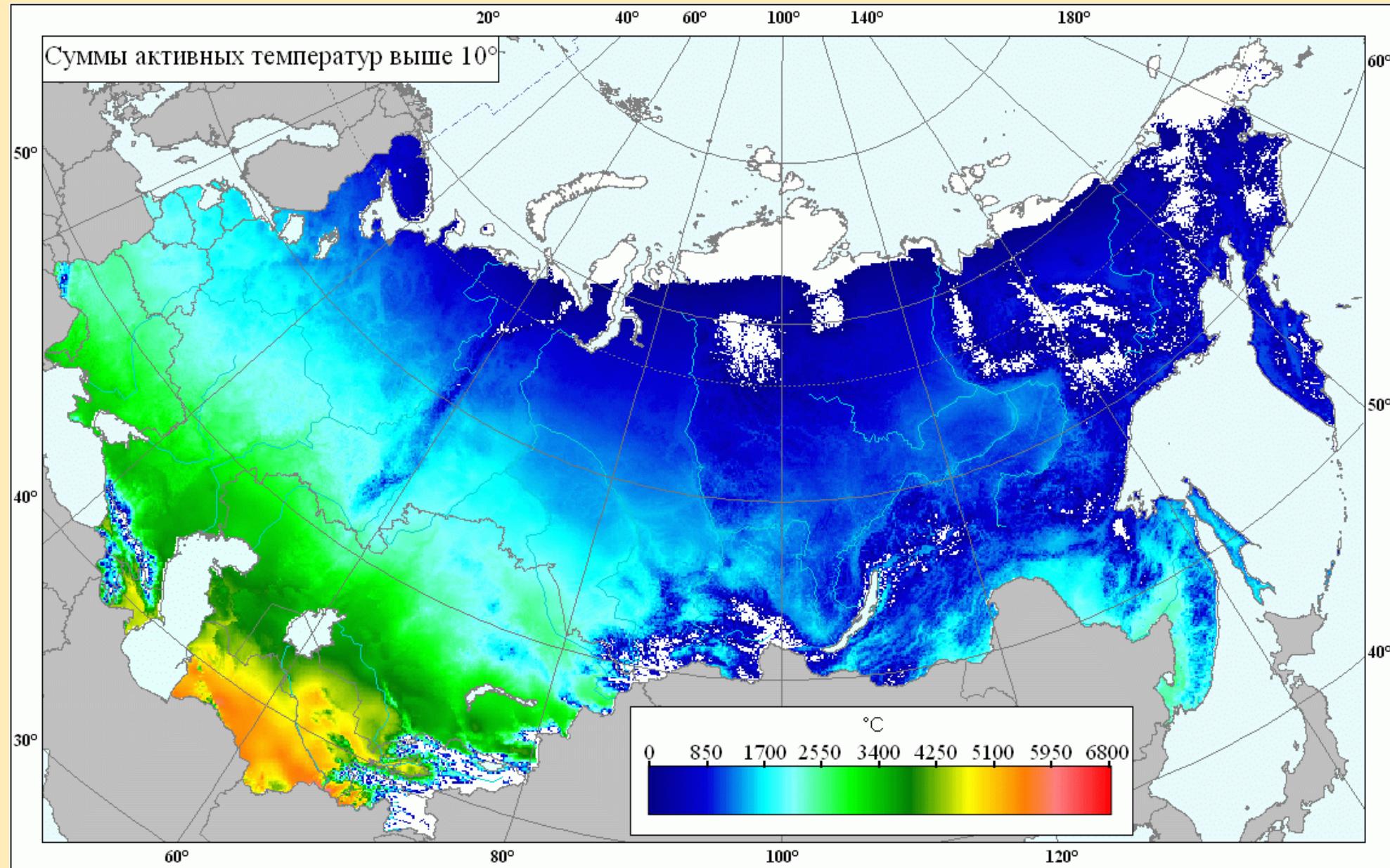
СУММА ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕМПЕРАТУР



Quelle: Agrarmeteorologie Bayern

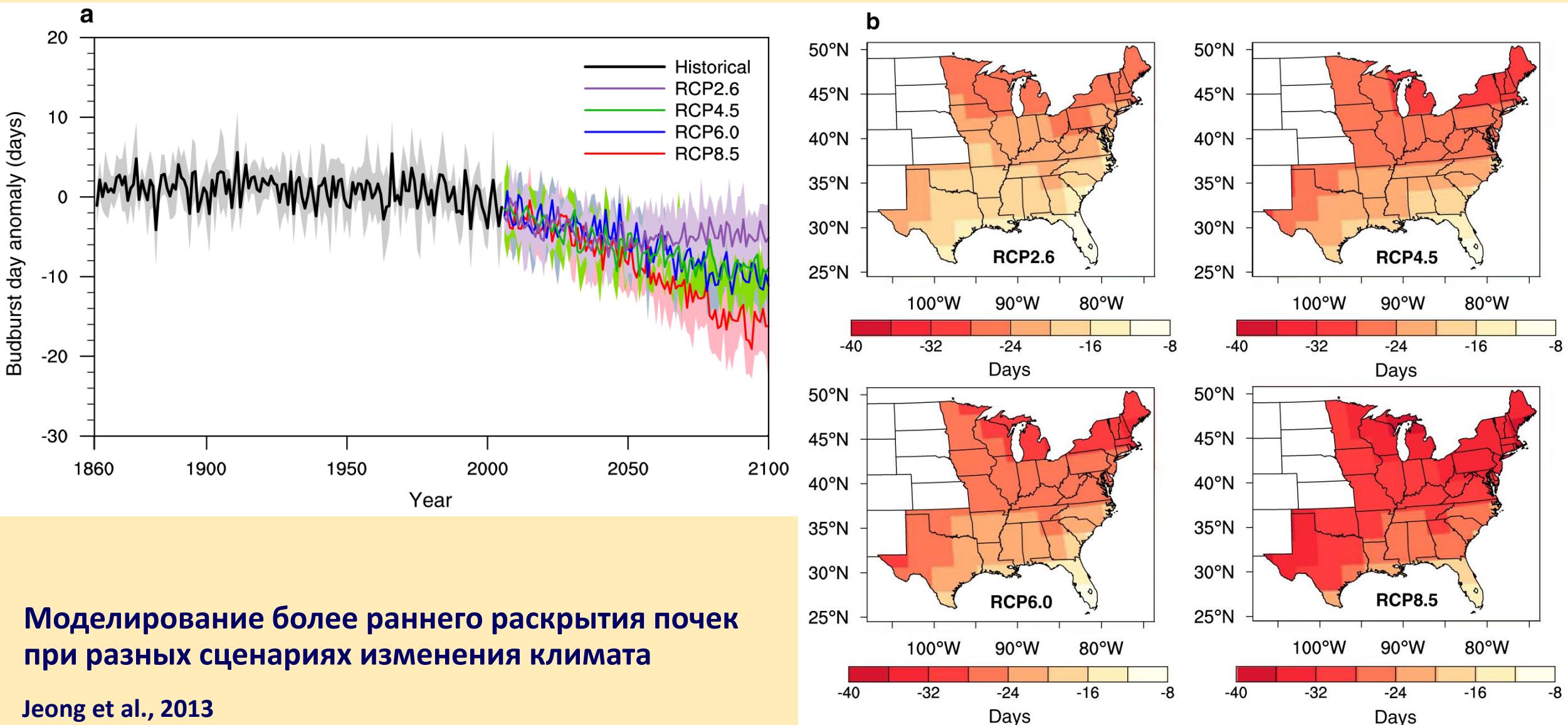
© Bayerischer
Bauernverband

СУММА ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕМПЕРАТУР

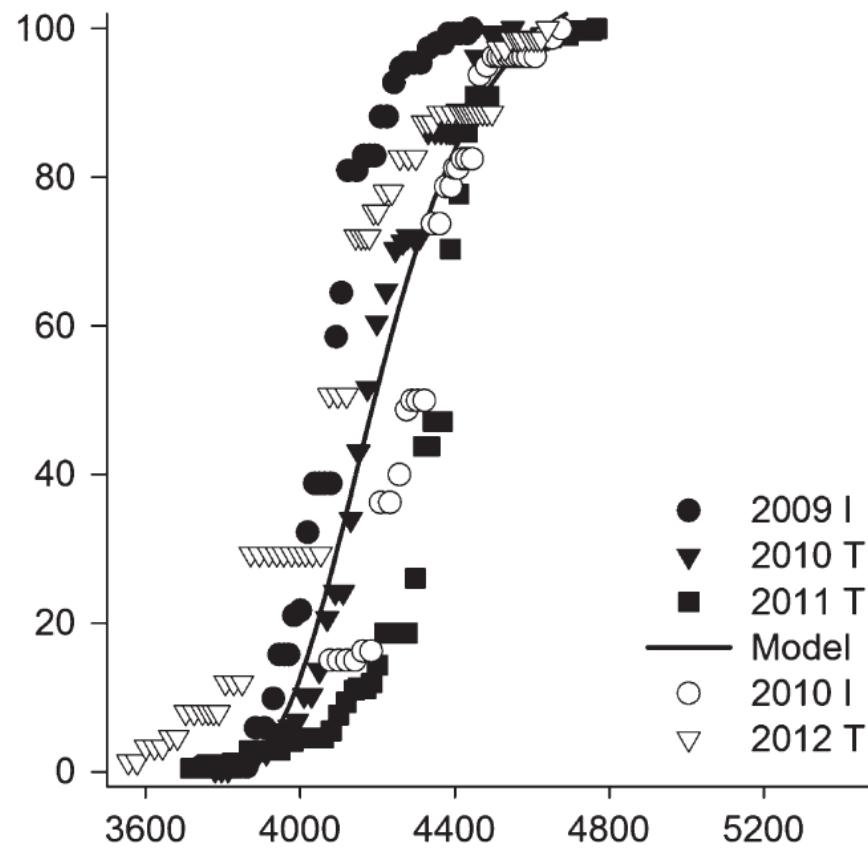
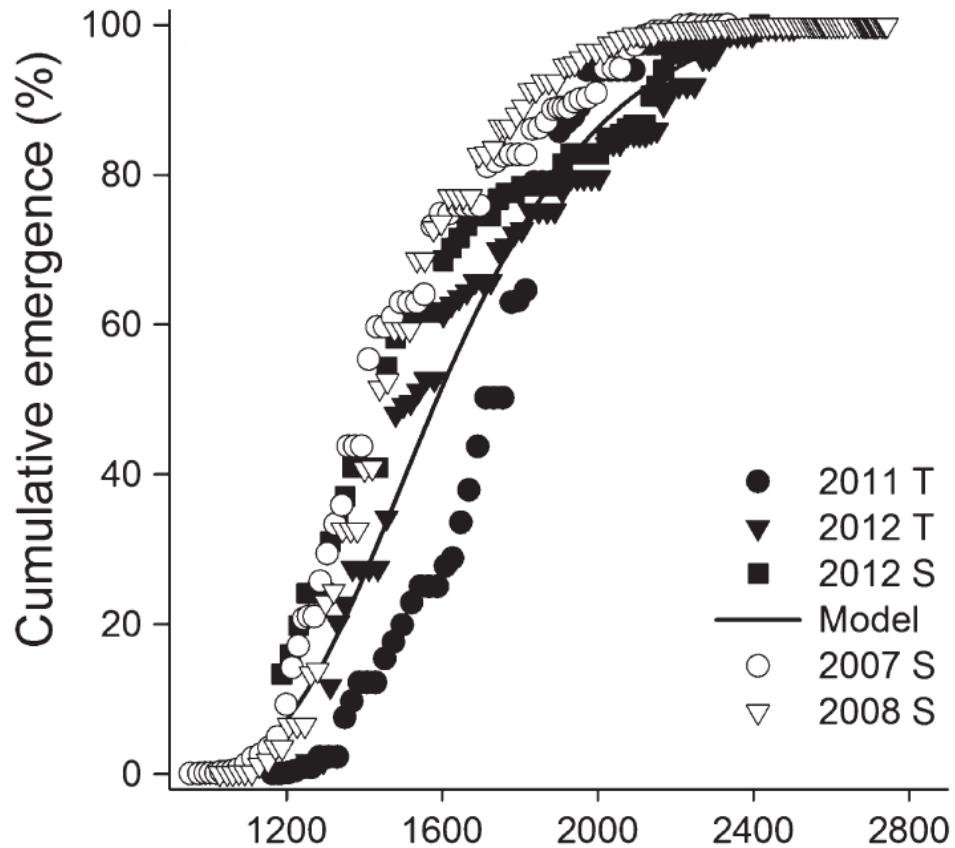


Афонин и др., 2005,
agroatlas.ru

СУММА ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕМПЕРАТУР



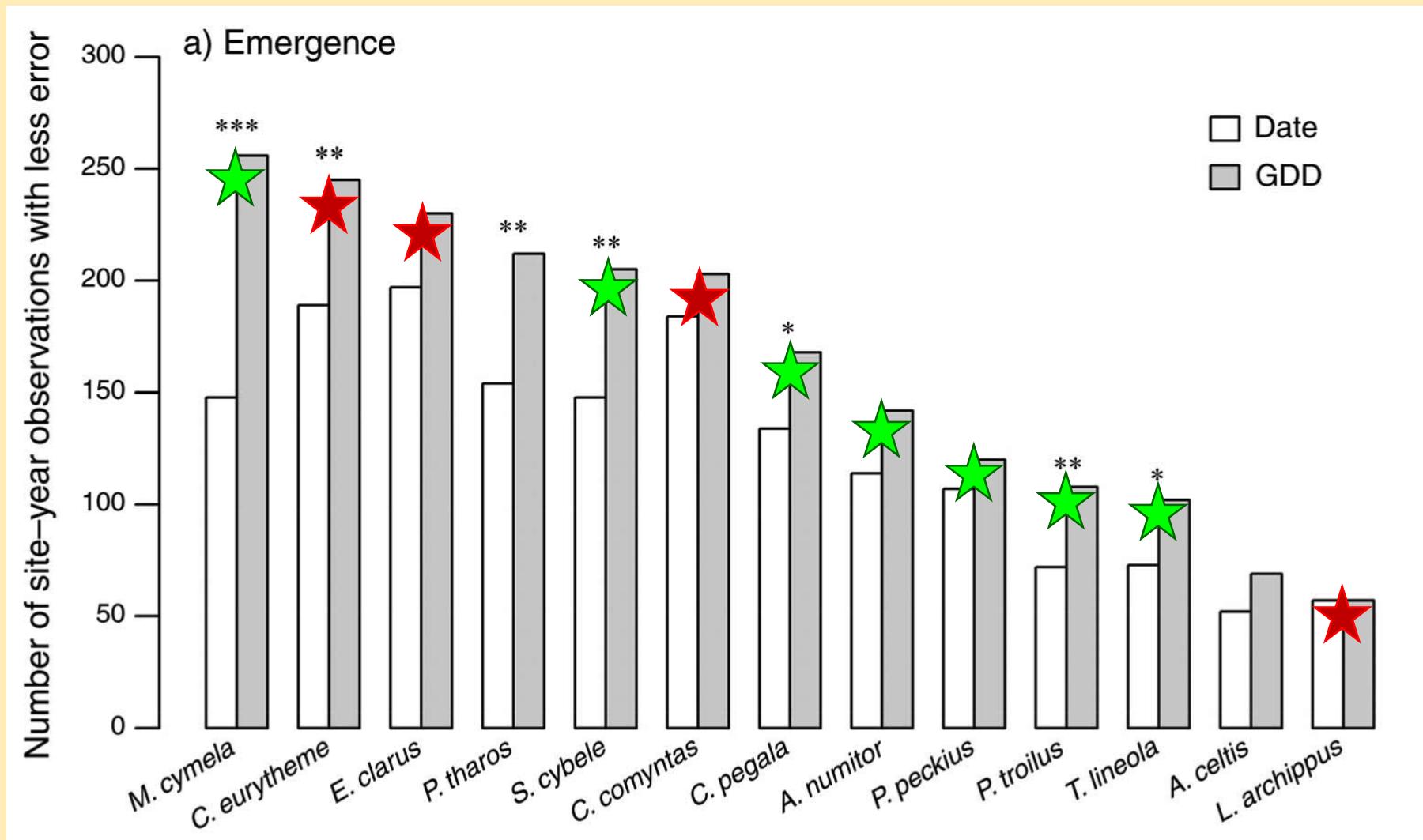
СУММА ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕМПЕРАТУР



Haavik et al., 2013

Моделирование времени вылета двух видов рогохвостов, *Sirex noctilio* и *S. nigricornis*

СУММА ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕМПЕРАТУР

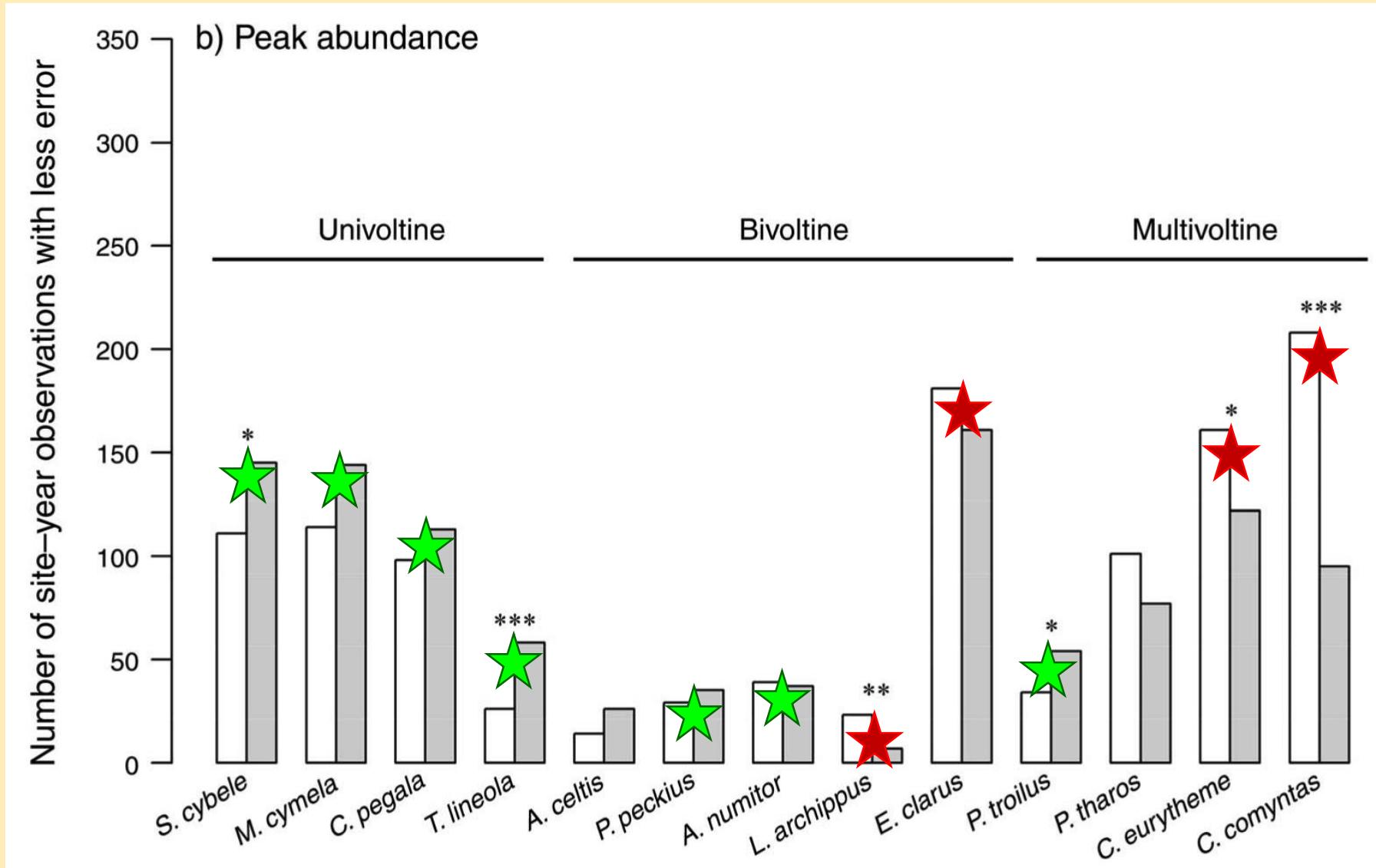


grün ★ узкие олигофаги
rot ★ полифаги

Cayton et al., 2015

Точность предсказания фенологии 13 европейских видов бабочек за 1996–2012 гг.

СУММА ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕМПЕРАТУР

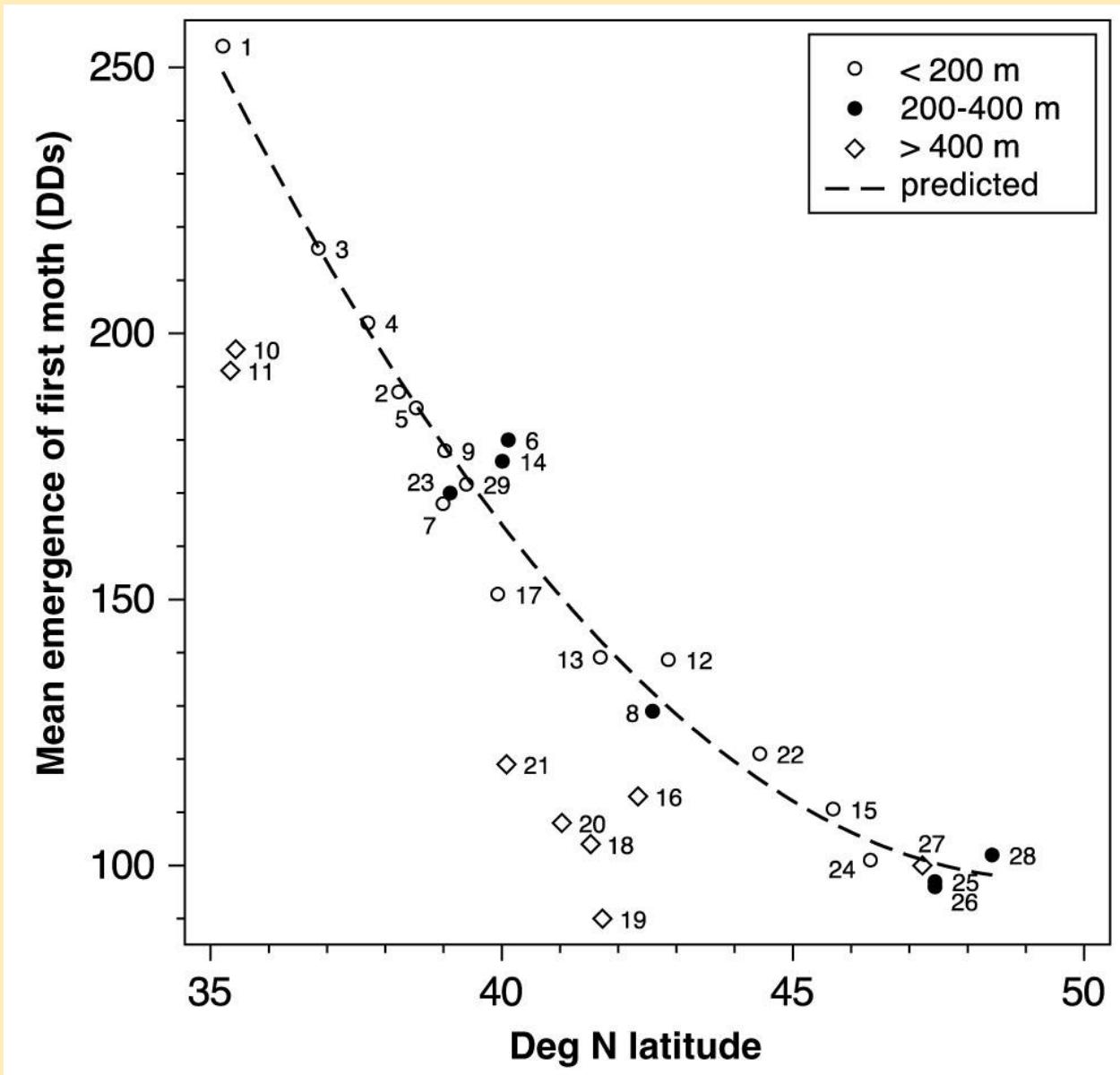


- grün ★ узкие олигофаги
- rot ★★ полифаги

Cayton et al., 2015

Точность предсказания фенологии 13 европейских видов бабочек за 1996–2012 гг.

СУММА ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕМПЕРАТУР

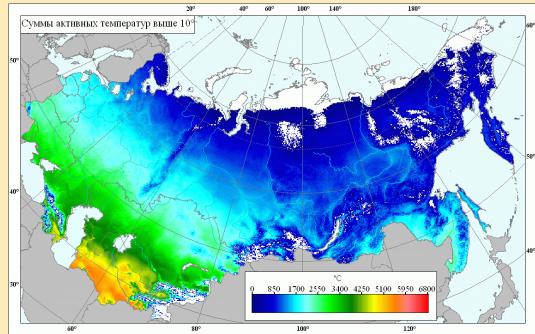


Сумма градусо-дней, необходимая
для вылета первого имаго
яблонной плодожорки
Cydia pomonella
из разных популяций

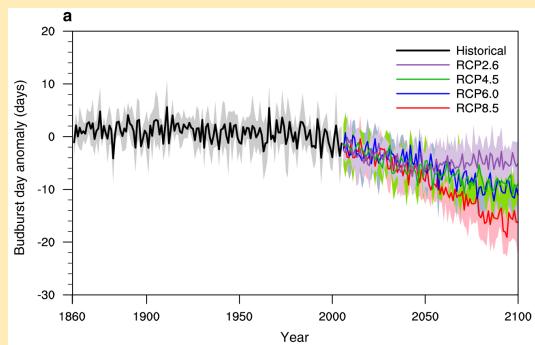
Jones et al., 2013

СУММА ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕМПЕРАТУР

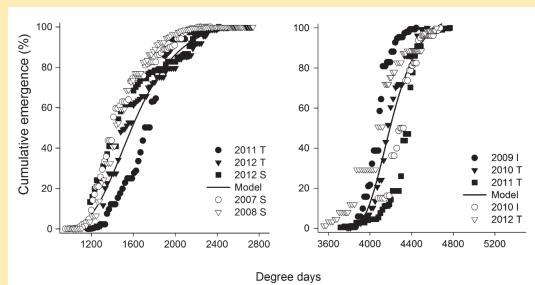
Нижний температурный порог для отсчёта «суммы эффективных температур»:



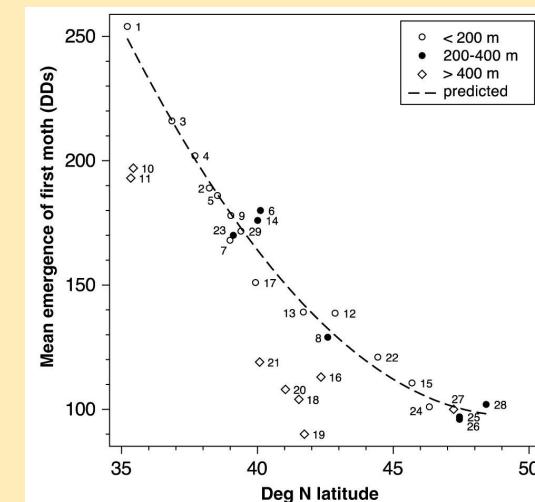
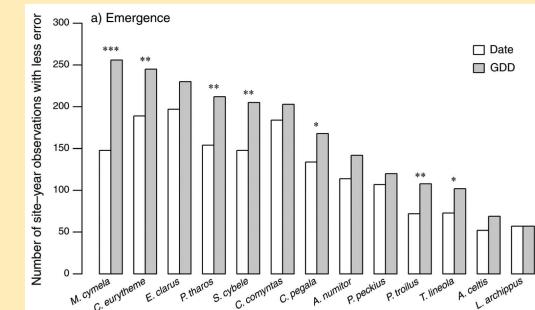
10 °C



5 °C



0 °C

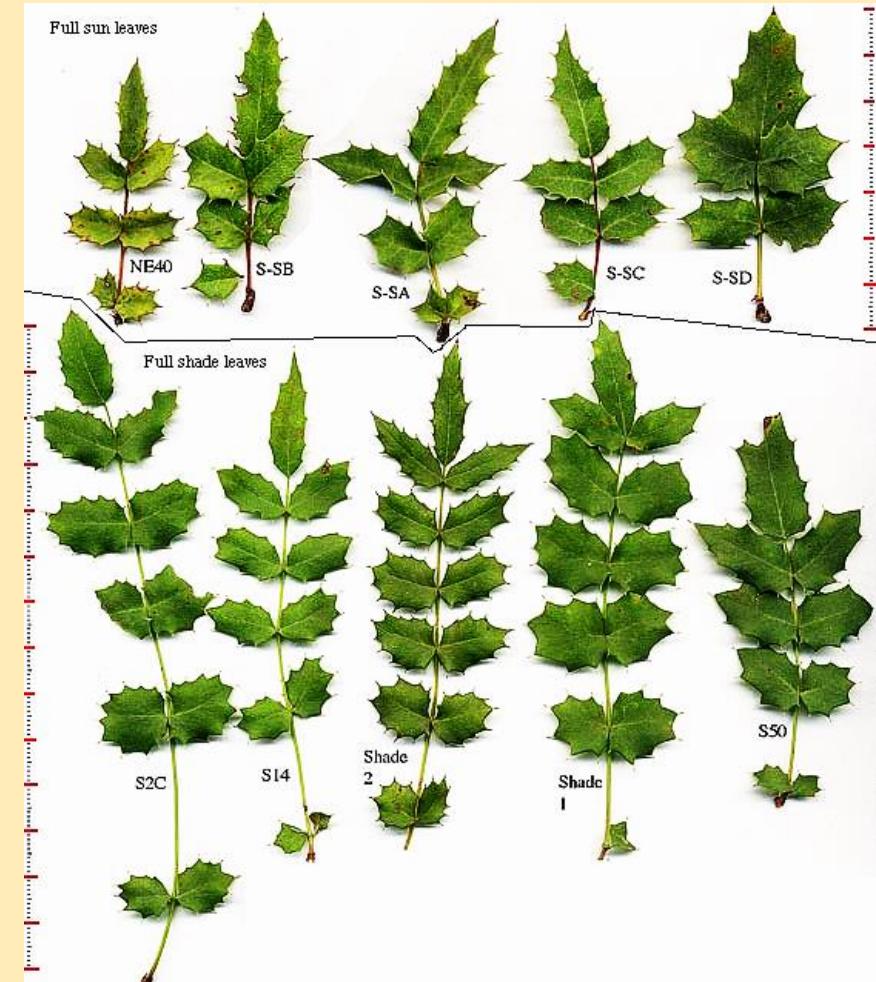


10 °C

10 °C

НОРМА РЕАКЦИИ: ТЕРМИНЫ

Фенотипическая пластиность (=лабильность) – способность организма отвечать на сигналы окружающей среды изменениями своей структуры, состояния, физиологии, поведения.



Листья барбариса *Berberis swaseyi*,
<http://w3.biosci.utexas.edu>

НОРМА РЕАКЦИИ: ТЕРМИНЫ

Фенотипическая пластиность (=лабильность) – способность организма отвечать на сигналы окружающей среды изменениями своей структуры, состояния, физиологии, поведения.



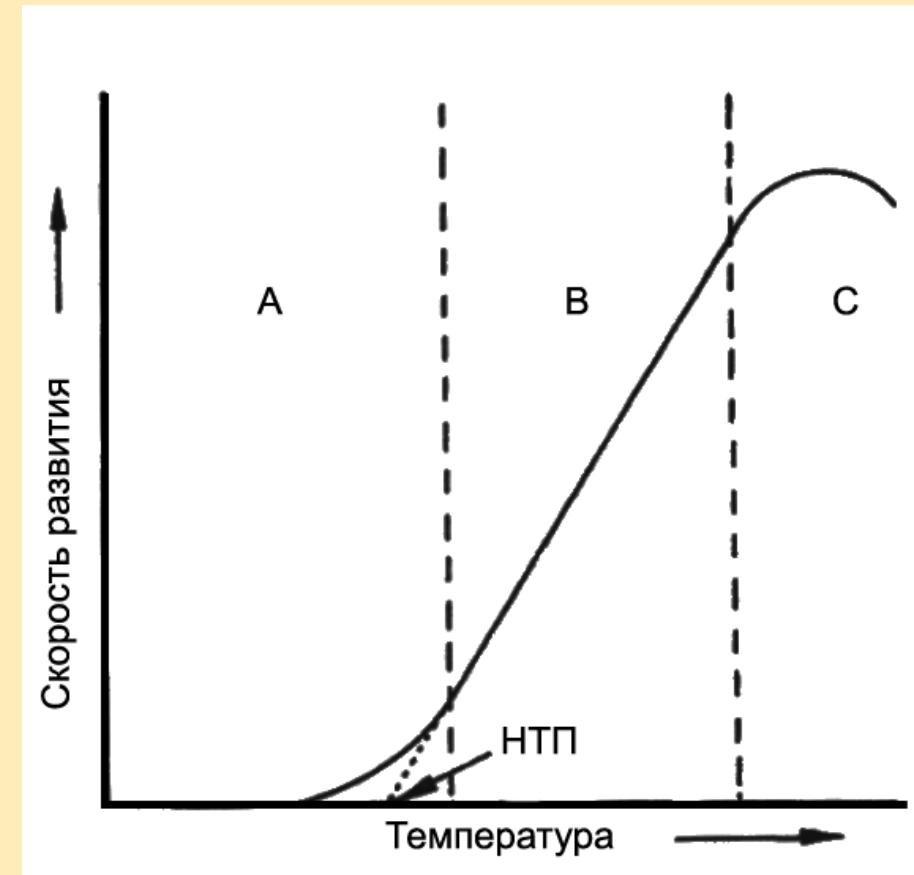
Гусеницы *Biston betularia*,
Eacock et al., 2017

НОРМА РЕАКЦИИ: ТЕРМИНЫ

Фенотипическая пластиность (=лабильность) – способность организма отвечать на сигналы окружающей среды изменениями своей структуры, состояния, физиологии, поведения.

Пластиность признака организма в ответ на изменение температуры мы будем называть **термолабильностью (temperature sensitivity)**.

Норма реакции – заданные генотипом (G) **характер и пределы пластиности** признака в ответ на изменения факторов среды (E).



Campbell et al., 1974

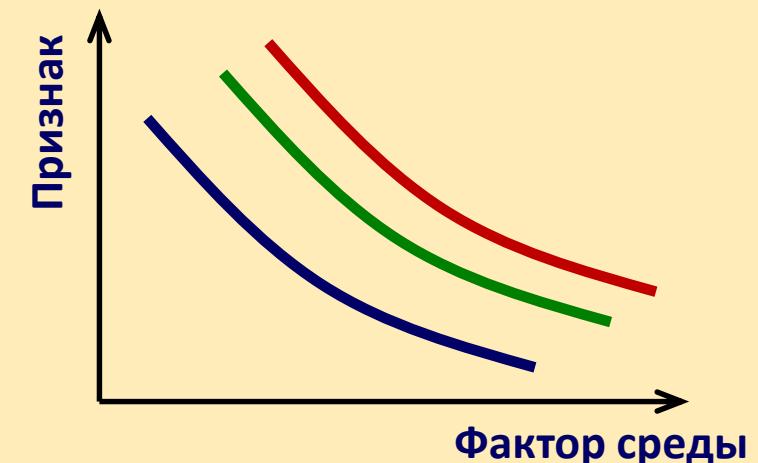
НОРМА РЕАКЦИИ: ТЕРМИНЫ

Фенотипическая plasticность (=лабильность) – способность организма отвечать на сигналы окружающей среды изменениями своей структуры, состояния, физиологии, поведения.

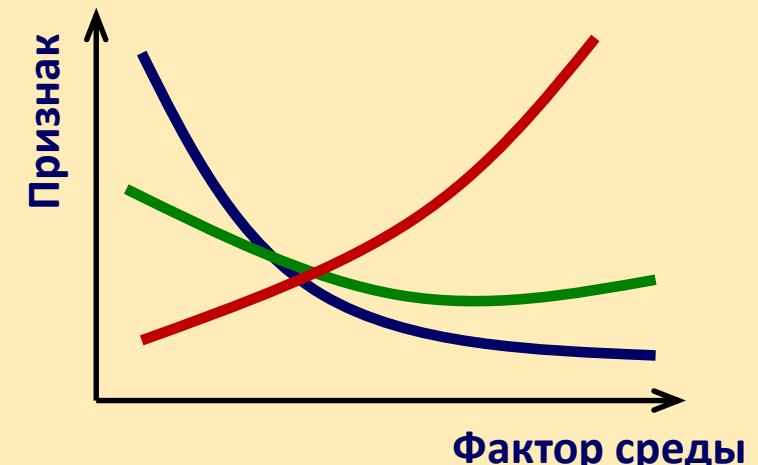
Пластичность признака организма в ответ на изменение температуры мы будем называть **термолабильностью** (*temperature sensitivity*).

Норма реакции – заданные генотипом (*G*) **характер и пределы** пластичности признака в ответ на изменения факторов среды (*E*).

Средовая (=модификационная) изменчивость – различия в пределах особи или между особями, вызванные действием экологических факторов.

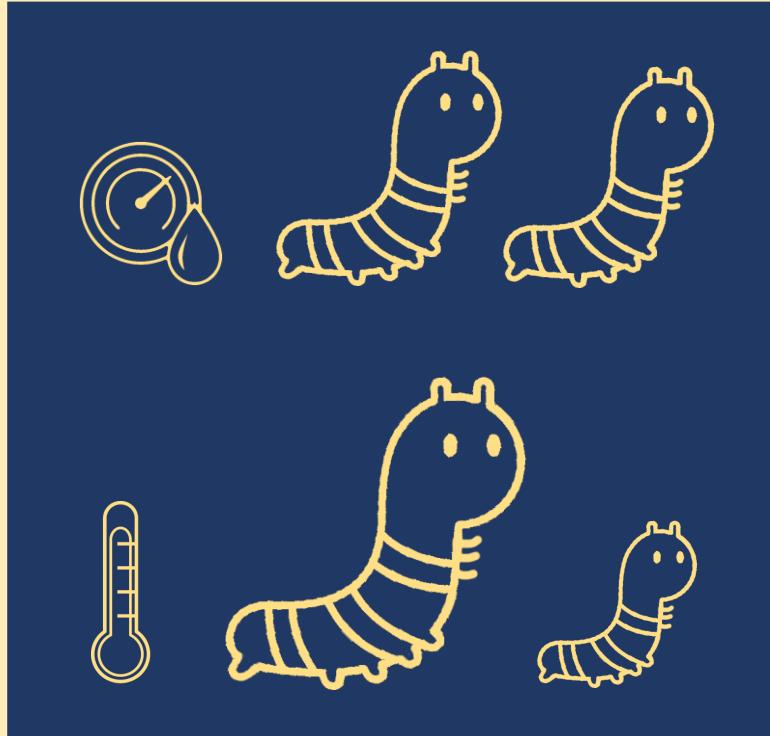


▲ Отсутствие взаимодействия

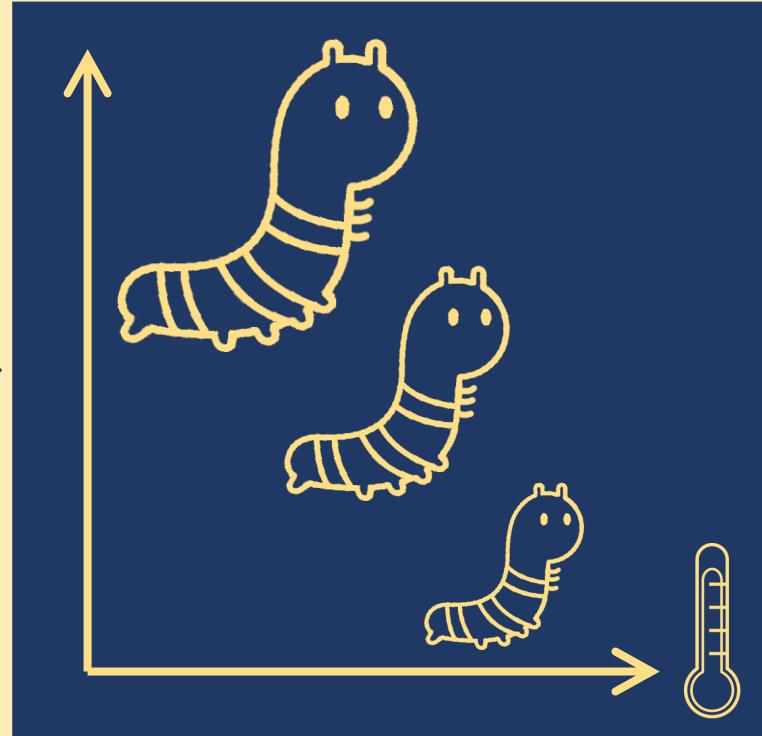


▲ Сильное взаимодействие $G \times E$

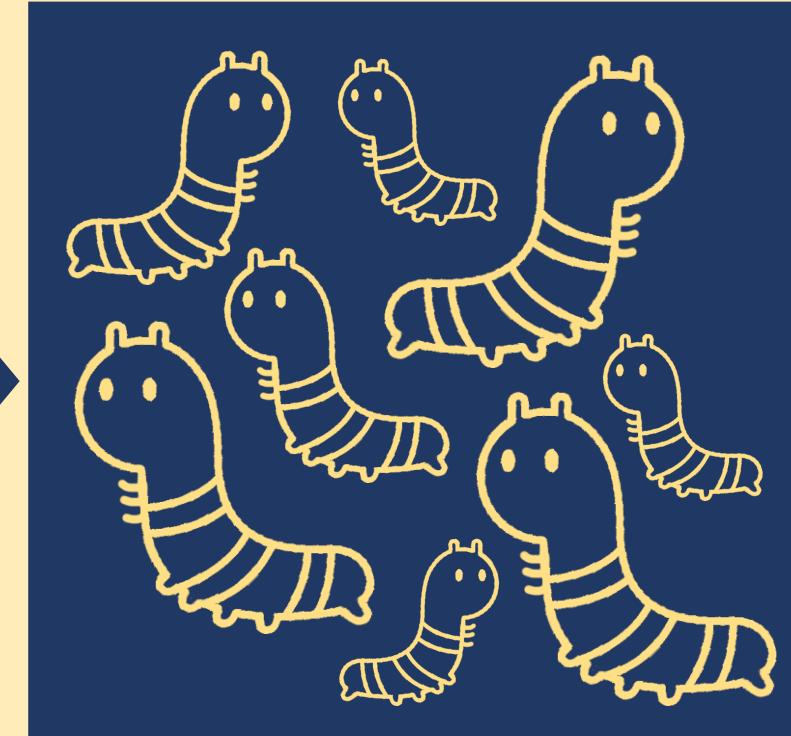
НОРМА РЕАКЦИИ: ТЕРМИНЫ



Пластиность



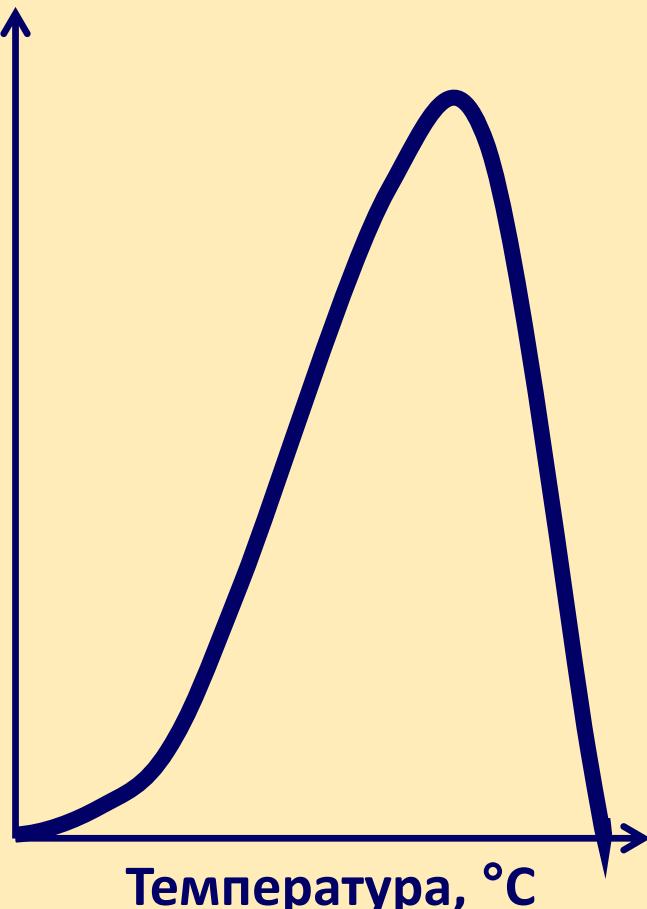
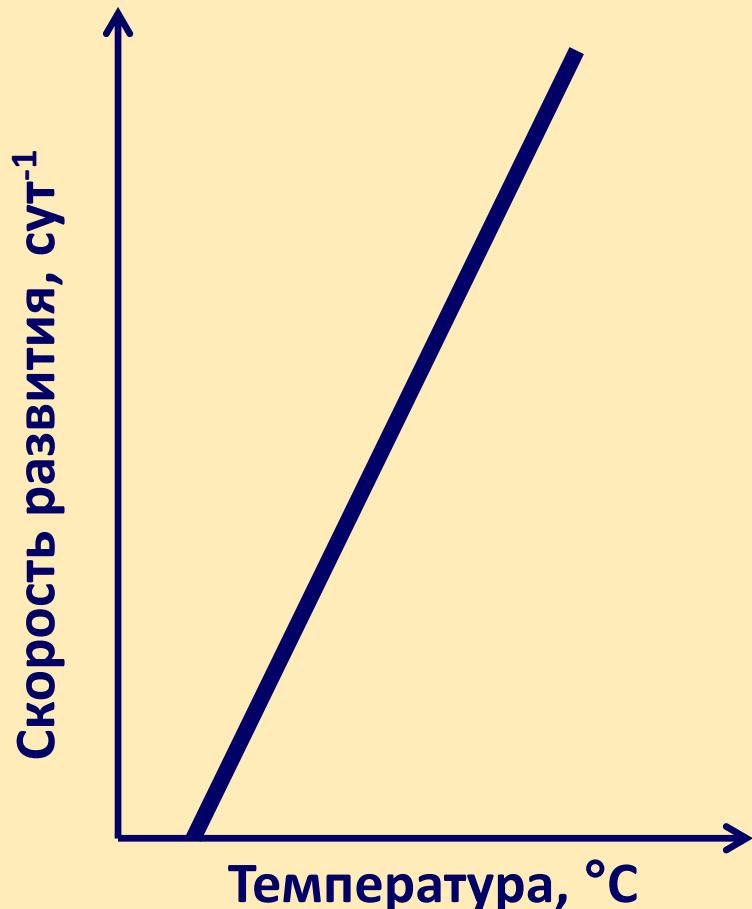
Норма реакции



Изменчивость

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НОРМЫ РАЗВИТИЯ

Линейная модель и нелинейные модели



$$\frac{1}{D} = b \times \text{temp} + a$$

$$\frac{1}{D} = \psi \times \left[e^{\rho \times \text{temp}} - e^{\left(p \times t_{\max} - \frac{t_{\max} - \text{temp}}{\Delta} \right)} \right]$$

$$\frac{1}{D} = \text{temp} \times \frac{e^{\left(\phi \frac{\Delta H_A^\#}{R \times \text{temp}} \right)}}{1 + e^{\left(\frac{\Delta S_L}{R} - \frac{\Delta H_L}{R \times \text{temp}} \right)} + e^{\left(\frac{\Delta S_H}{R} - \frac{\Delta H_H}{R \times \text{temp}} \right)}}$$

$$\frac{1}{D} = a \times (\text{temp} - t_{\min})^n \times (t_{\max} - \text{temp})^m$$

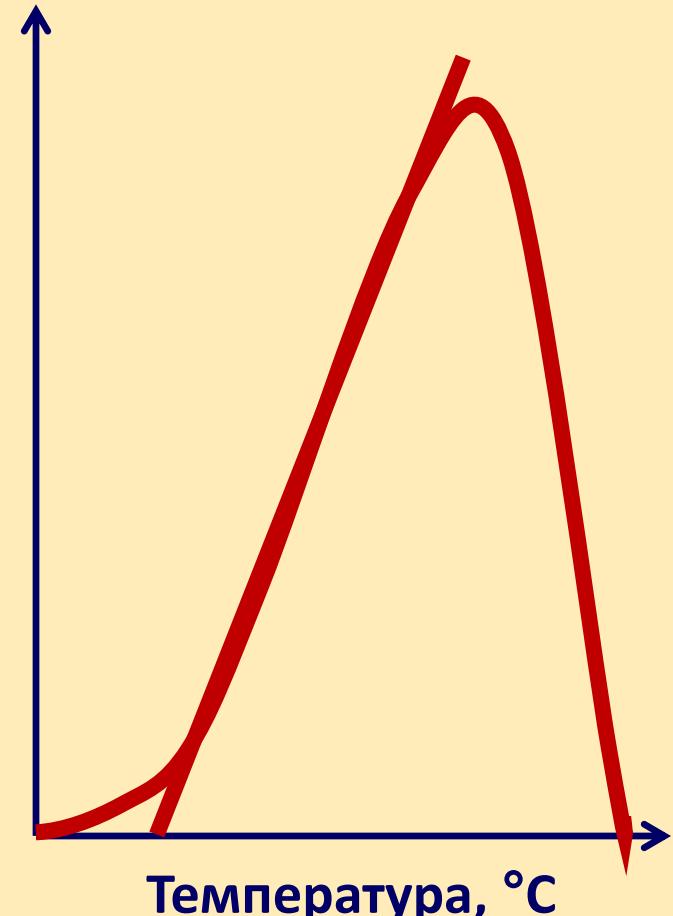
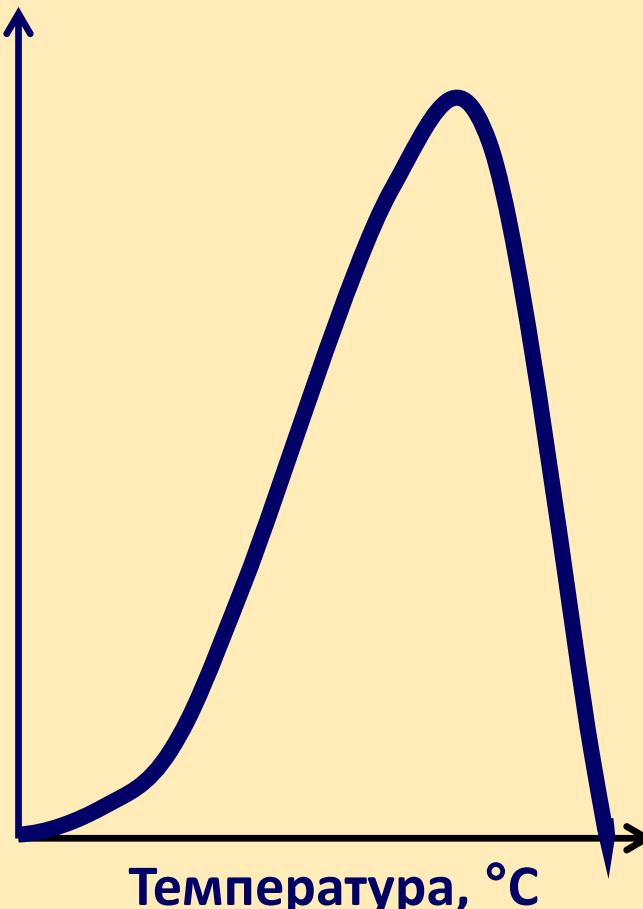
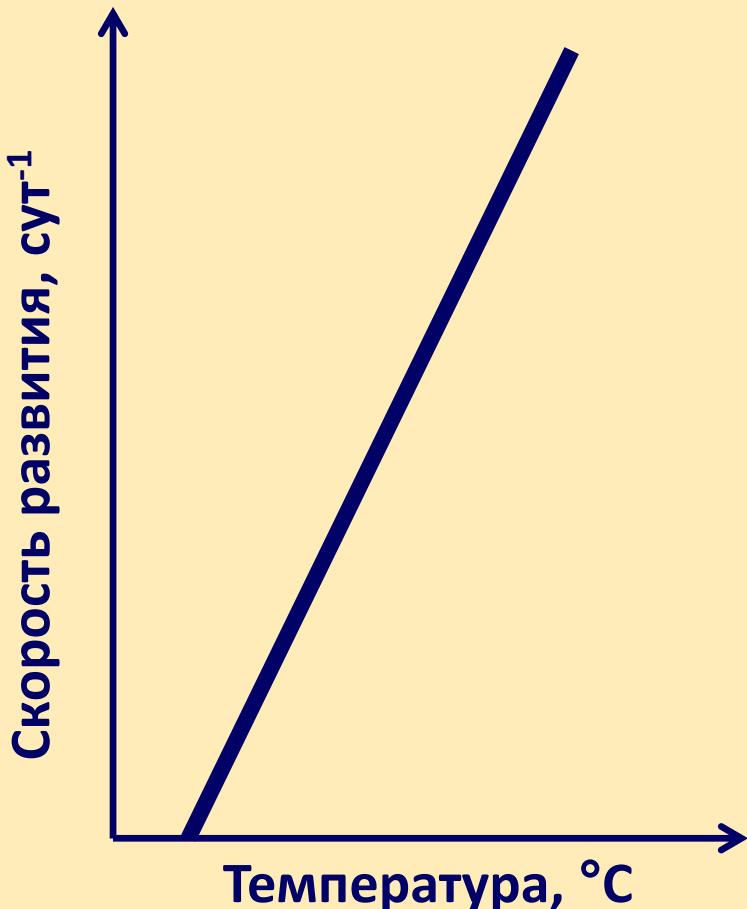
$$\frac{1}{D} = e^{\rho \times \text{temp}} - e^{\left(\rho \times t_m - \frac{t_m - \text{temp}}{\Delta} \right)} + \lambda$$

$$\frac{1}{D} = \alpha \times \left[\frac{1}{1 + k \times e^{-\rho \times \text{temp}}} e^{\left(\frac{t_{\max} - \text{temp}}{\Delta} \right)} \right]$$

$$\frac{1}{D} = a \times \text{temp} \times (\text{temp} - t_{\min}) \times \sqrt{t_{\max} - \text{temp}}$$

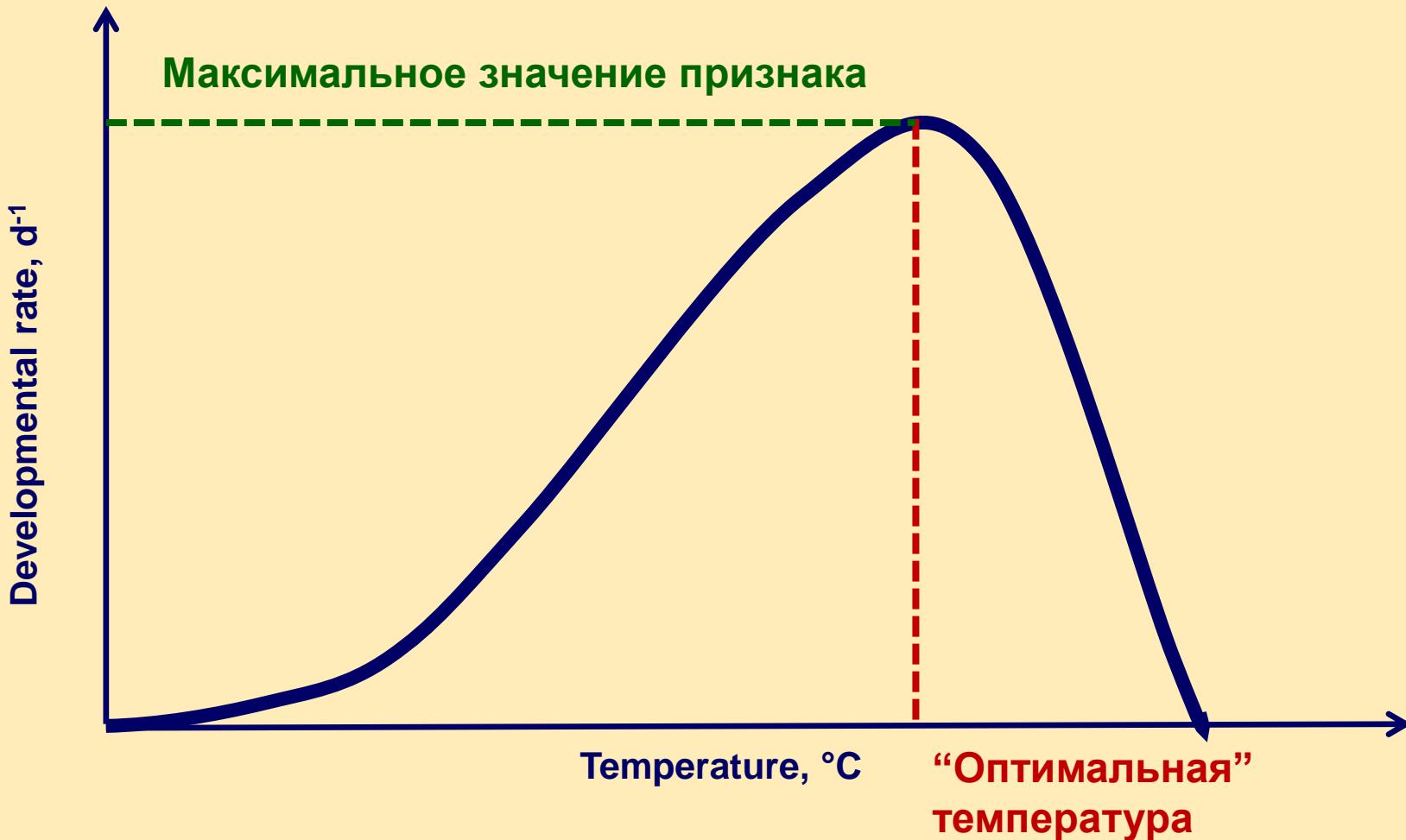
ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НОРМЫ РАЗВИТИЯ

Линейная модель и нелинейные модели



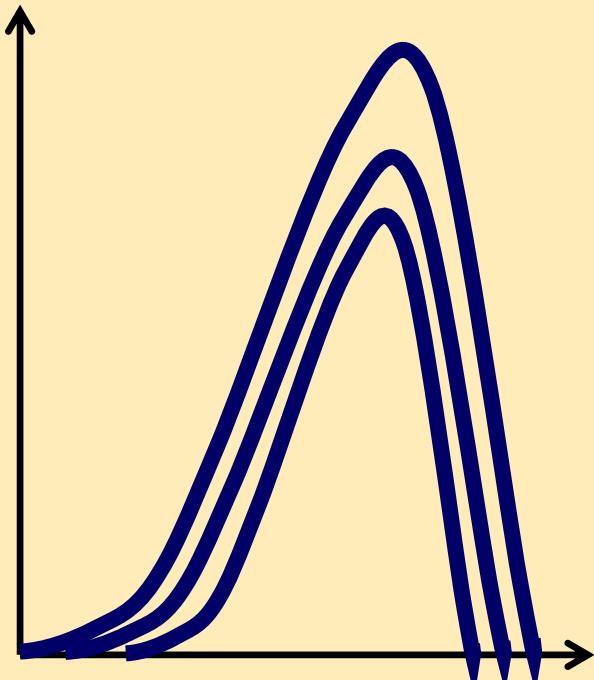
ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НОРМЫ РАЗВИТИЯ

Главные параметры нелинейной модели:

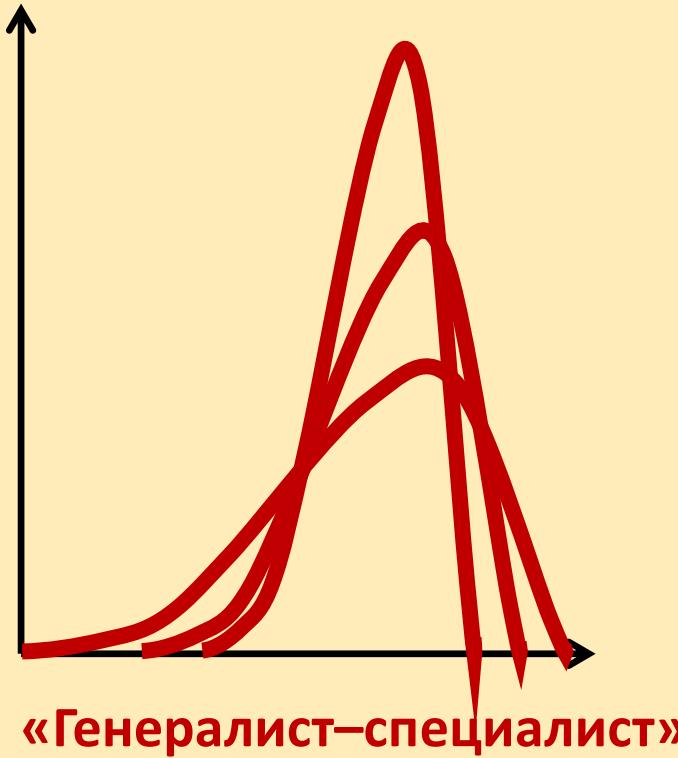


ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НОРМЫ РАЗВИТИЯ

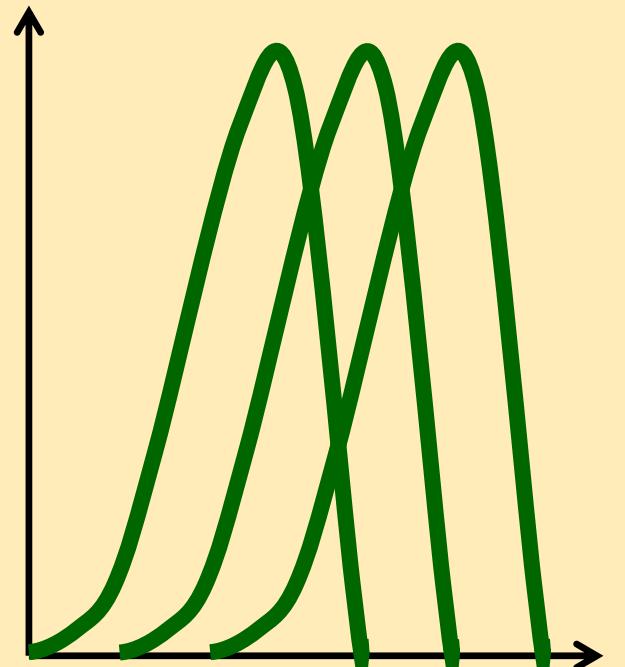
Типы изменчивости нелинейных норм реакции



Вертикальный сдвиг
«быстрее–медленнее»)



«Генералист–специалист»

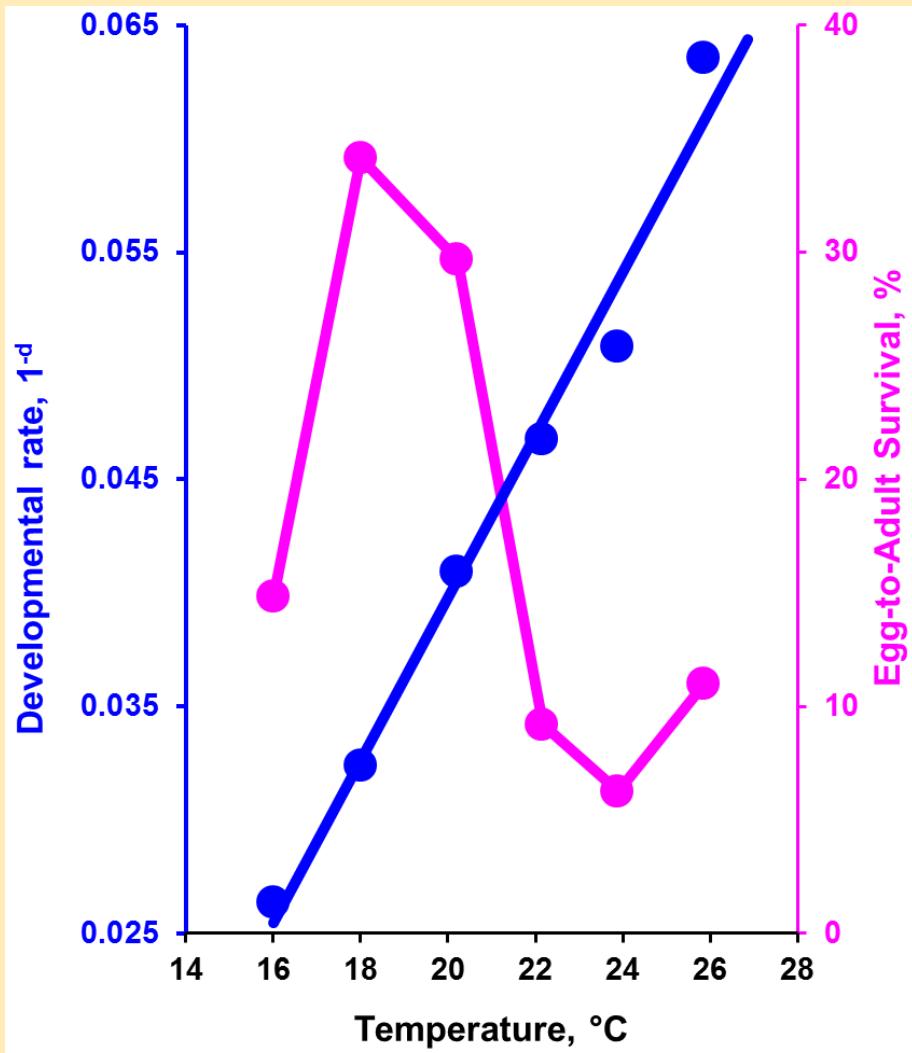


Горизонтальный сдвиг
«теплее–холоднее»)

По Izem & Kingsolver 2005, Knies et al. 2006, Dell et al. 2014

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НОРМЫ РАЗВИТИЯ

Термолабильность развития и выживаемость у листоедов

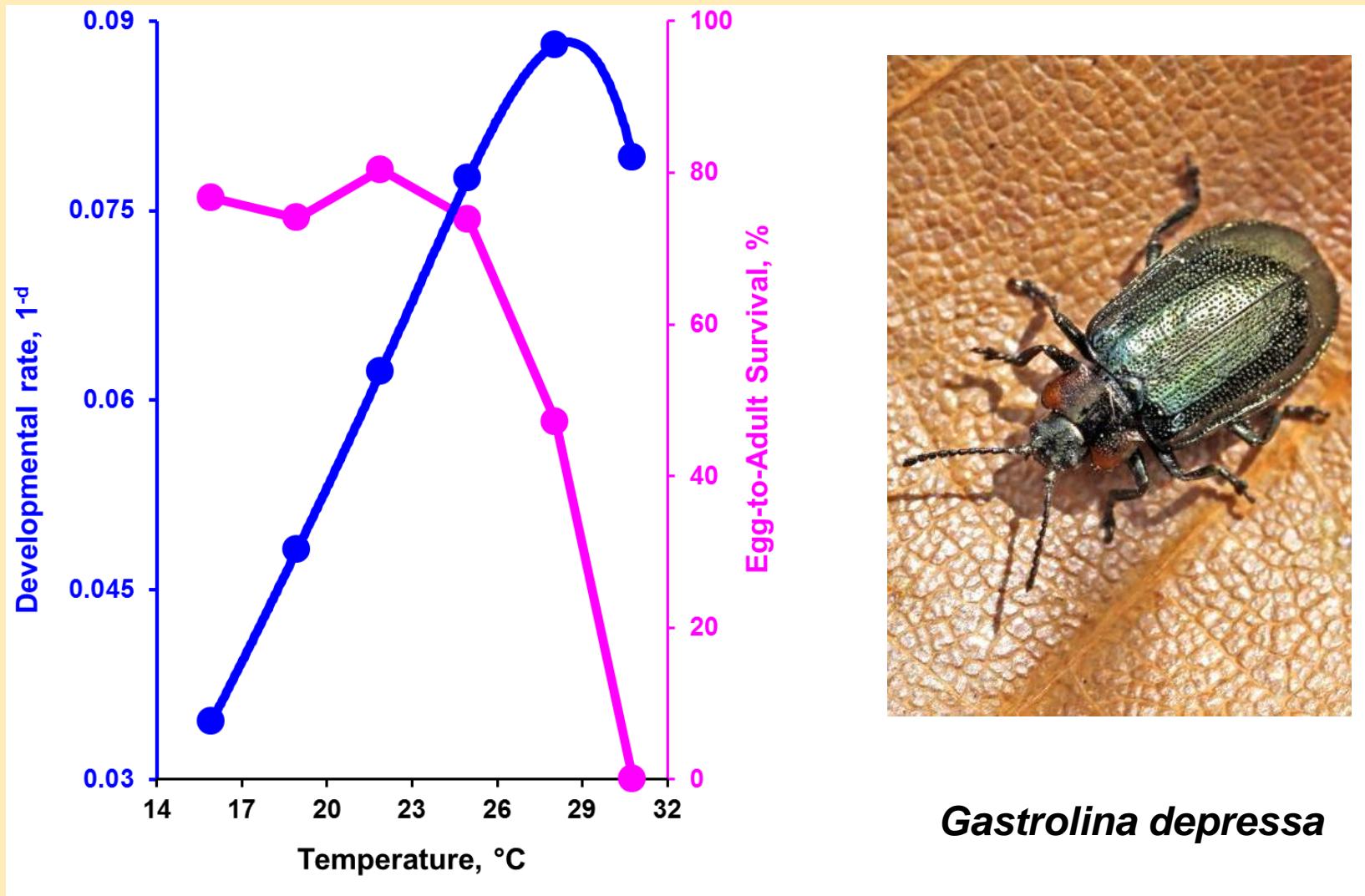


Chrysomela vigintipunctata

Kutcherov, 2015

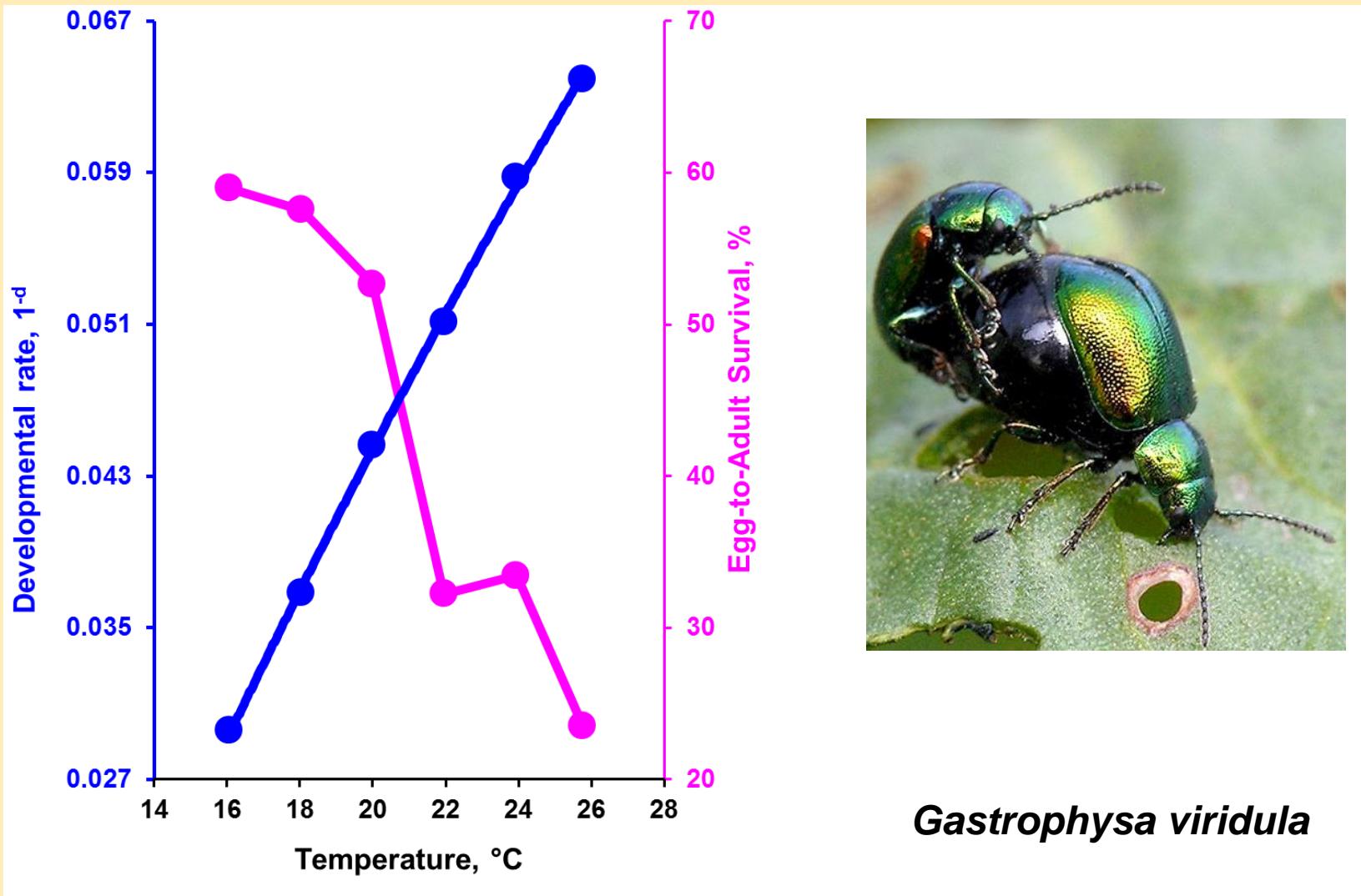
ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НОРМЫ РАЗВИТИЯ

Термолабильность развития и выживаемость у листоедов



ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НОРМЫ РАЗВИТИЯ

Термолабильность развития и выживаемость у листоедов



Кучеров и
Кипятков, 2011

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НОРМЫ РАЗВИТИЯ

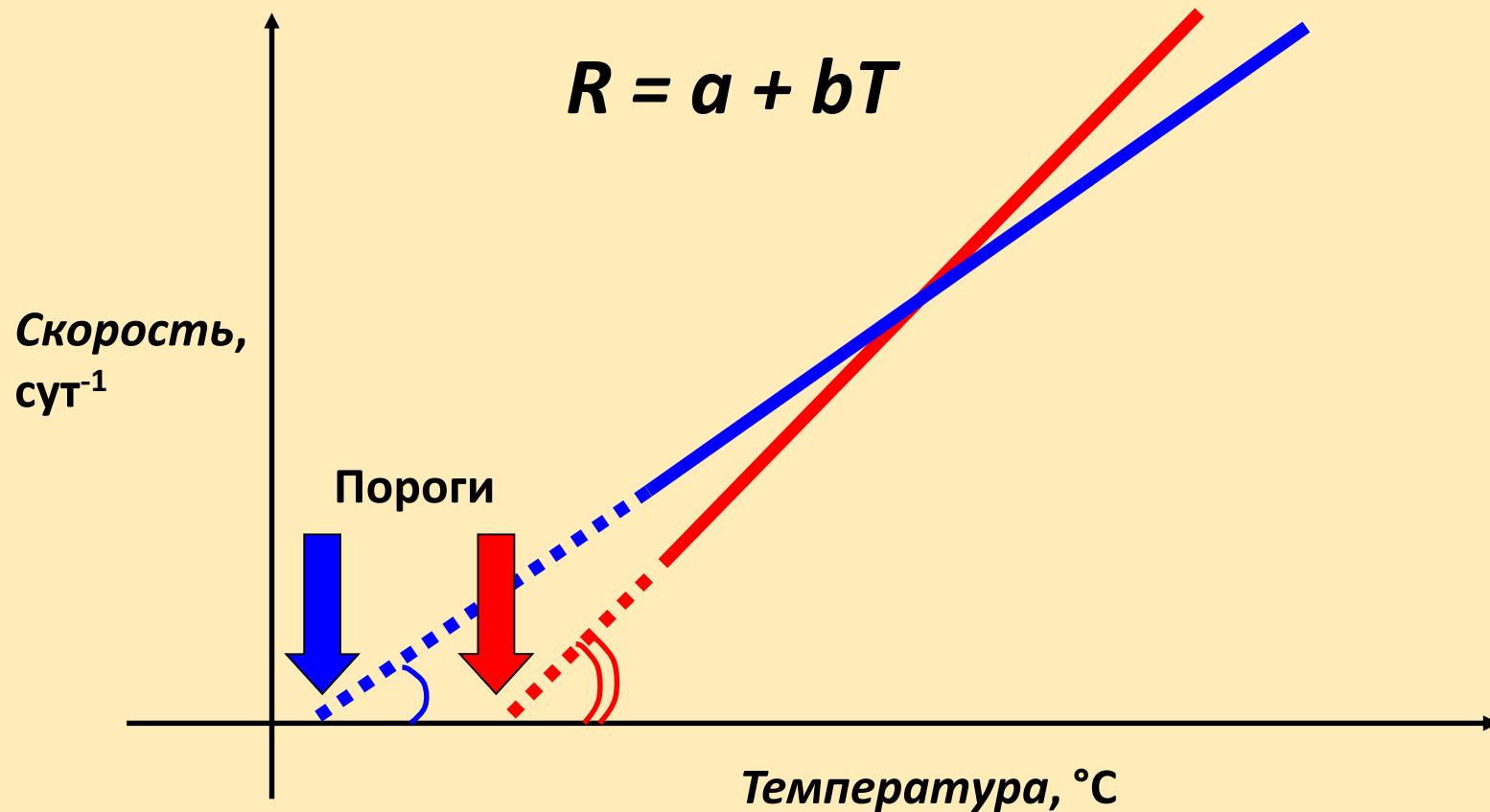
Преимущества линейной модели:

- Учитываются температуры, оптимальные для целого организма.
- Эксперименты менее трудоёмки и занимают меньше времени.
- Параметры линейной регрессии легко вычислять и сравнивать.



ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НОРМЫ РАЗВИТИЯ

Линейная модель зависимости скорости развития от температуры



ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НОРМЫ РАЗВИТИЯ

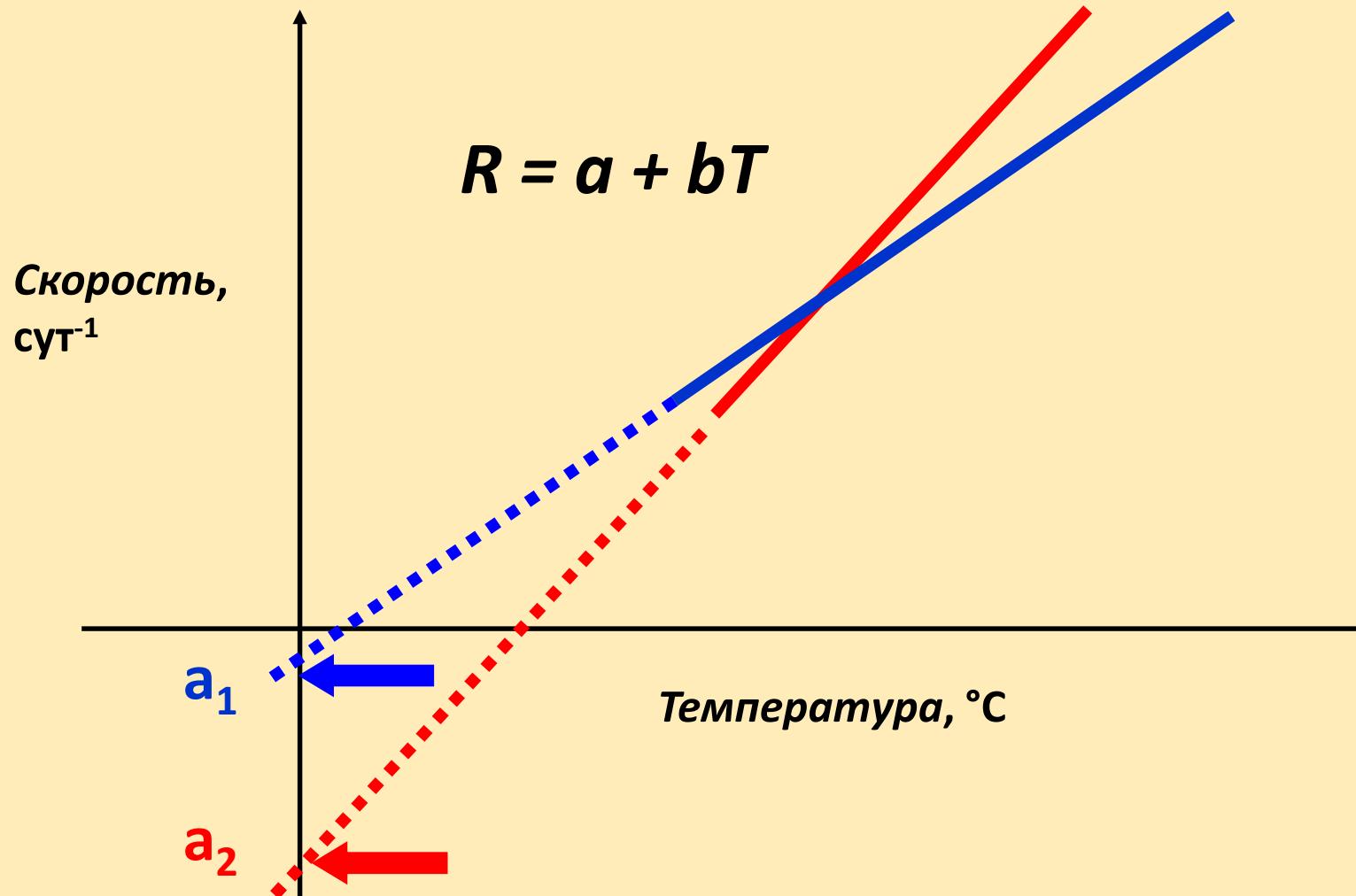
Линейная модель зависимости скорости развития от температуры

$$R = a + bT$$

a – константа (ордината точки пересечения линии регрессии с осью ординат)

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НОРМЫ РАЗВИТИЯ

Линейная модель зависимости скорости развития от температуры



ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НОРМЫ РАЗВИТИЯ

Линейная модель зависимости скорости развития от температуры

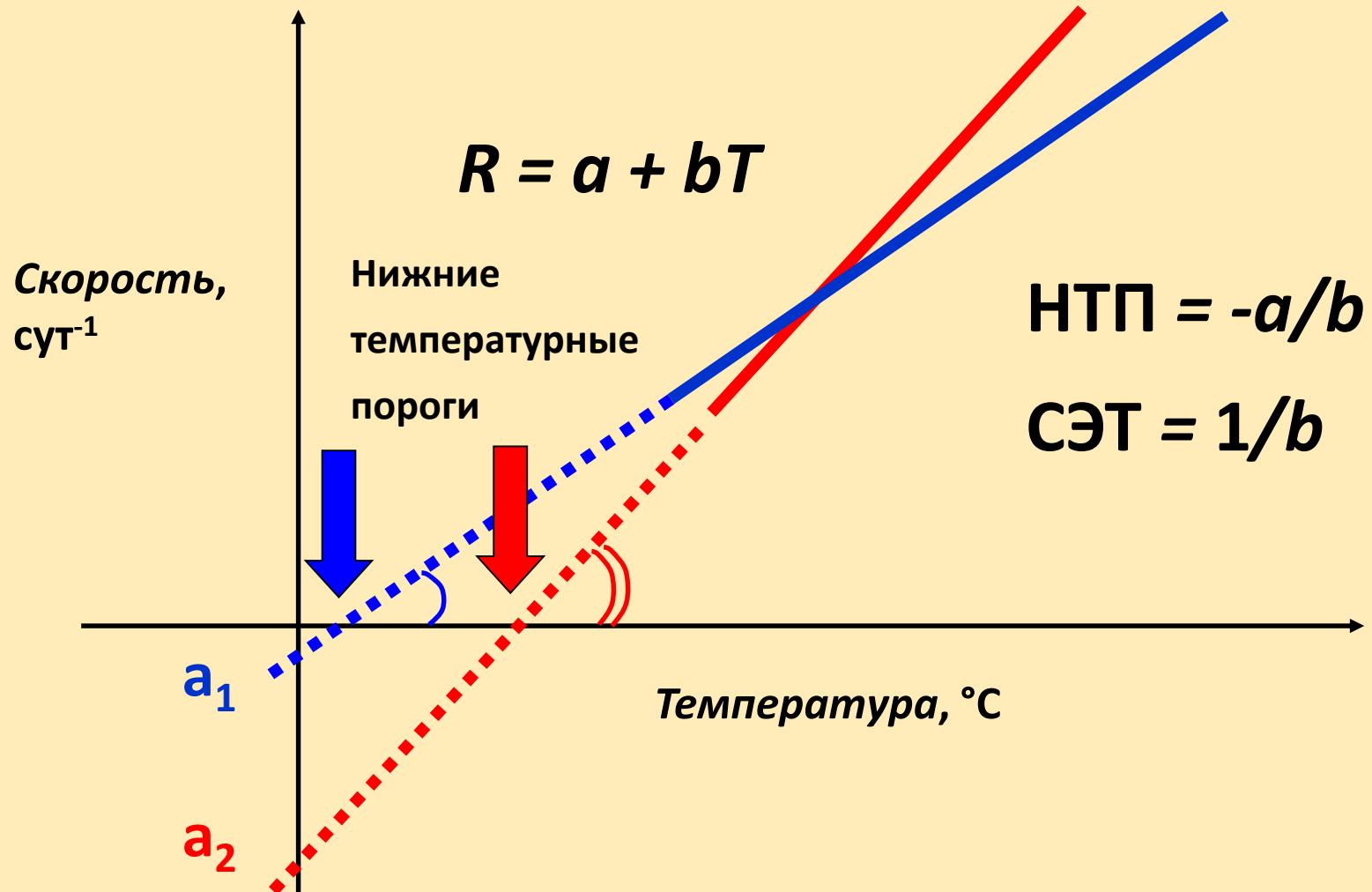
$$R = a + bT$$

a – константа (ордината точки пересечения линии регрессии с осью ординат)

b – коэффициент регрессии (тангенс угла между линией регрессии и осью абсцисс)

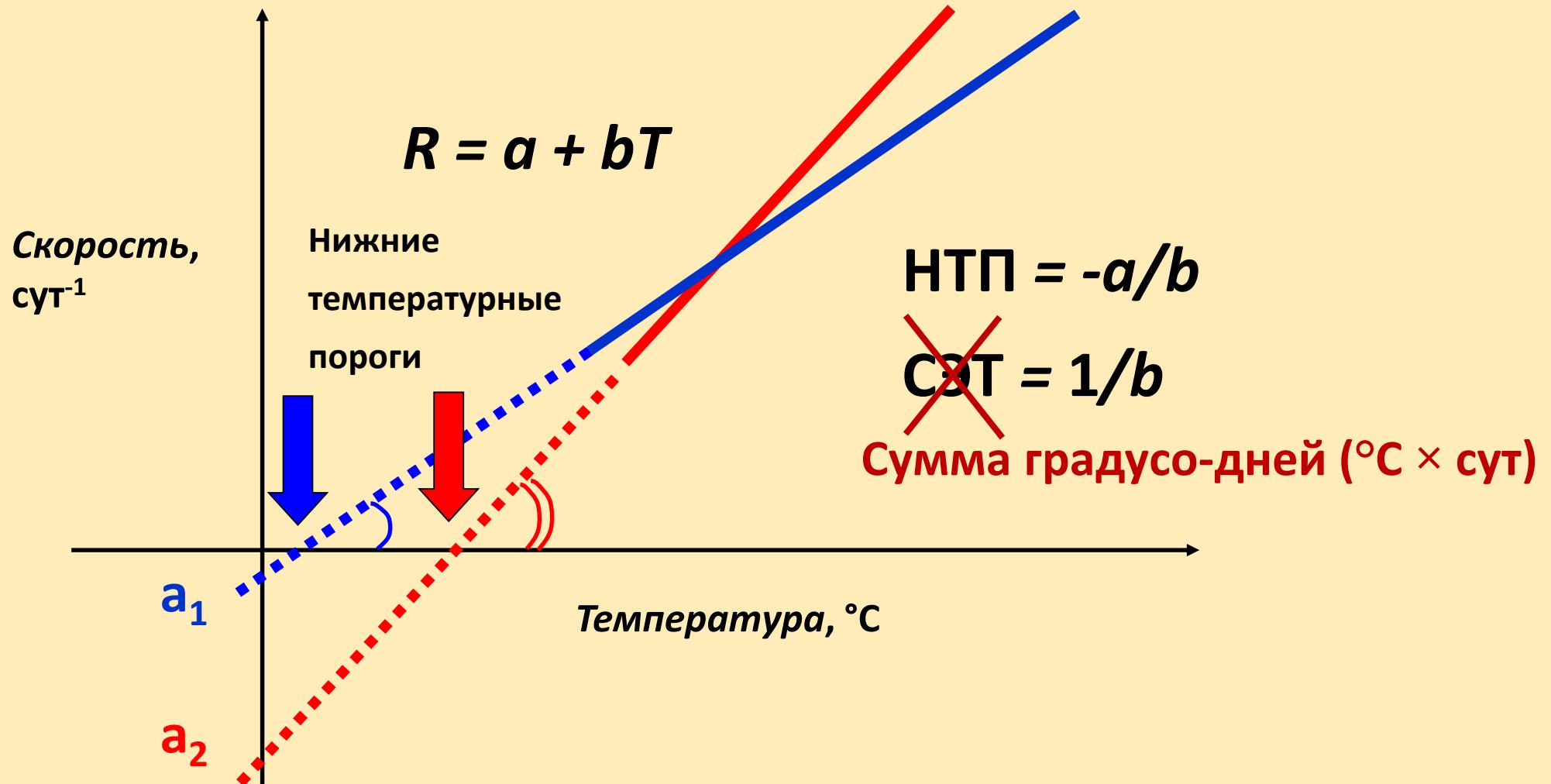
ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НОРМЫ РАЗВИТИЯ

Линейная модель зависимости скорости развития от температуры



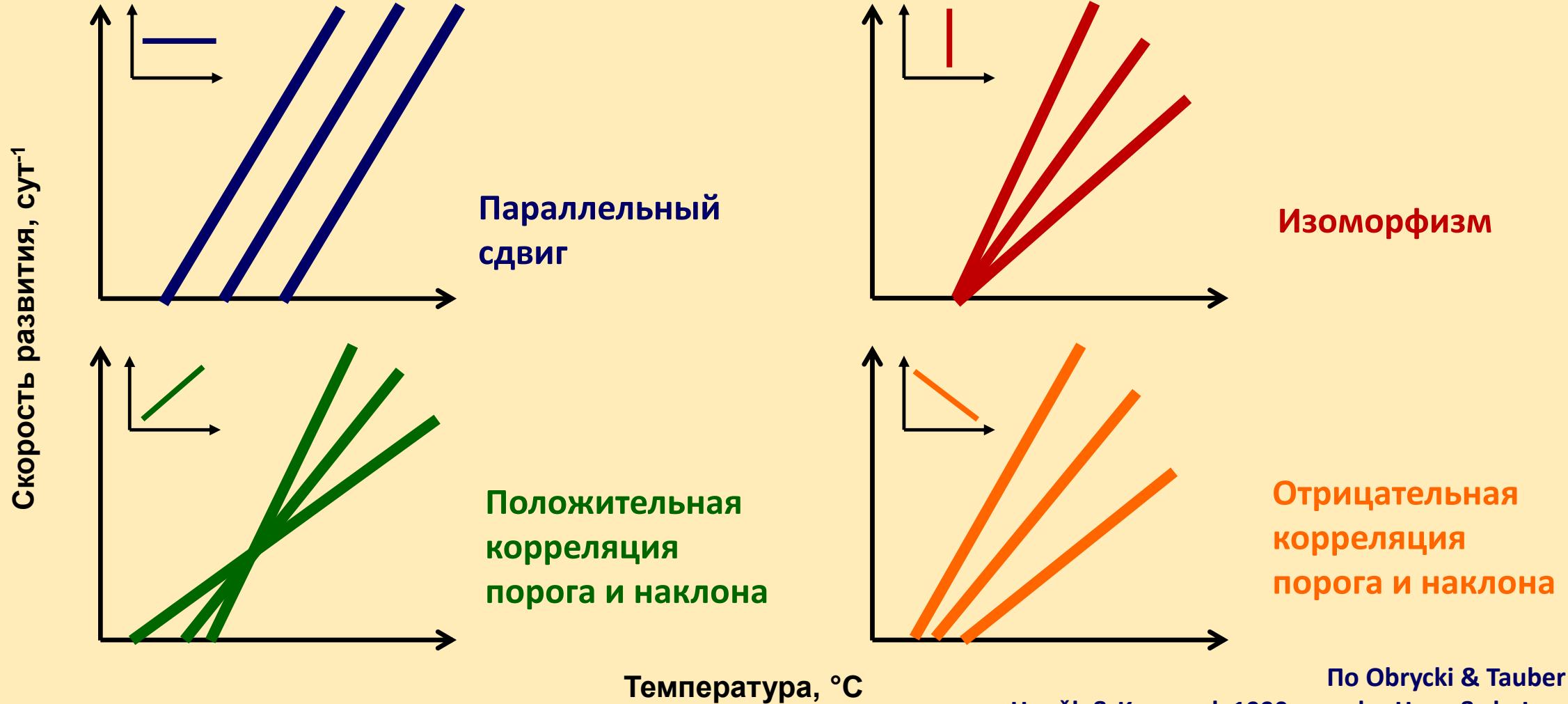
ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НОРМЫ РАЗВИТИЯ

Линейная модель зависимости скорости развития от температуры



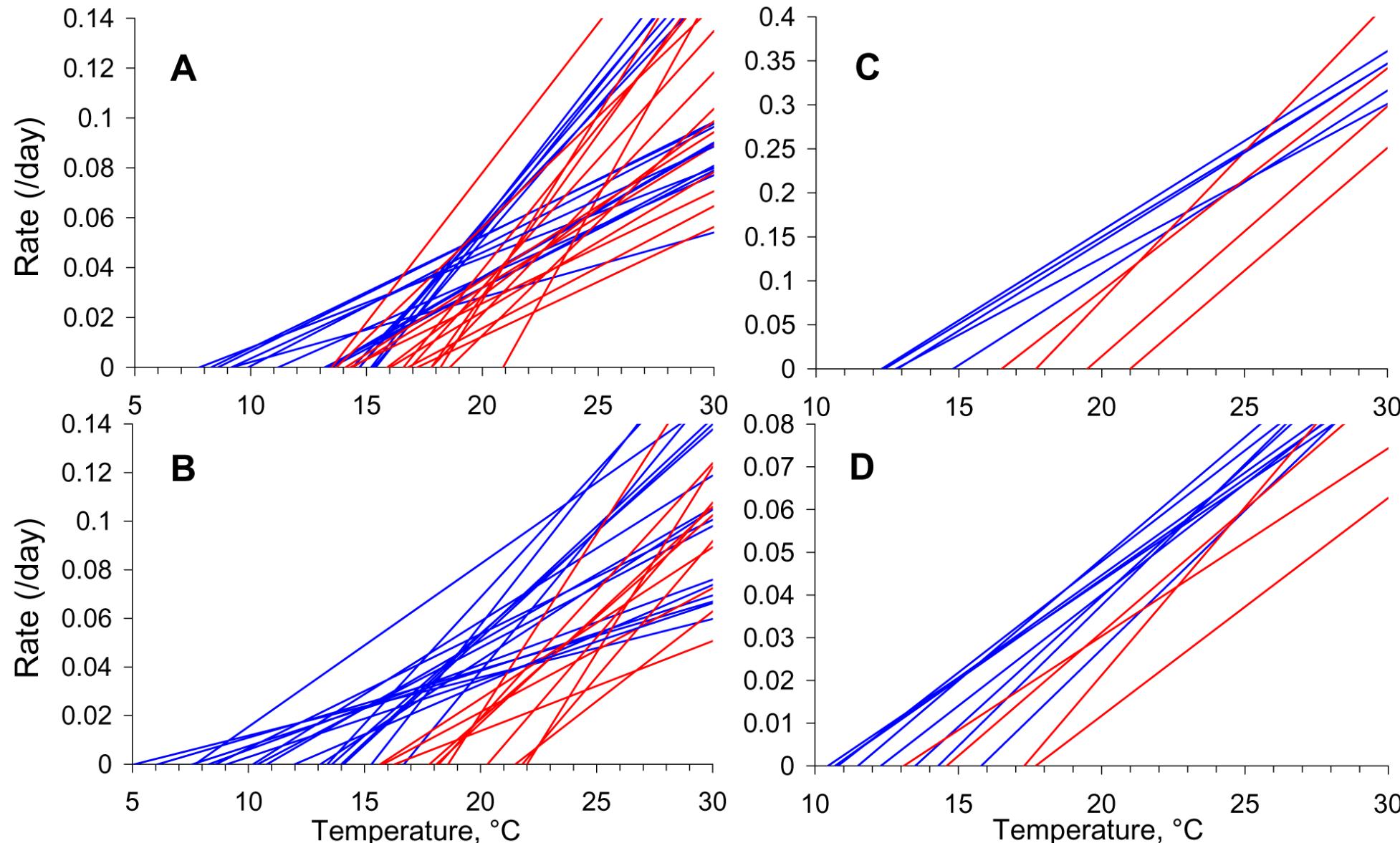
ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НОРМЫ РАЗВИТИЯ

Типы изменчивости линейных норм реакции



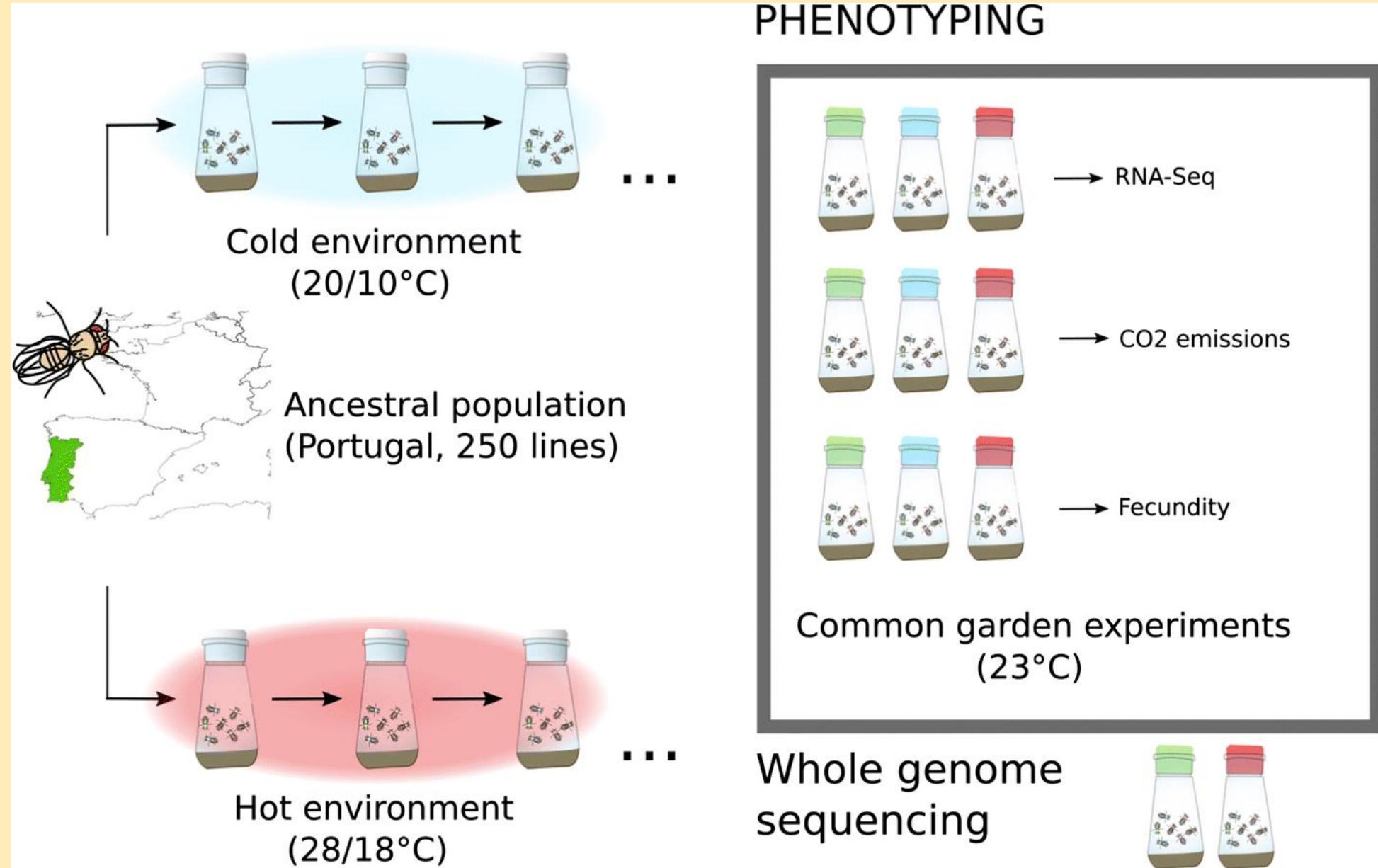
По Obrycki & Tauber 1982,
Honěk & Kocourek 1990, van der Have & de Jong 2008

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НОРМЫ РАЗВИТИЯ



Температурные
нормы развития
северных и
южных видов
муравьёв:
А – яйца,
Б – личинки,
С – предкуколки,
Д – куколки.
(Kipyatkov &
Lopatina, 2015)

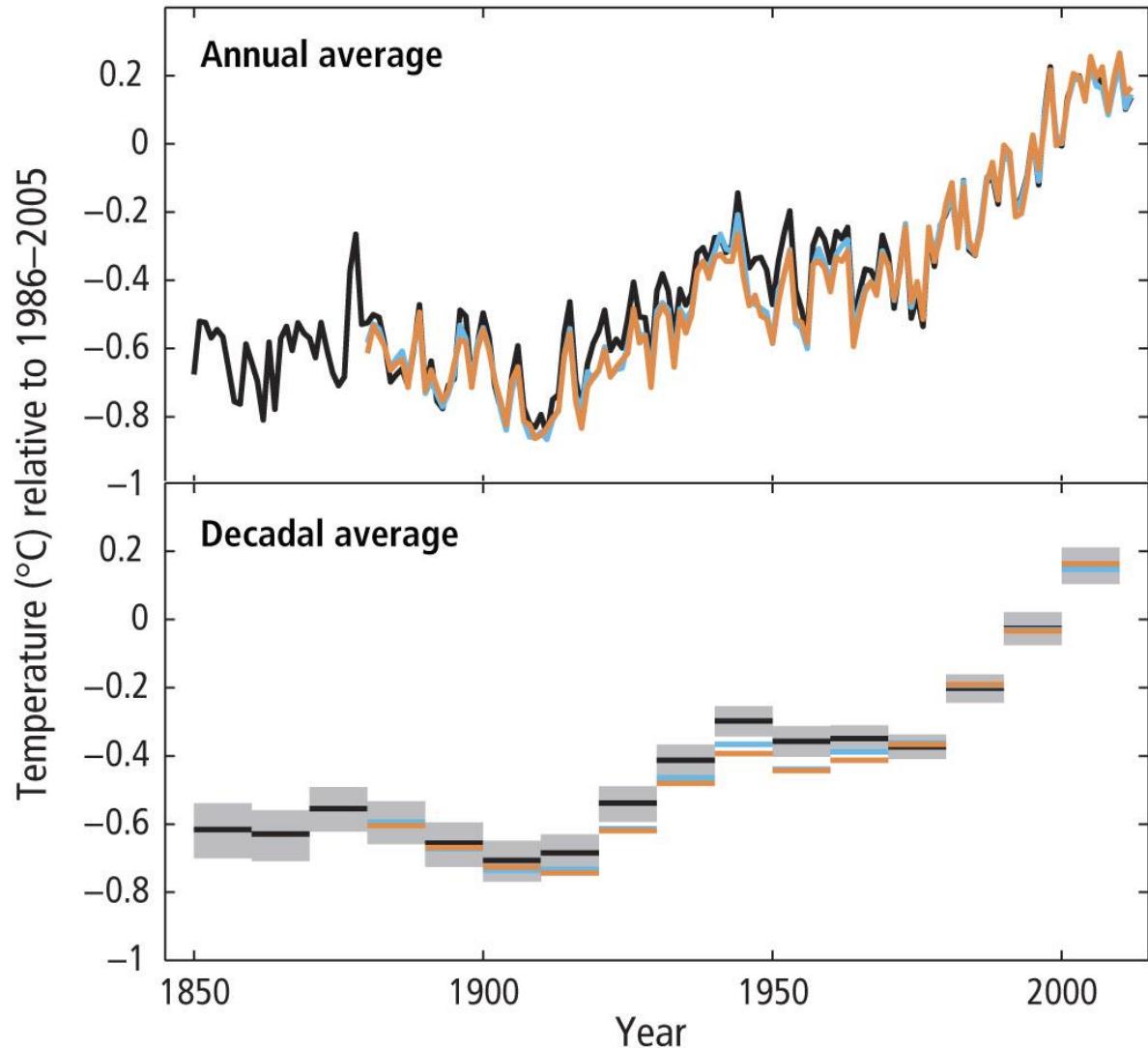
ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ



ПОСЛЕДСТВИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

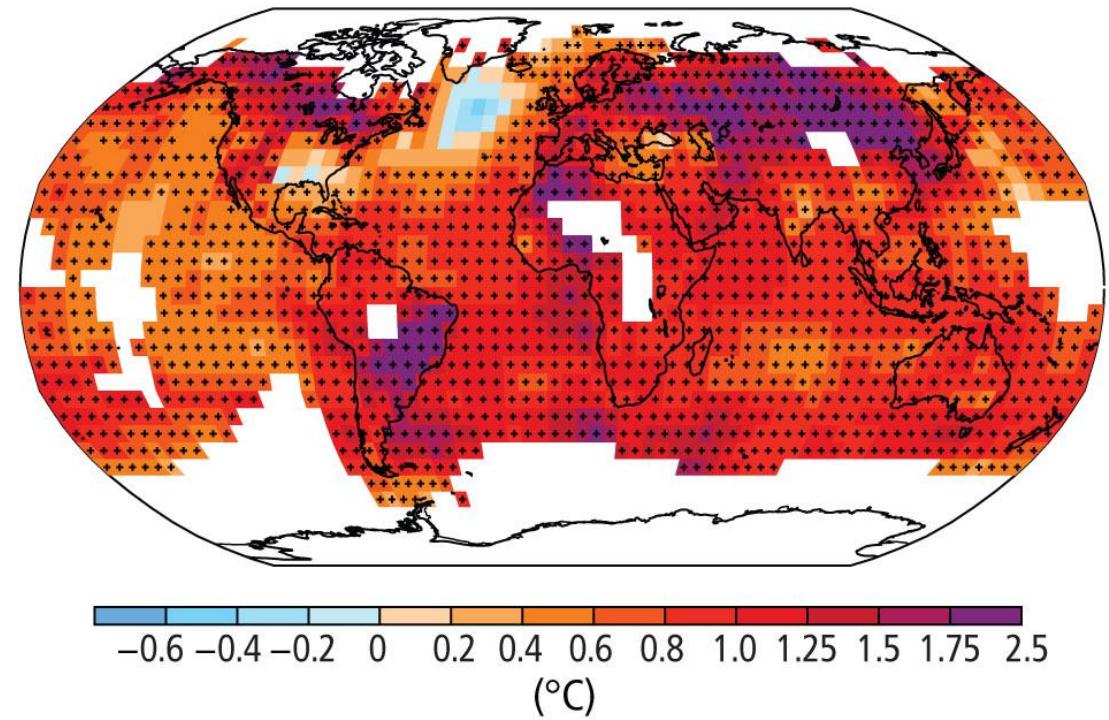
(a)

Observed globally averaged combined land and ocean surface temperature anomaly 1850–2012



(b)

Observed change in surface temperature 1901–2012



ПОСЛЕДСТВИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

NATURE CLIMATE CHANGE DOI: 10.1038/NCLIMATE2617

LETTERS

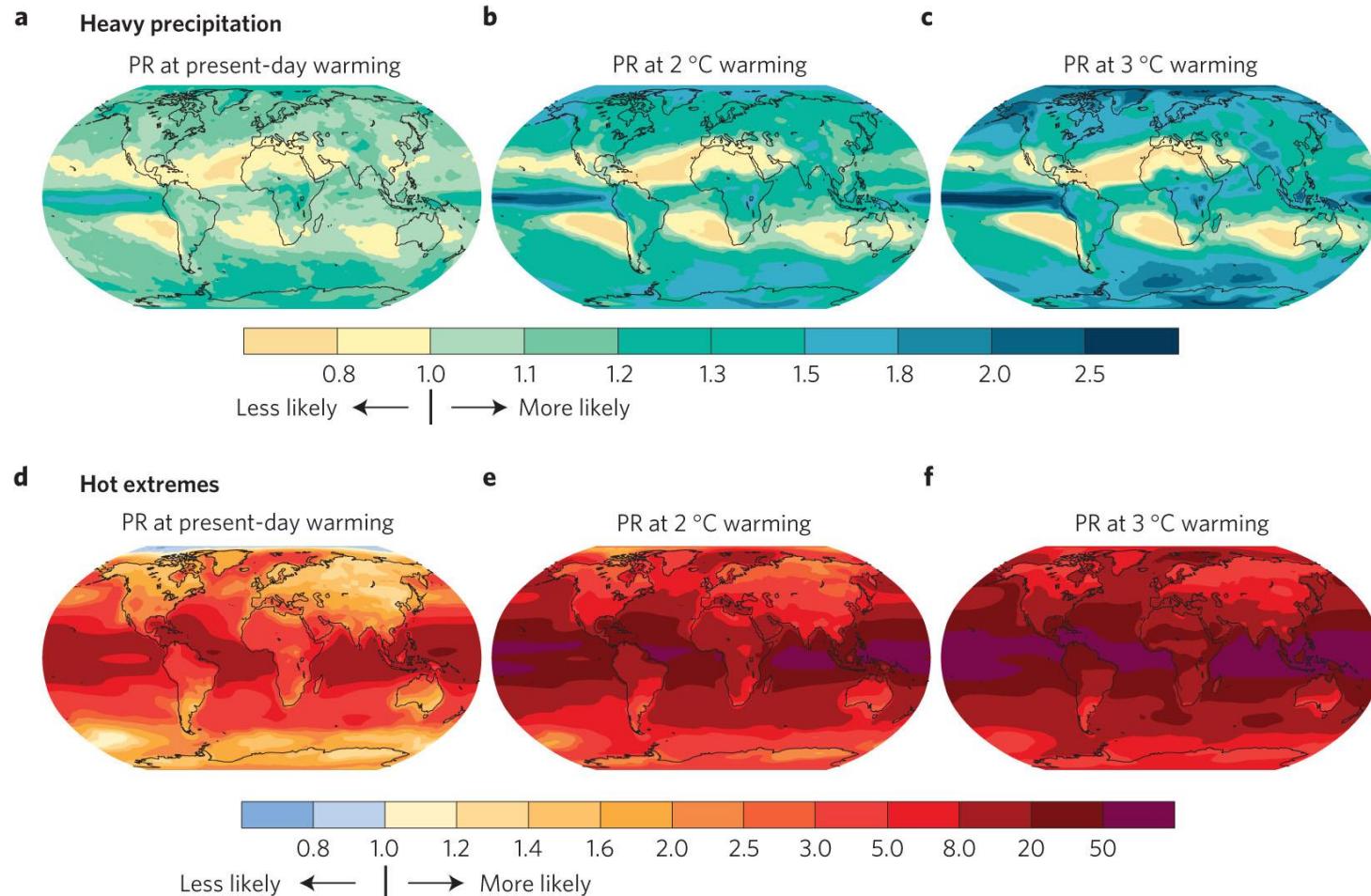
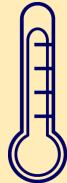


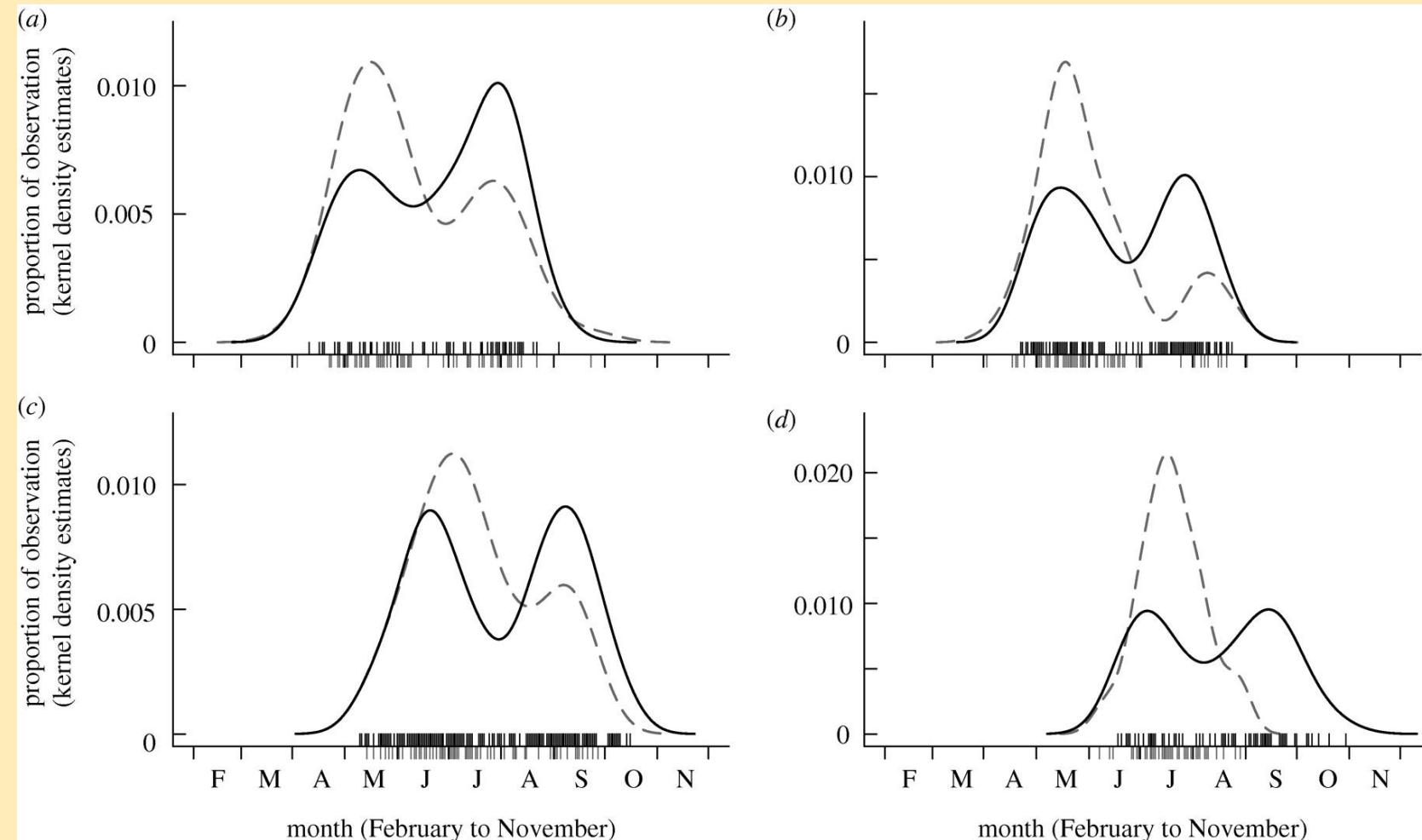
Figure 3 | Change in probability of heavy precipitation and hot extremes. **a-f**, Multi-model mean probability of exceeding the pre-industrial 99th percentile of daily precipitation (**a-c**) and temperature (**d-f**), relative to pre-industrial. Ratios are shown for 30-year periods in which the global mean temperatures warmed 0.85 °C (present-day) (**a,d**), 2 °C (**b,e**) and 3 °C (**c,f**) above pre-industrial conditions.

ПОСЛЕДСТВИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

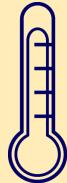


Более быстрый рост популяций

Изменение числа поколений бабочек в Европе

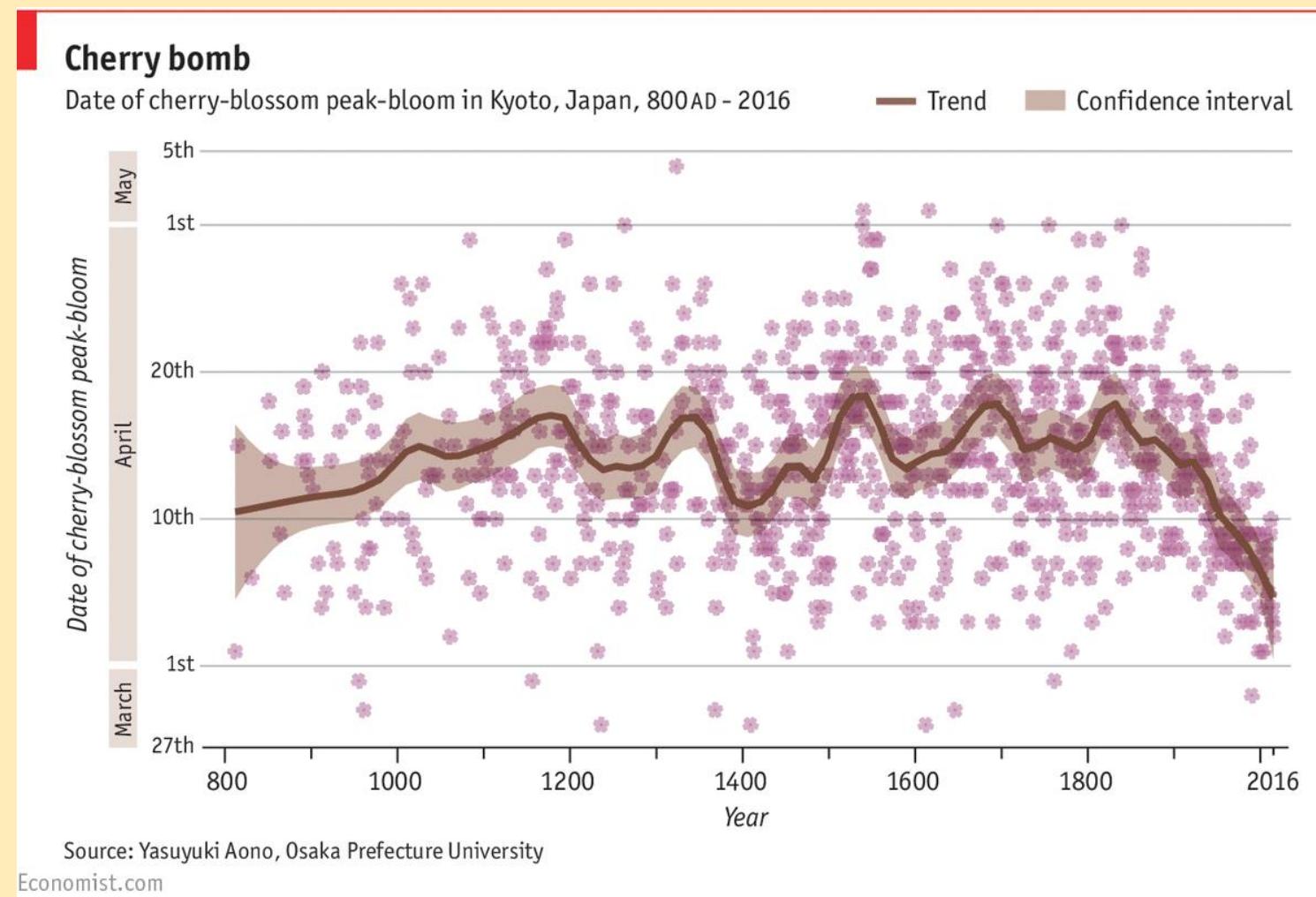


ПОСЛЕДСТВИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

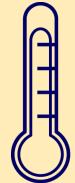


Сдвиг фенологических событий на более ранние даты

Начало цветения
сакуры в Японии

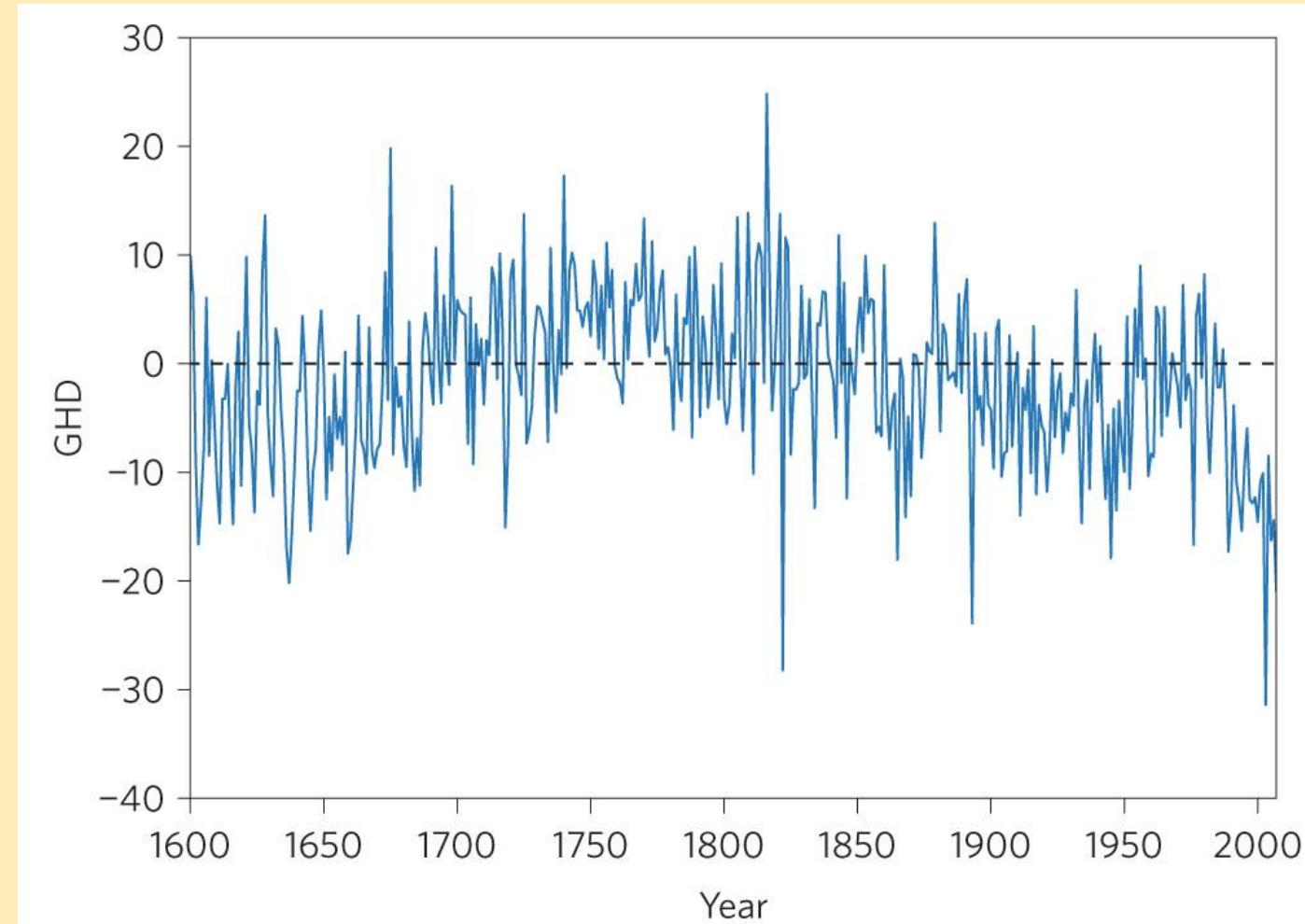


ПОСЛЕДСТВИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

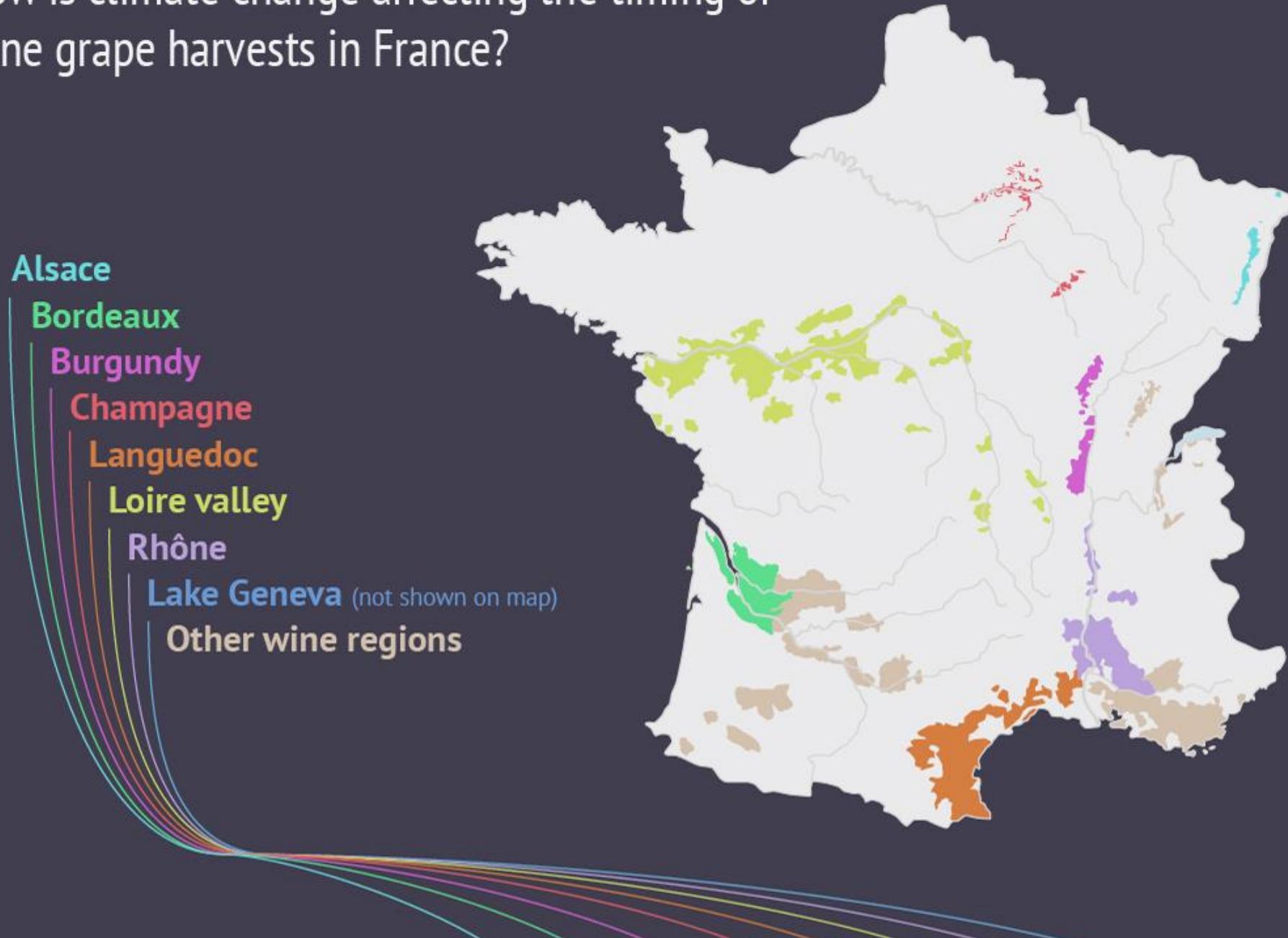


Сдвиг фенологических событий на более ранние даты

Урожай винограда
в Европе

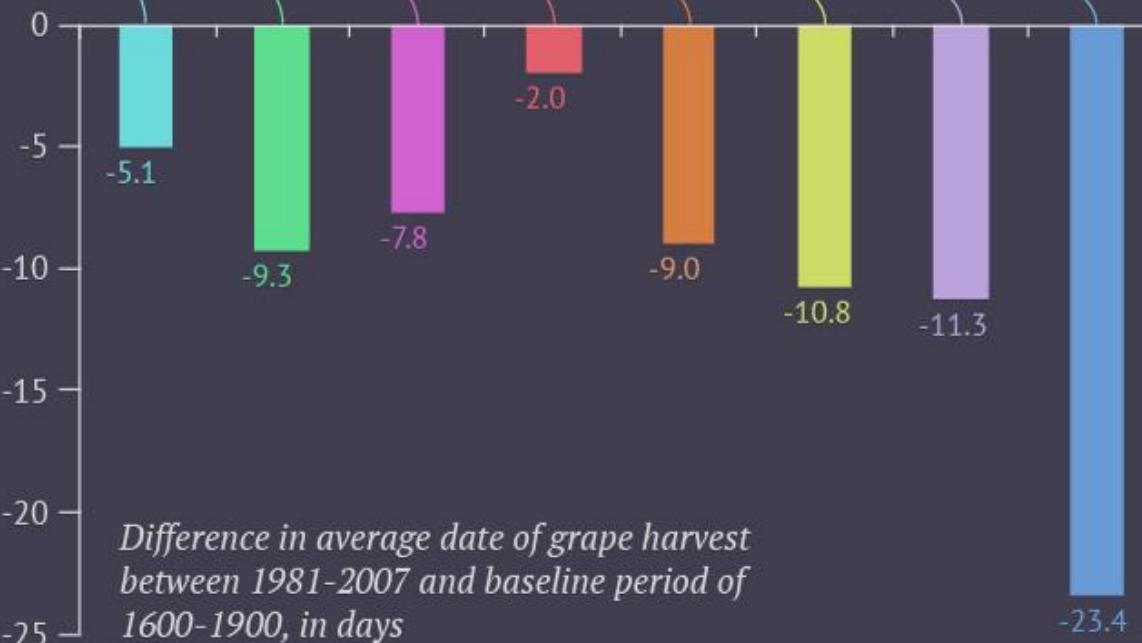


How is climate change affecting the timing of wine grape harvests in France?



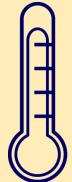
Other wine regions

Harvest site	Average harvest date, 1600-1900
Alsace	9 Oct
Bordeaux	26 Sept
Burgundy	26 Sept
Champagne	23 Sept
Languedoc	29 Sept
Loire Valley	13 Oct
Rhône	26 Sept
Lake Geneva	13 Oct



Source: Cook & Wolkovich (2016)

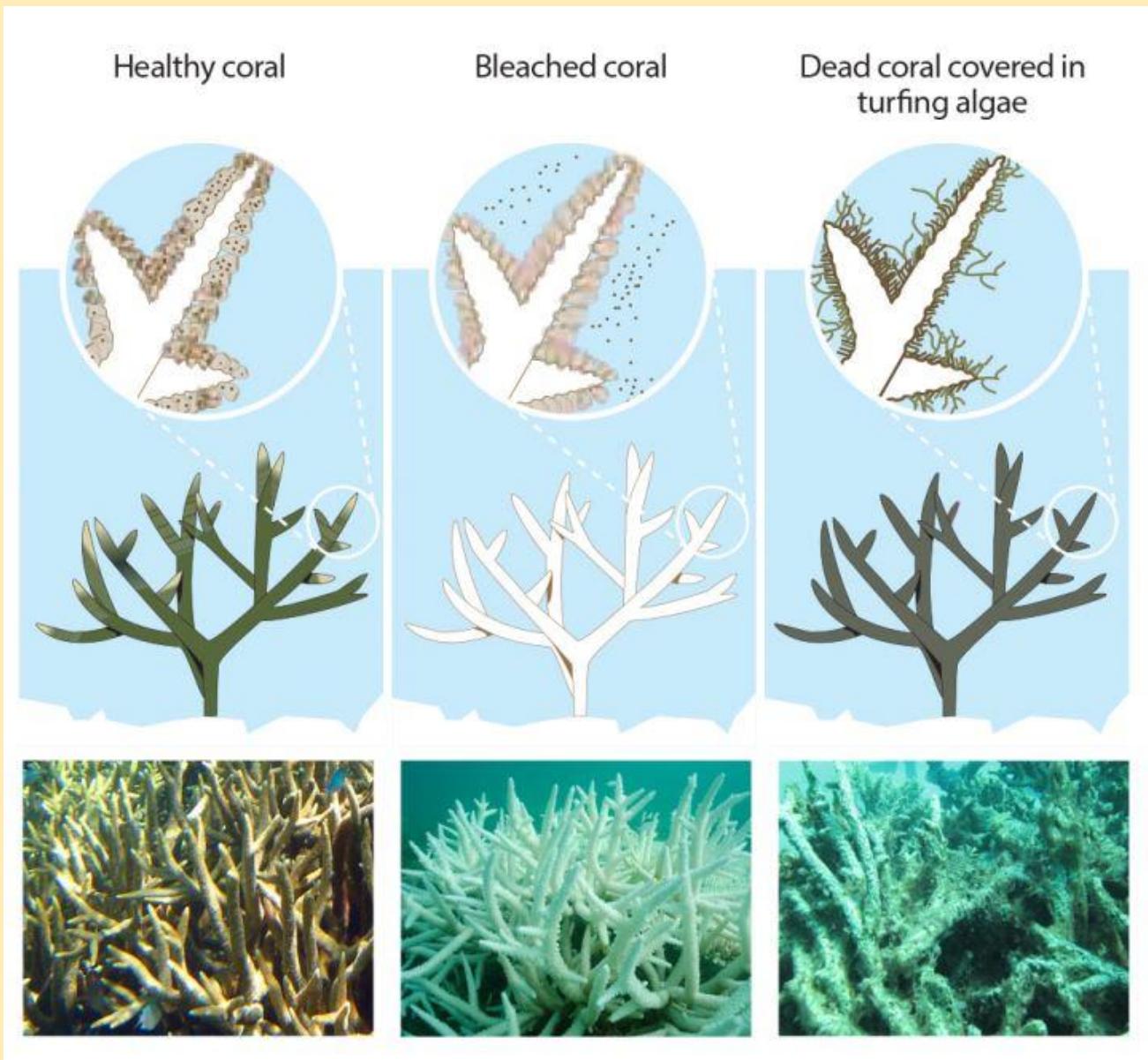
ПОСЛЕДСТВИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА



Обесцвечивание кораллов



ПОСЛЕДСТВИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА



ПОСЛЕДСТВИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

NOAA THREATS TO CORAL REEFS CLIMATE CHANGE

Increased greenhouse gases from human activities result in climate change and ocean acidification.

CLIMATE CHANGE = OCEAN CHANGE

The infographic illustrates the relationship between human activities and climate change, specifically focusing on coral reef ecosystems. At the top, a city skyline is shown with arrows pointing upwards from various sources: burning fossil fuels for heat and energy, producing some industrial products, raising livestock, fertilizing crops, and deforestation. These activities lead to increased greenhouse gases, which result in climate change and ocean acidification. Below this, a large blue section titled "CLIMATE CHANGE dramatically affects CORAL REEF ECOSYSTEMS" shows various environmental factors: Warming Ocean (thermal stress), Sea Level Rise (sedimentation), Changes in Storm Patterns (stronger, more frequent storms), Changes in Precipitation (increased runoff of freshwater, sediment & land-based pollutants), Altered Ocean Currents (change in connectivity & temperature regimes), and Ocean Acidification (a result of increased CO₂, reduction in pH levels). The bottom part of the infographic shows a coral reef ecosystem with specific impacts labeled: CORAL BLEACHING, INFECTIOUS DISEASE, SMOOTHERING OF CORAL, DESTRUCTION OF REEF STRUCTURE, ALGAL BLOOMS & MURKY WATER REDUCE LIGHT, LACK OF FOOD AND DISPERSAL OF LARVAE, and DECREASES GROWTH RATES AND STRUCTURAL INTEGRITY. A final statement at the bottom reads: "Impacts are immediate and long term, direct and indirect - A weakened coral is vulnerable."

CO₂
The world's ocean is a massive sink that absorbs carbon dioxide (CO₂). Although this has slowed global warming, it is also changing ocean chemistry.

HOW YOU CAN HELP

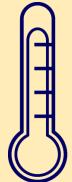
Shrink your carbon footprint to reduce greenhouse gases.

- Drive less.
- Reduce, reuse or recycle.
- Purchase energy-efficient appliances and lightbulbs.
- Print less. Download more. Use less water.

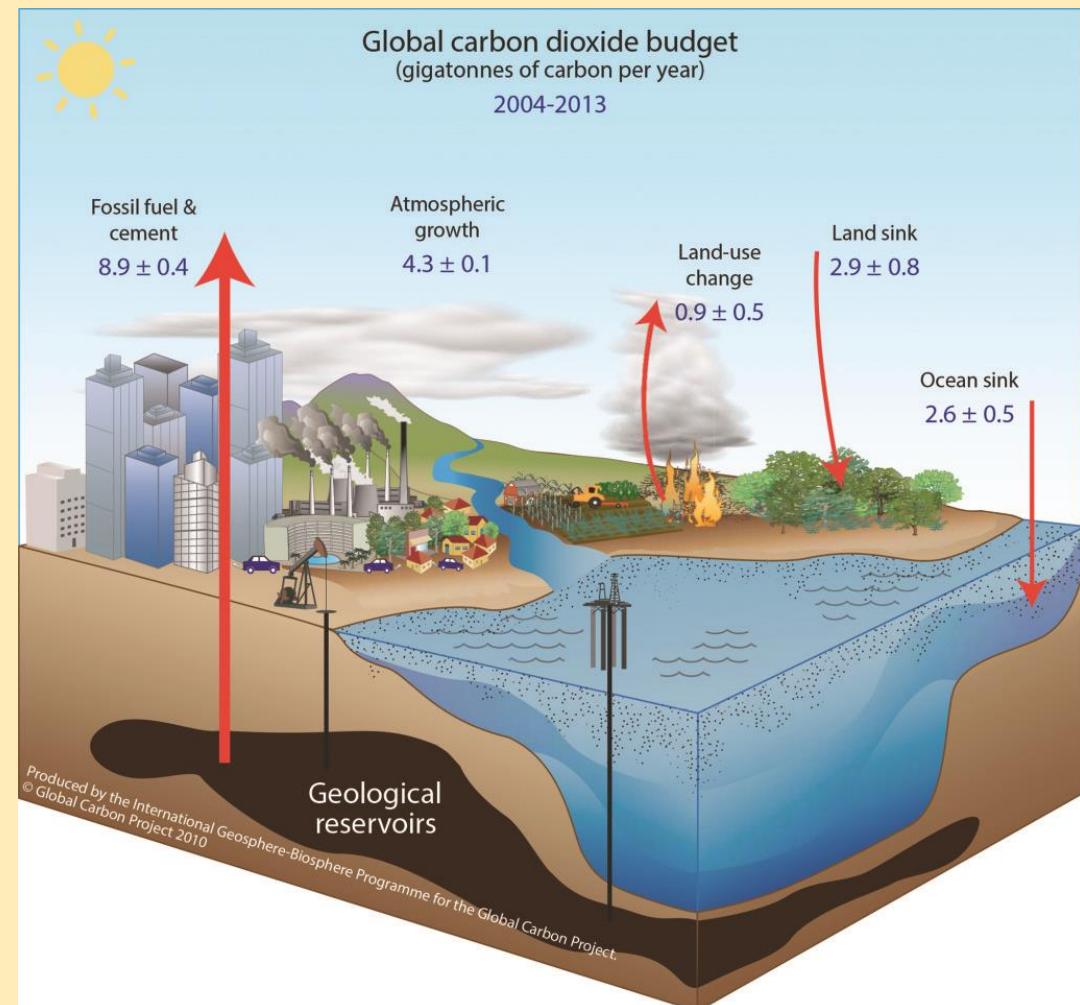
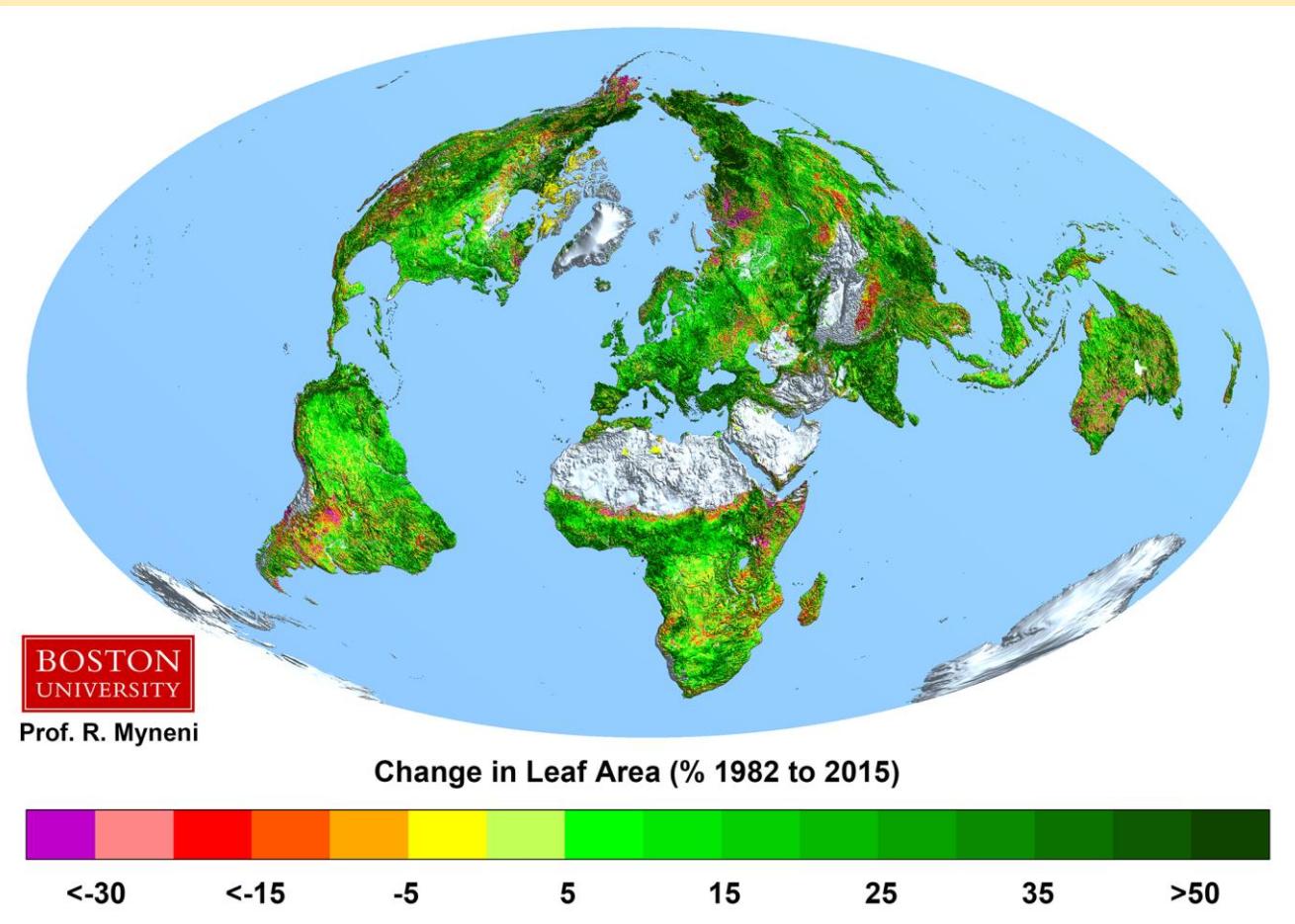
Do your part to help improve overall coral reef condition.

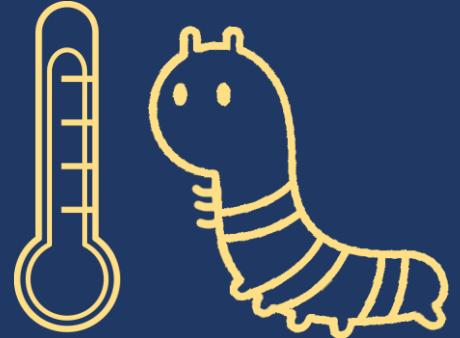
- Reduce the use of lawn and garden chemicals.
- DO NOT dump household chemicals in storm drains.
- Choose sustainable seafood. www.FishWatch.com
- Learn about good reef etiquette and practice it when in the water.
- Volunteer for beach and waterway clean ups.

ПОСЛЕДСТВИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА



Изменение биогеохимических циклов





Спасибо за внимание!