



*Смотри в корень!*

*Козьма Прутков.*

*«Плоды раздумья. Мысли и афоризмы». Искра. 1860. № 26*

# Эволюция корневых систем: от стратегии инициации бокового корня к пластичности ветвления

---

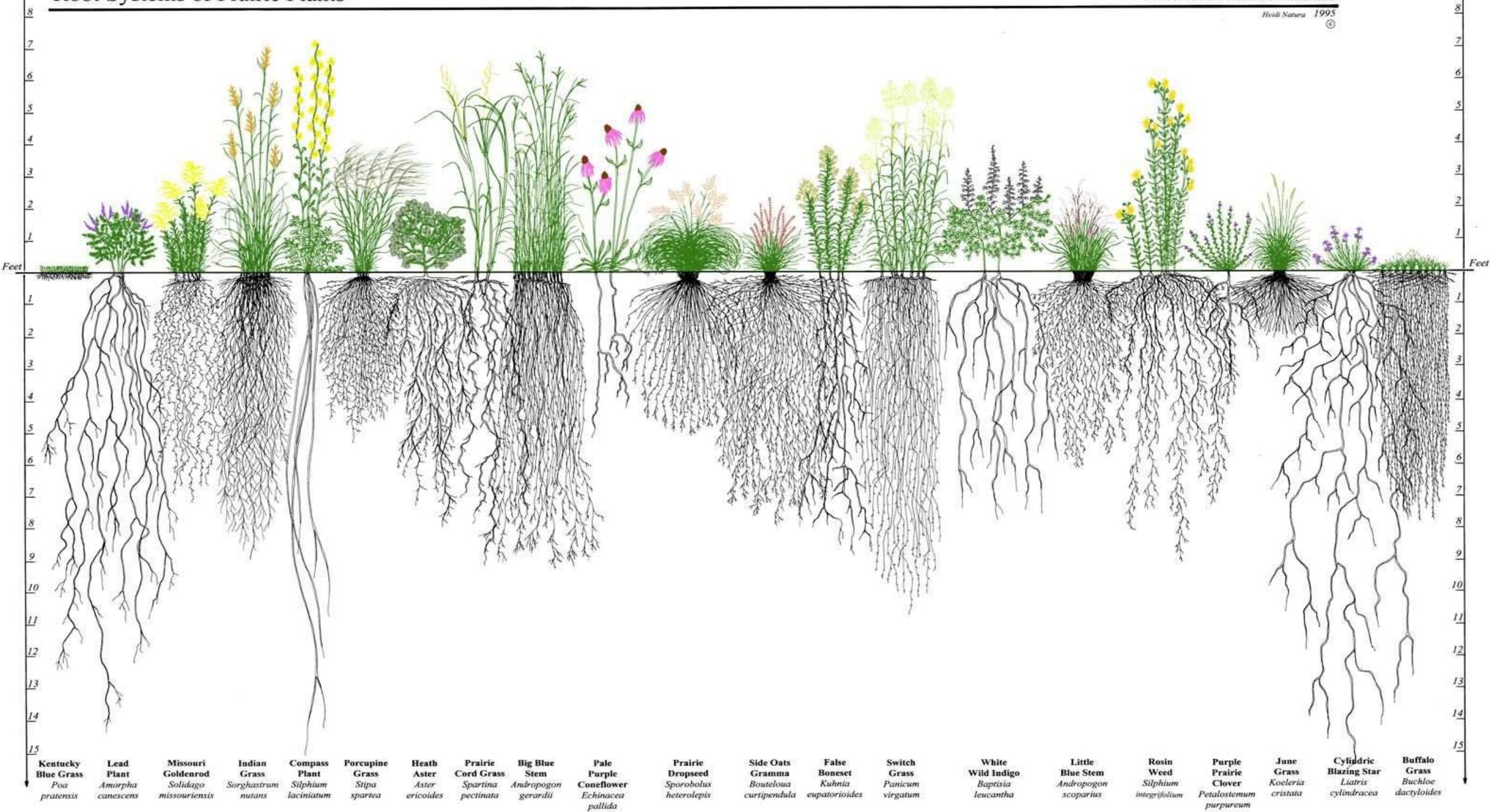
**ДЕМЧЕНКО**

Кирилл Николаевич

*Ботанический институт РАН, Санкт-Петербург*



# Root Systems of Prairie Plants



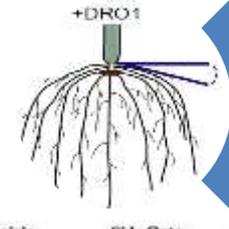
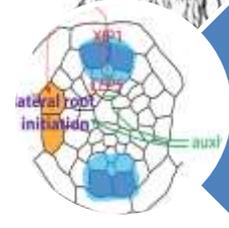
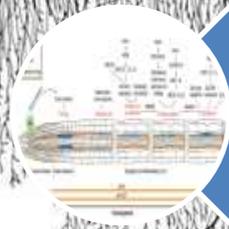
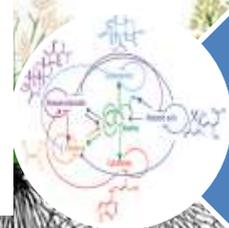
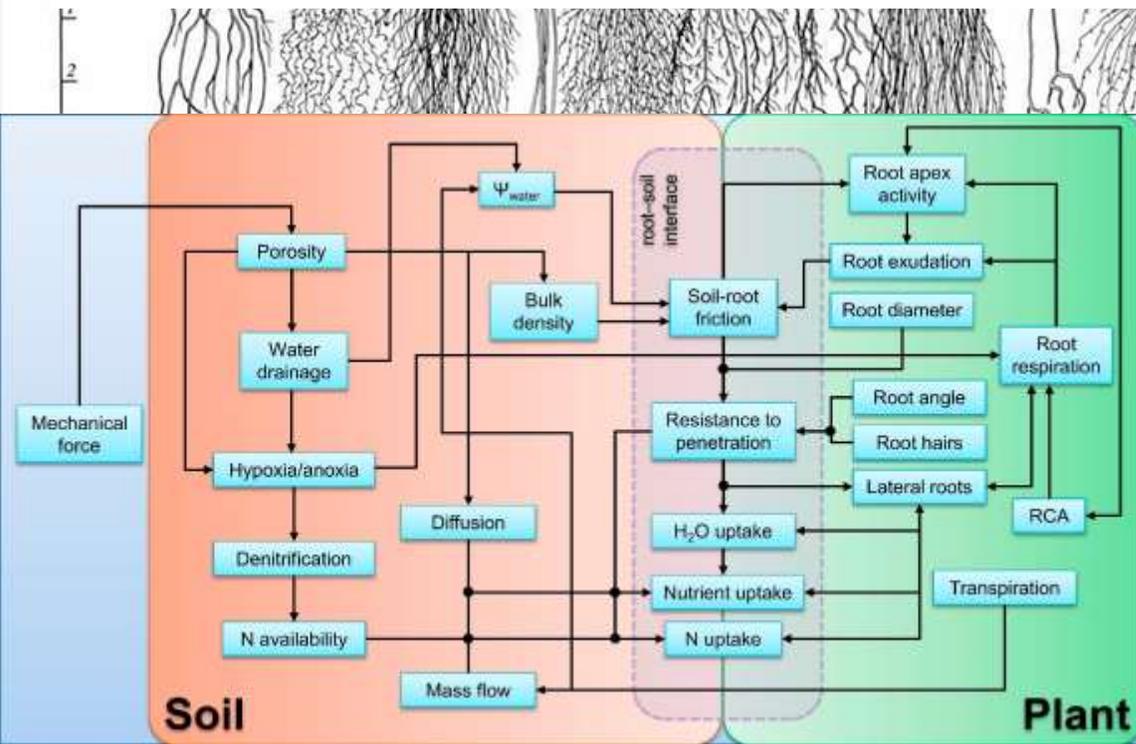
Разнообразии ветвления корней наземных растений

Роль ауксина, как ключевого фактора инициации ветвления

Мишени ауксина при инициации бокового корня. Основные генные сети и модули

Роль малых сигнальных пептидов в регуляции ветвления

Генетические факторы разнообразия архитектуры корневых систем цветковых растений



**Разнообразие ветвления корней  
наземных растений**

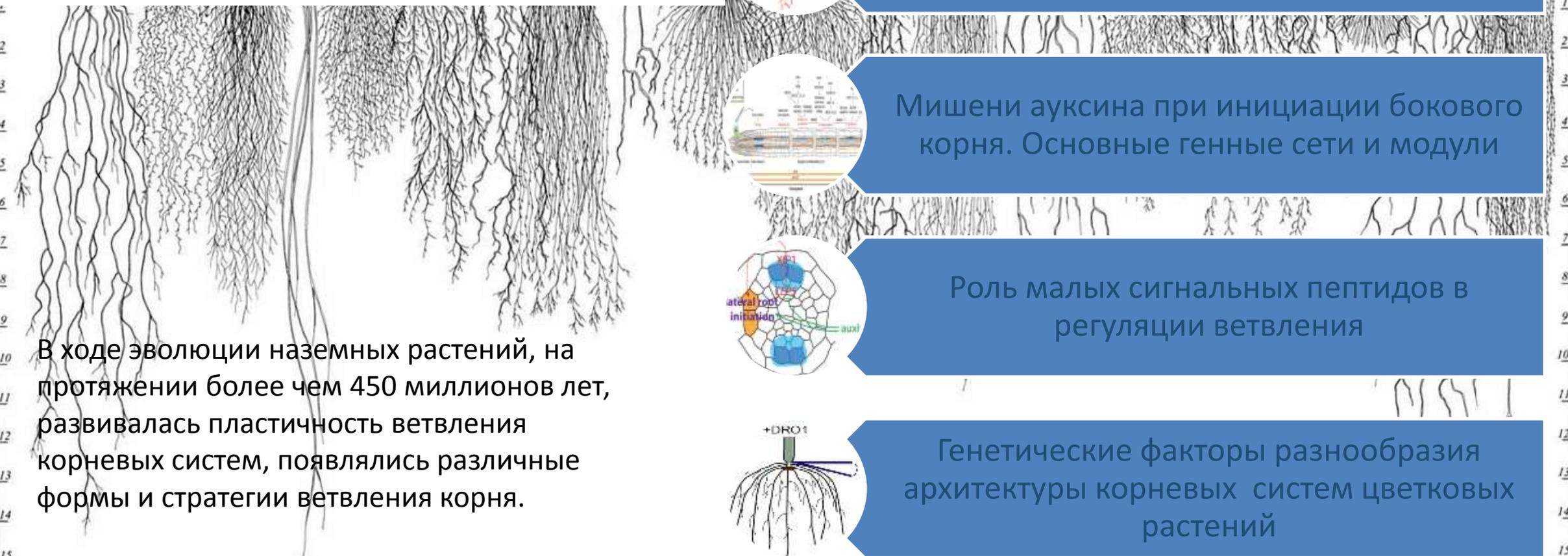
Роль ауксина, как ключевого фактора  
инициации ветвления

Мишени ауксина при инициации бокового  
корня. Основные генные сети и модули

Роль малых сигнальных пептидов в  
регуляции ветвления

Генетические факторы разнообразия  
архитектуры корневых систем цветковых  
растений

В ходе эволюции наземных растений, на протяжении более чем 450 миллионов лет, развивалась пластичность ветвления корневых систем, появлялись различные формы и стратегии ветвления корня.

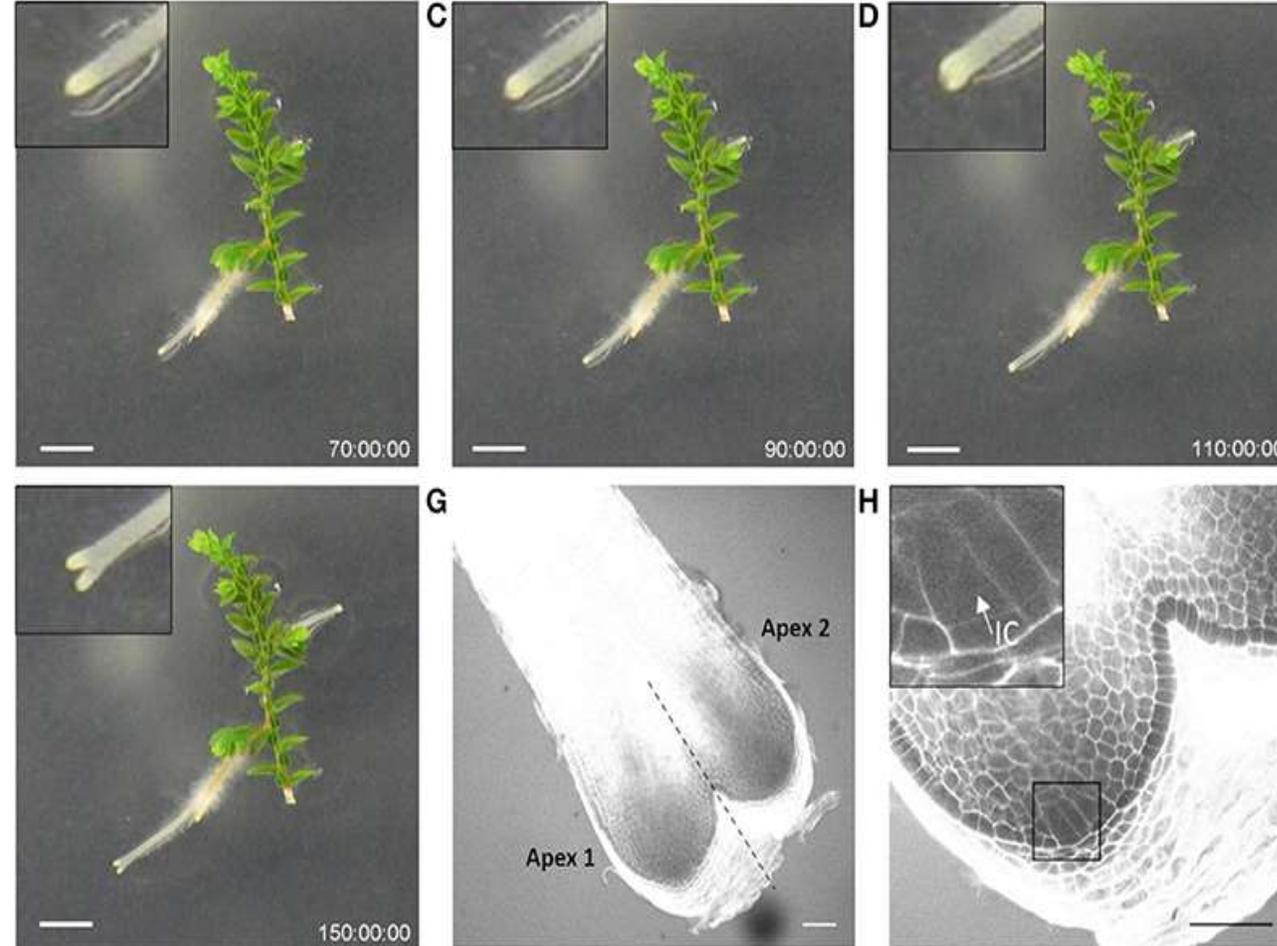
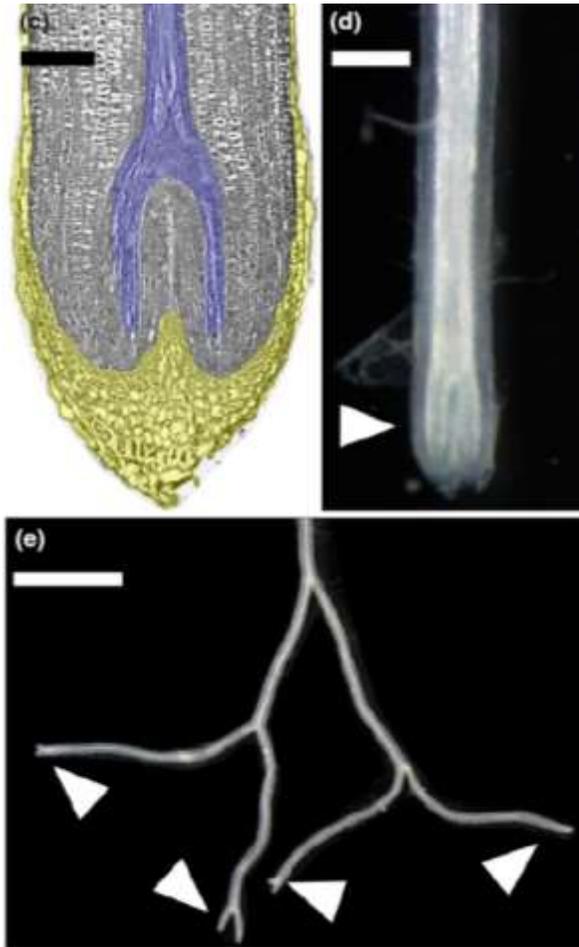


Kentucky Blue Grass, Lead Plant, Missouri Goldenrod, Indian Grass, Compass Plant, Porcupine Grass, Heath Aster, Prairie Cord Grass, Big Blue Stem, Pale Purple, Prairie Dronseed, Side Oats Gramma, False Boneset, Switch Grass, White Wild Indigo, Little Blue Stem, Rosin Weed, Purple Prairie, June Grass, Cylindric Blazing Star, Buffalo Grass

# Основные типы ветвления корневых систем

*Selaginella moellendorffii* (Selaginellaceae, **Lycopodiophyta**)

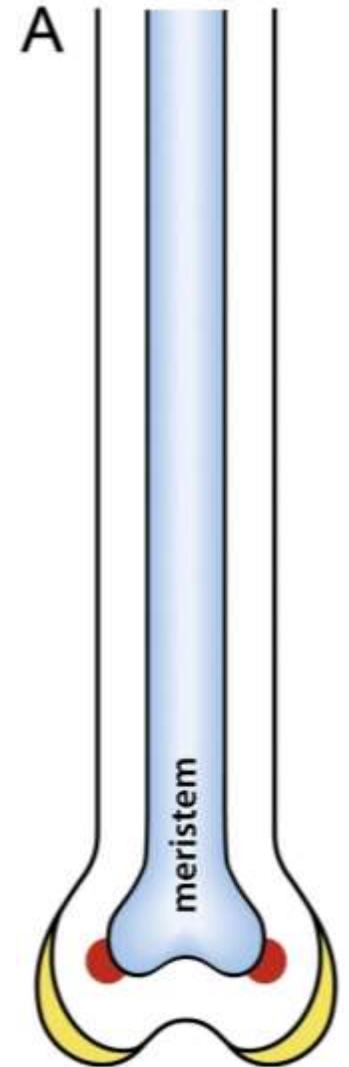
the first rooting plant lineage, lycophytes, were **not able to produce lateral roots**



**auxins do not induce root meristem bifurcation in *Selaginella***

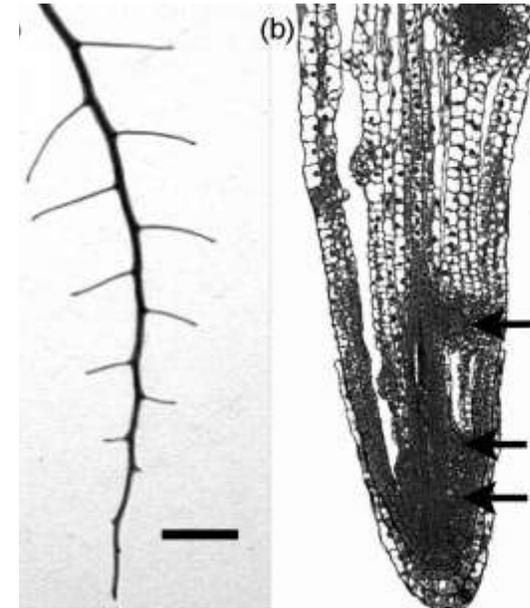
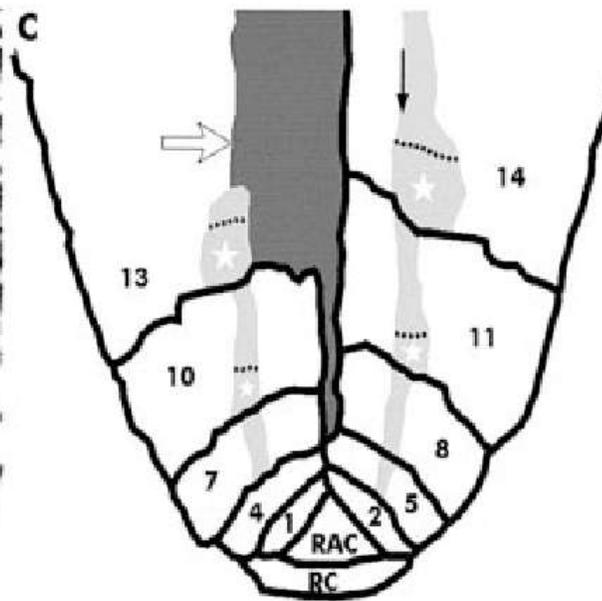
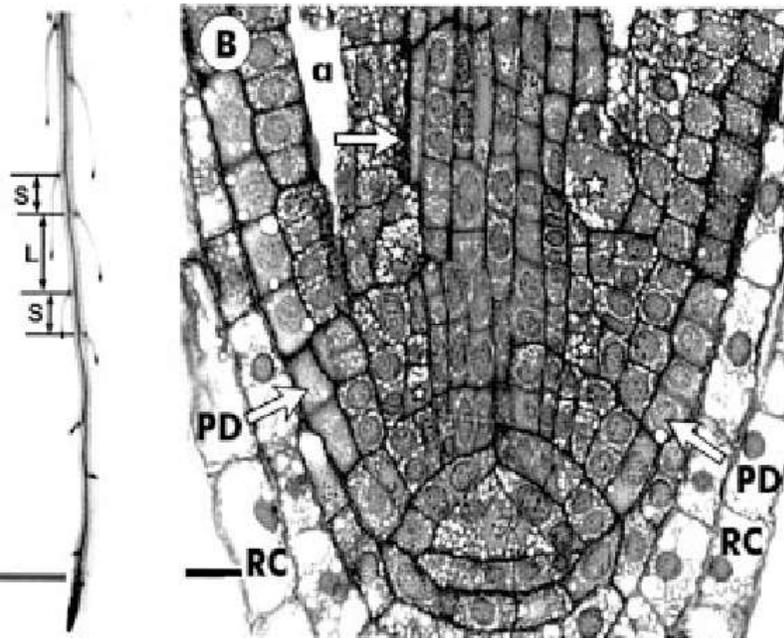
Fang T., Motte H., Parizot B., Beeckman T.  
Root branching is not induced by auxins in *Selaginella moellendorffii*.  
*Frontiers in Plant Science*. 2019

Dichotomy

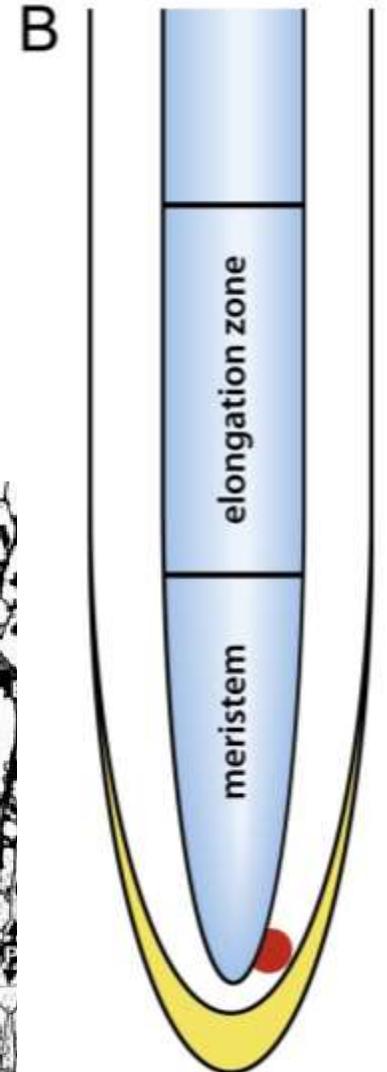


Hetherington A.J., Dolan L. The evolution of lycopsid rooting structures: conservatism and disparity. *New Phytologist*. 2017

# Основные типы ветвления корневых систем



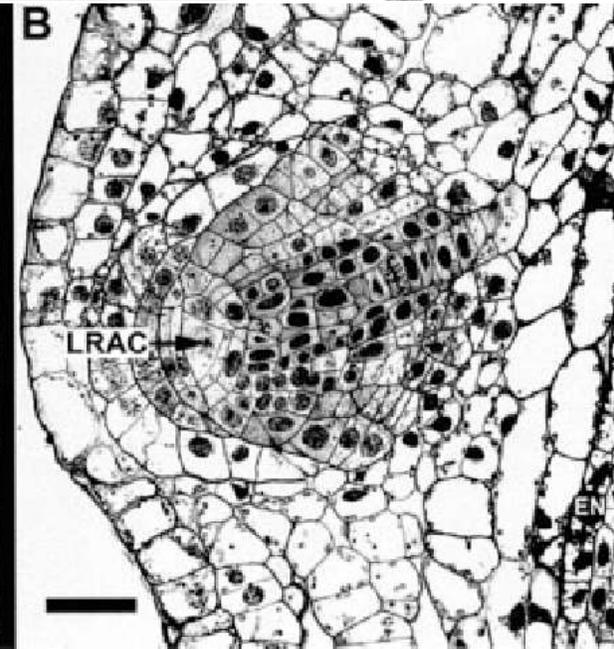
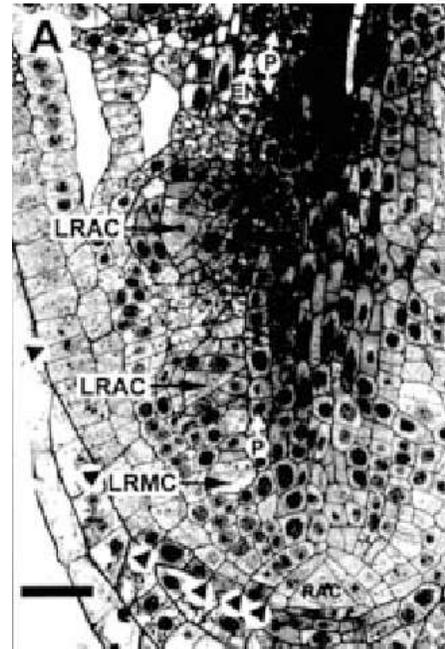
Common ancestor:  
Monopodial branching



## *Ceratopteris richardii* (Pteridaceae, Polypodiopsida)

Hou G., Hill J.P., Blancaflor E.B.  
Developmental anatomy and auxin response of lateral  
root formation in *Ceratopteris richardii*. *Journal of  
Experimental Botany*. 2004.

Hou G., Blancaflor E.B. Fern root development.  
*Annual Plant Reviews Volume 37*. 2009.



# Основные типы ветвления корневых систем

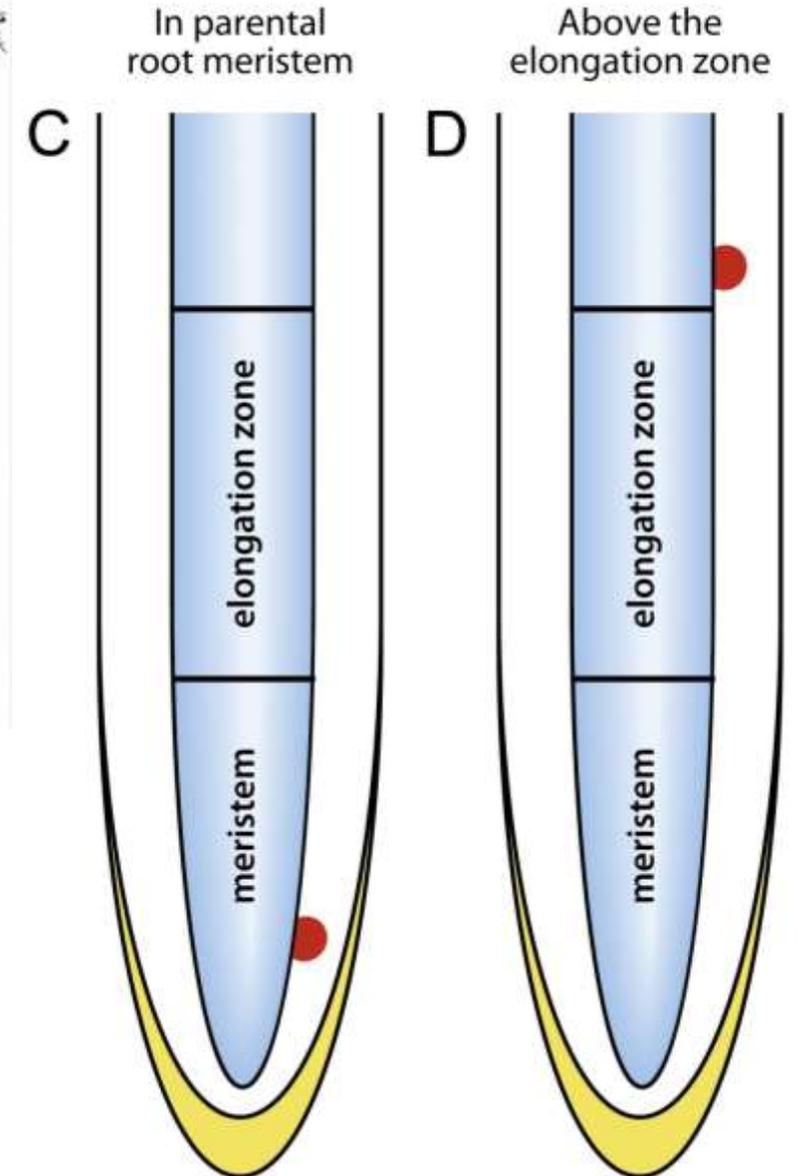
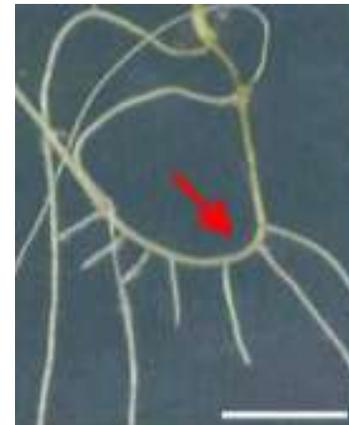
## Spermatophyta, *sensu stricto*

### Спонтанные

- Выше зоны растяжения материнского корня
- В апикальной меристеме родительского корня

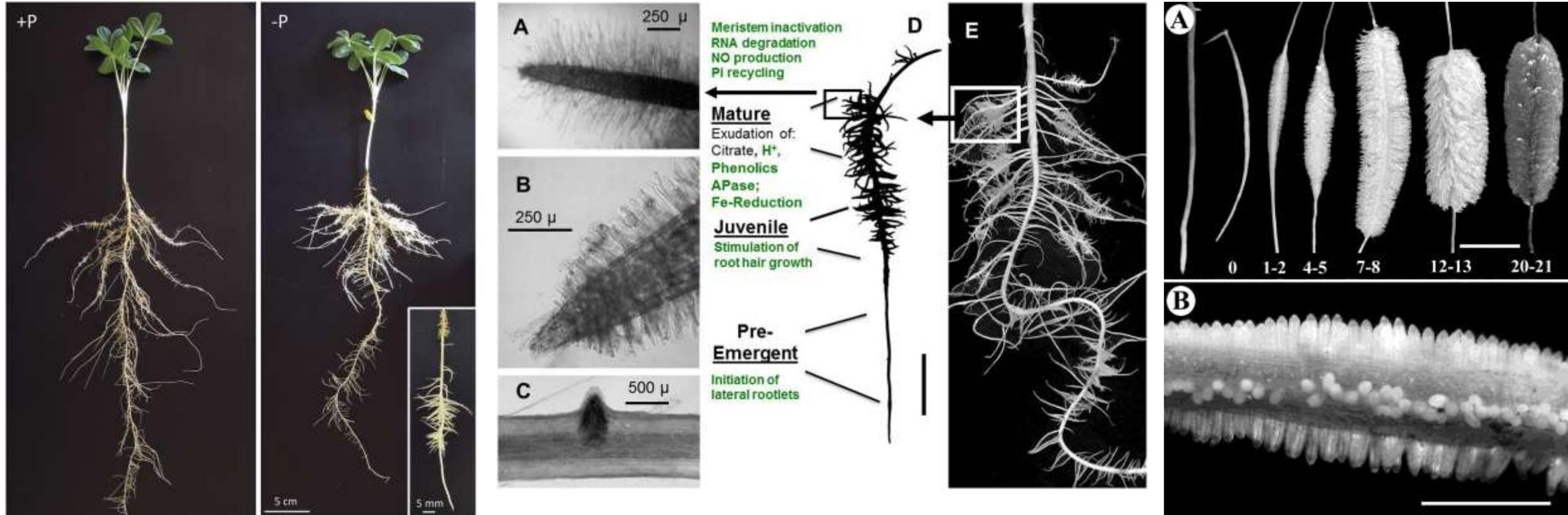
### Индукированные

- Механический стимул → изгиб корня
- Градиент воды и минеральных солей в почве
- Внешние гормональные стимуляции



# Основные типы ветвления корневых систем

**Cluster roots**, also known as **proteoid roots**: model experimental tools for key biological problems

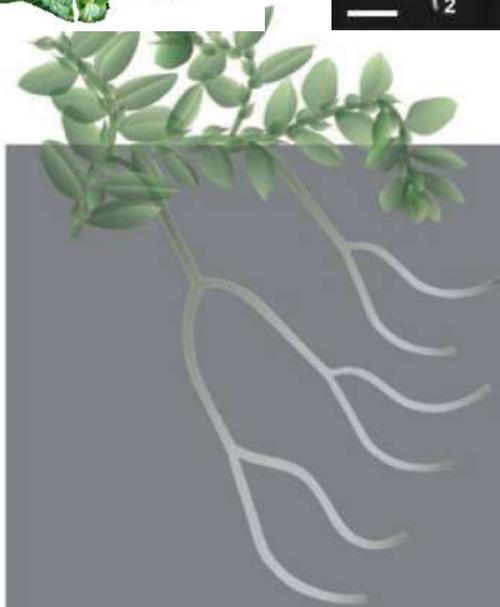
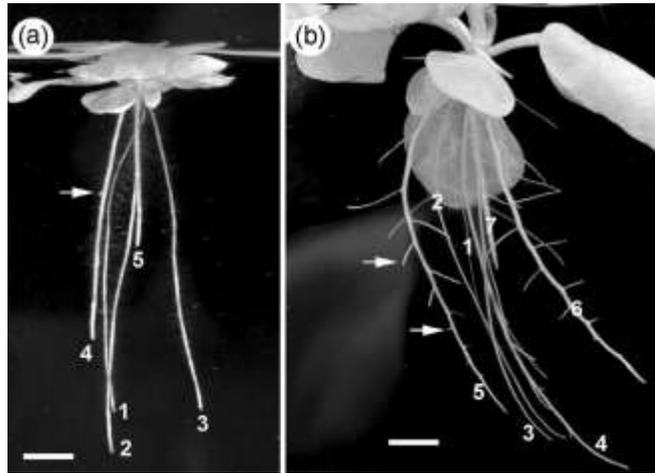


*Hakea prostrata*

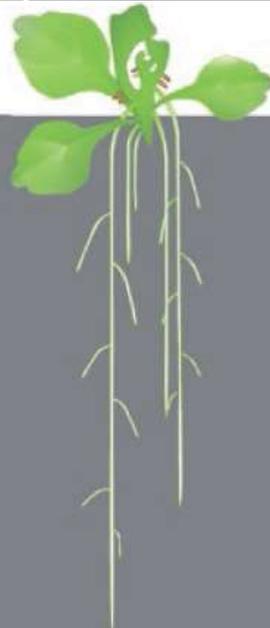
Такой тип инициации боковых корней встречается у видов семейств Betulaceae, Casuarinaceae, Eleagnaceae, Fabaceae, Moraceae, Myricaceae, а также Cyperaceae и Restionaceae.

*Lupinus albus*, *L. consentinii*, *Casuarina glauca*, *Hippophae rhamnoides*, *Ficus benjamina*

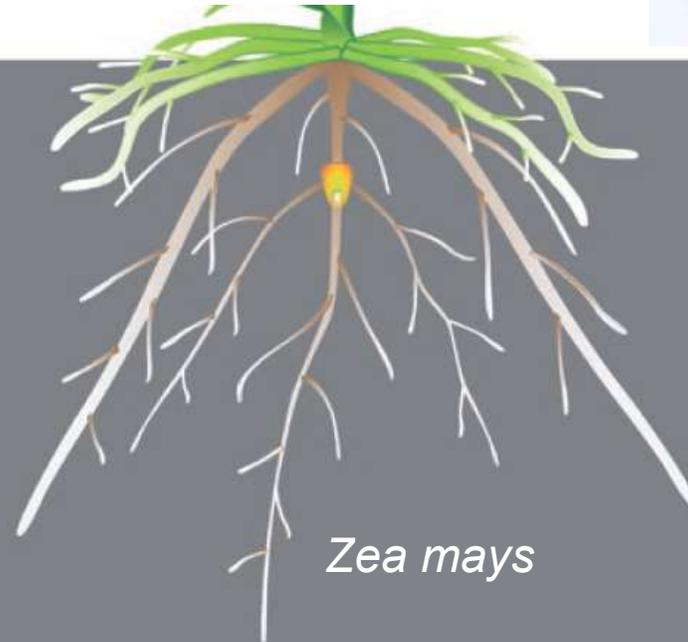
# Основные типы ветвления корневых систем



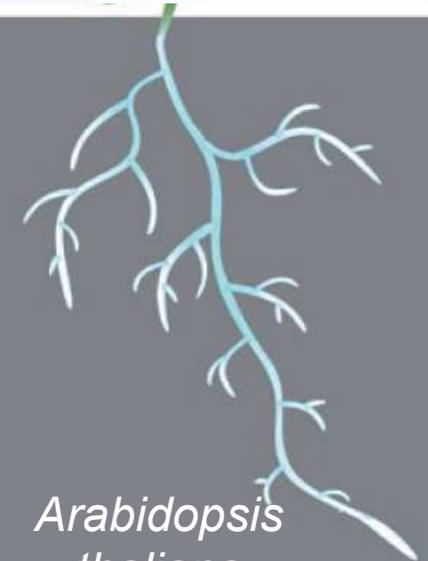
*Selaginella  
moellendorffii*



*Ceratopteris  
richardii*



*Zea mays*

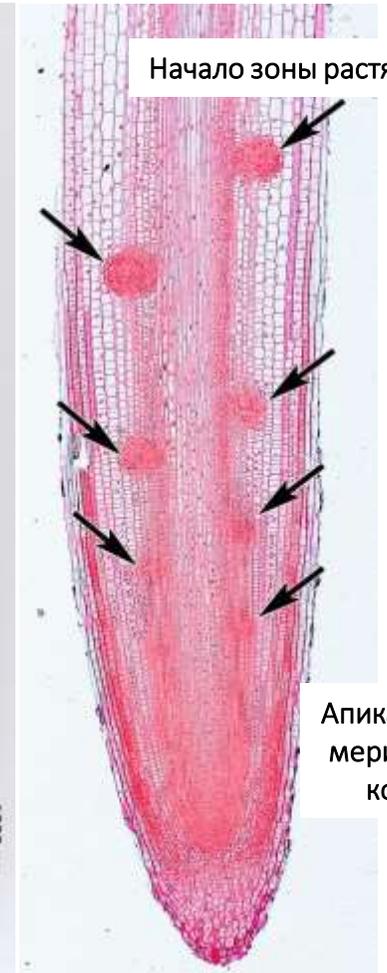
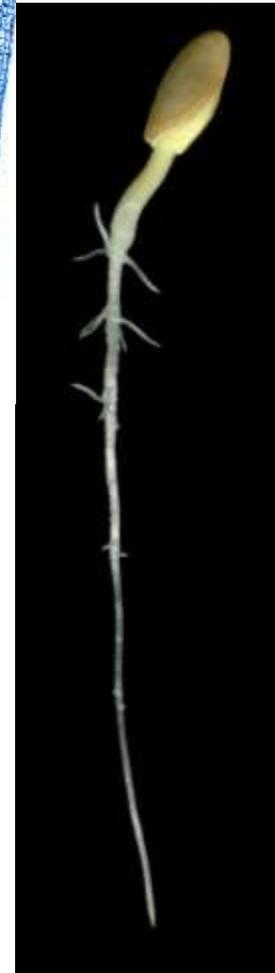
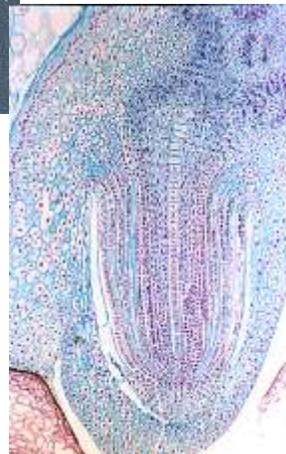
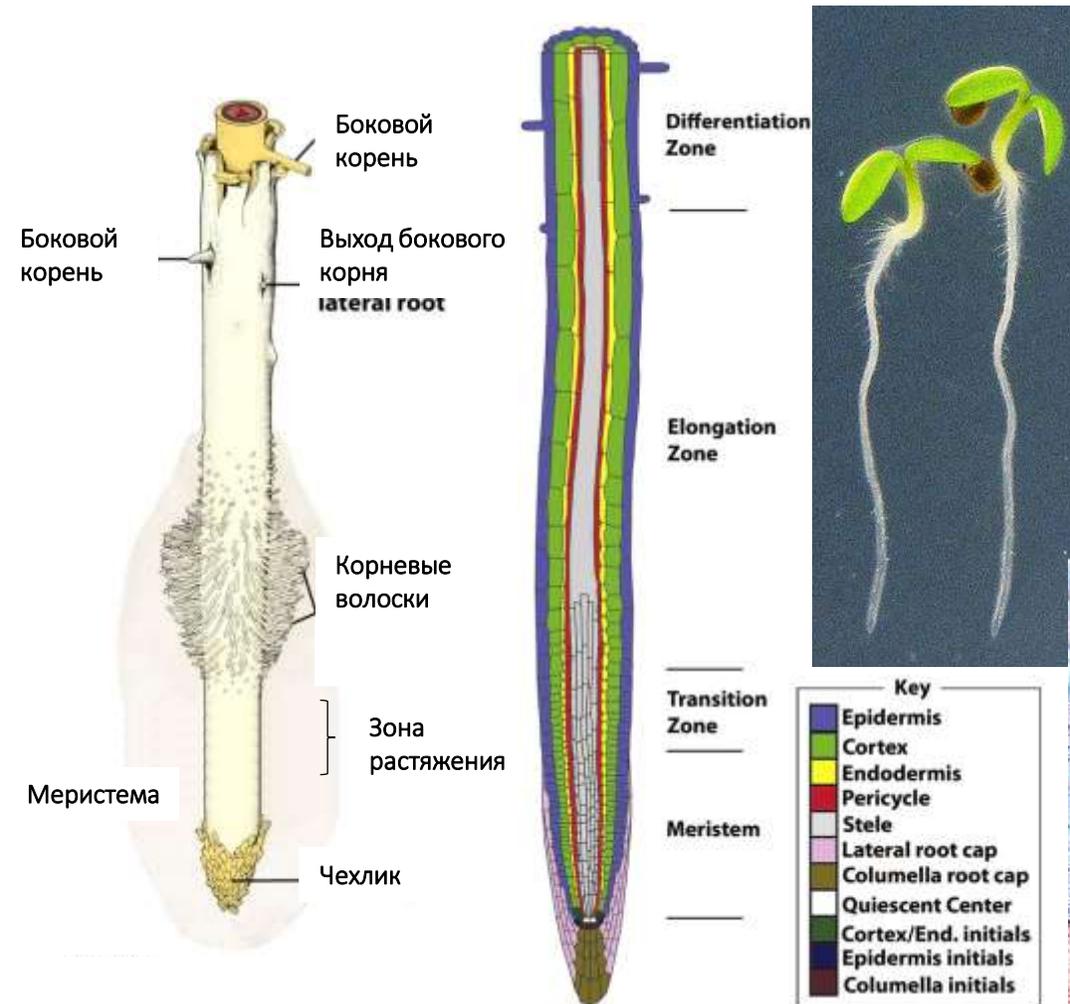


*Arabidopsis  
thaliana*

# Основные типы ветвления корневых систем

Выше зоны растяжения родительского корня

В апикальной меристеме родительского корня



у большинства цветковых растений

Cucurbitaceae, Fagopyraceae,  
Convolvulaceae, Pontederiaceae, Araceae

# Основные типы инициации бокового корня

## Группы растений с инициацией бокового корня в меристеме родительского корня

	Class/Clade	Order	Family	Species	Reference		
Angiosperms	Eudicots	Rosids	Cucurbitales	Cucurbitaceae	<i>Cucurbita pepo</i>	Gulyaev (1964)	
					<i>Cucurbita maxima</i>	Mallory et al. (1970)	
					<i>Cucumis sativus</i>	(Dubrovsky, 1986; 1987)	
		Superasterids	Caryophyllales	Polygonaceae	<i>Fagopyrum esculentum</i>	O'Dell and Foard (1969)	
	Lamiids	Solanales	Convolvulaceae	<i>Ipomea purpurea</i>	Seago (1973)		
	Liliopsida (Monocots)	Commelinidae	Commelinales	Pontederiaceae	<i>Pontederia cordata</i>	Charlton (1975; 1983; 1987)	
					<i>Eichhornia crassipes</i>	Mallory et al. (1970); Clowes (1985)	
		Alismatidae	Alismatales	Alismataceae	Musaceae	<i>Musa acuminata</i>	Charlton (1982)
					Araceae	<i>Pistia stratiotes</i>	Clowes (1985); Charlton (1987)
					Butomaceae	<i>Butomus umbellatus</i>	Zhupanov, Brykov (2014)
Alismataceae					<i>Sagittaria sagittifolia</i>		
Pteridopsida	Polypodiales	Pteridaceae	<i>Ceratopteris thalictroides</i> <i>Ceratopteris richardii</i>	Mallory et al. (1970); Charlton (1983); Hou et al. (2004); Hou, Blancaflor (2009)			
			Salviniales	Marsileaceae	<i>Marsilea quadrifolia</i>	Charlton (1983)	

Ilna E.L., Kiryushkin A.S., Semenova V.A., Demchenko N.P., Pawlowski K., Demchenko K.N.

Lateral root initiation and formation within the parental root meristem of *Cucurbita pepo*: is auxin a key player?

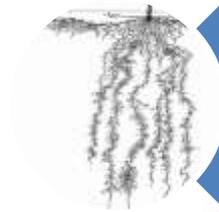
*Annals of Botany*. 2018.



# IX

## СЪЕЗД ОБЩЕСТВА ФИЗИОЛОГОВ РАСТЕНИЙ

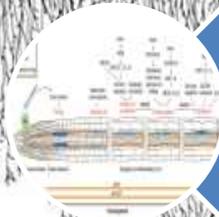
<https://congresskazan2019.ofr.su>



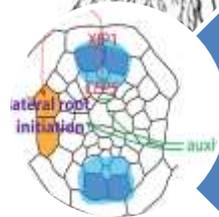
Разнообразие ветвления корней  
наземных растений



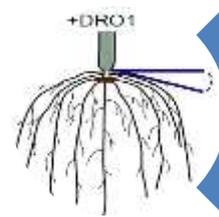
Роль ауксина, как ключевого фактора  
инициации ветвления



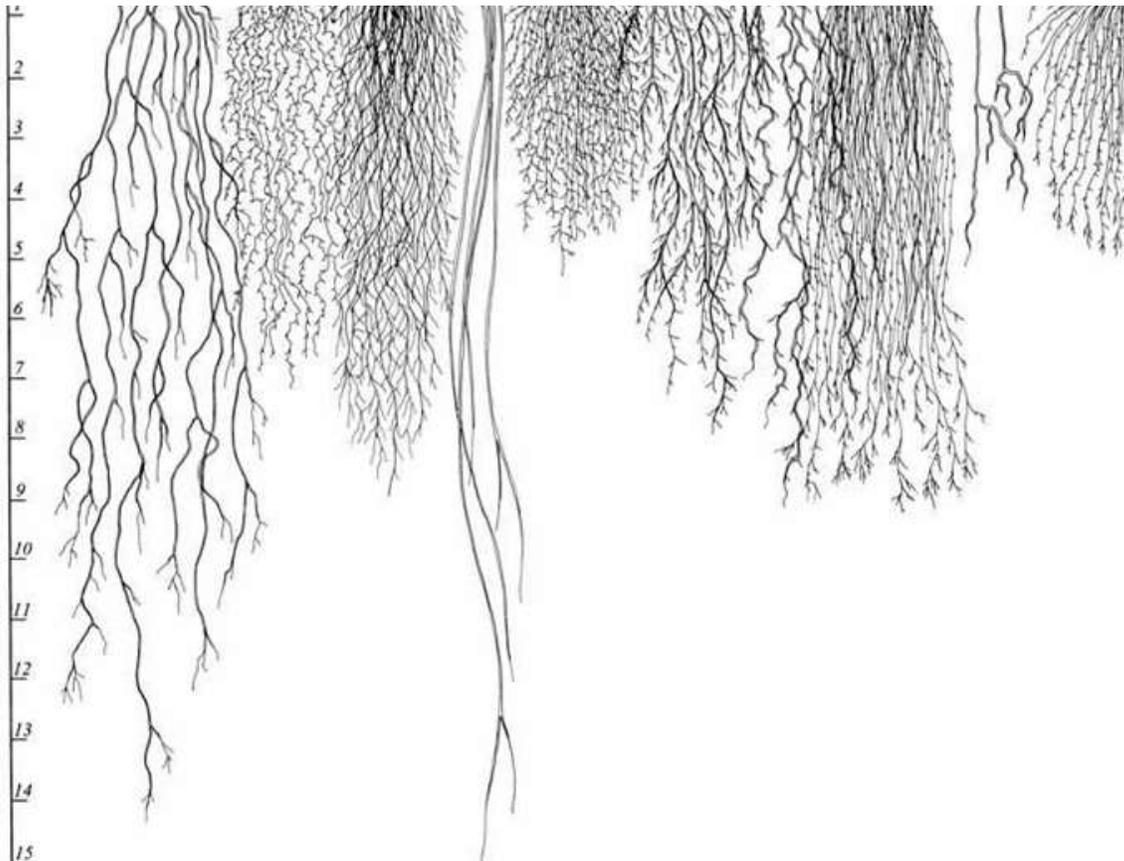
Мишени ауксина при инициации бокового  
корня. Основные генные сети и модули



Роль малых сигнальных пептидов в  
регуляции ветвления

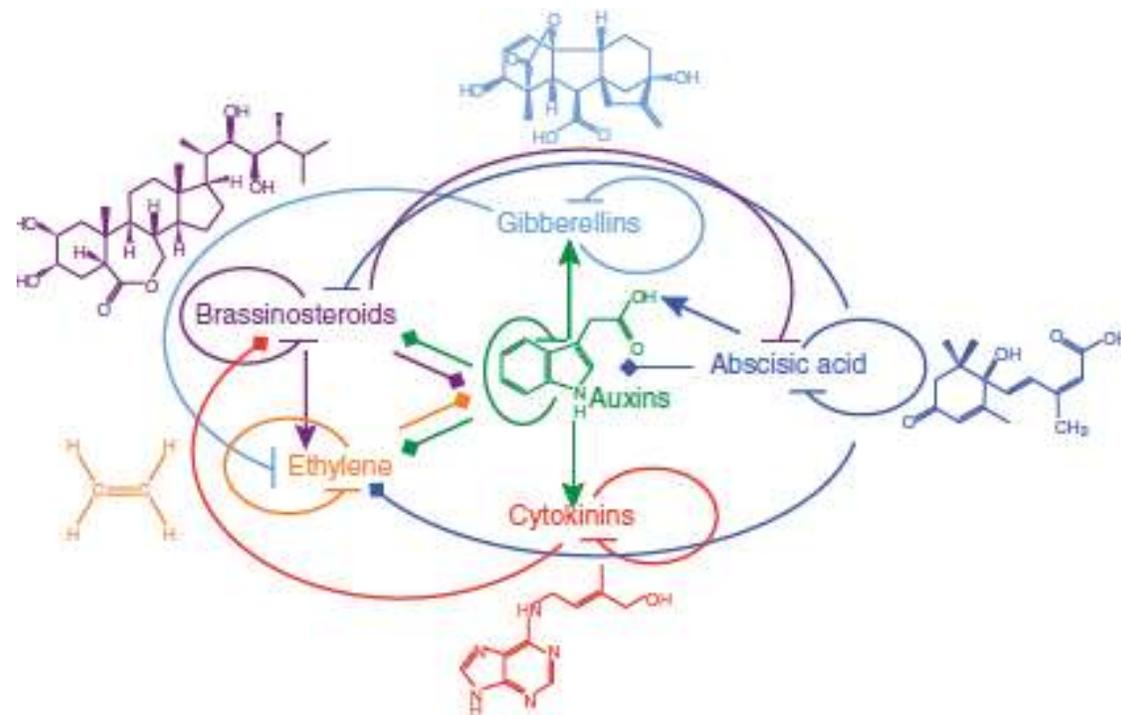


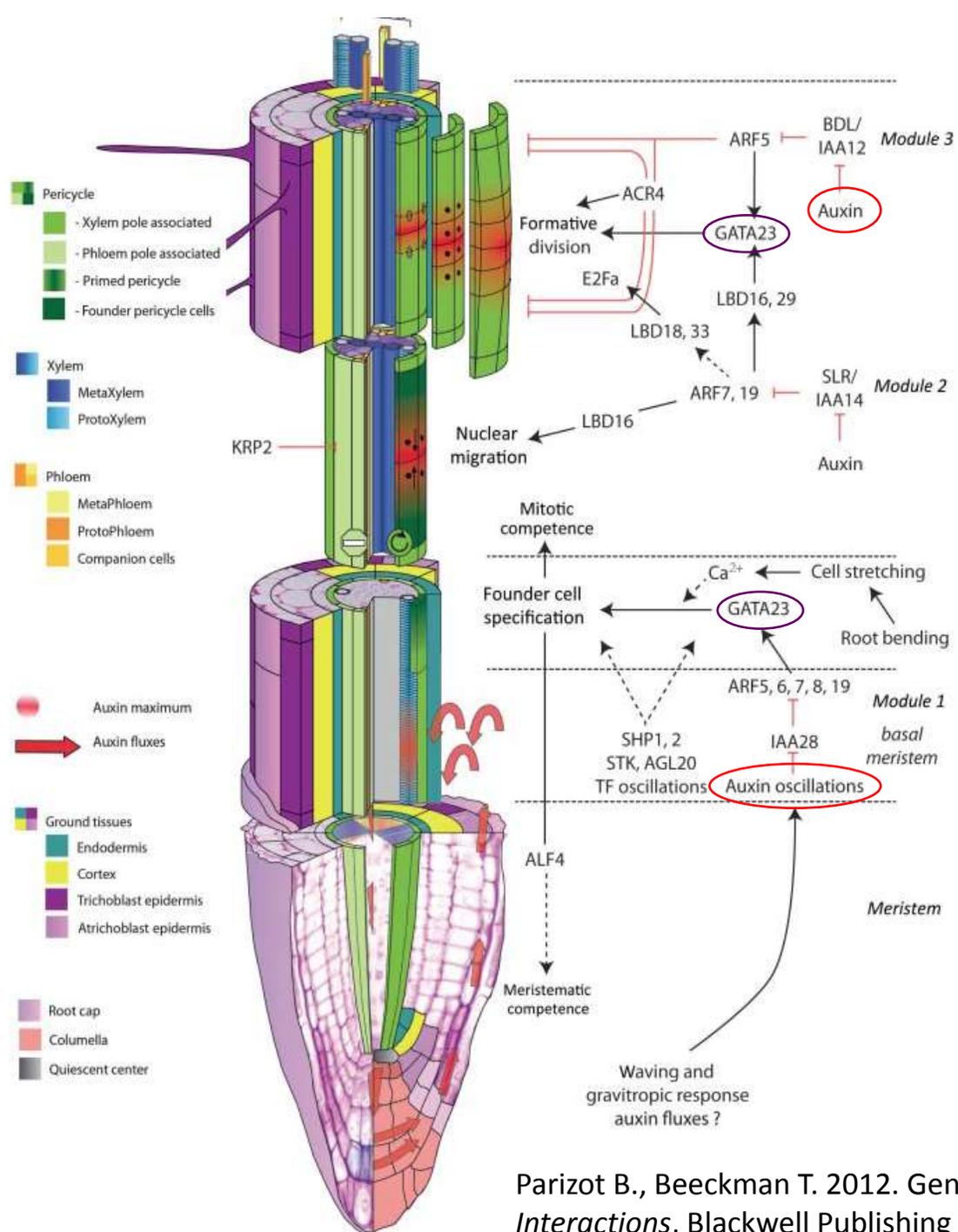
Генетические факторы разнообразия  
архитектуры корневых систем цветковых  
растений



Kentucky Blue Grass Lead Plant Missouri Goldenrod Indian Grass Compass Plant Porcupine Grass Heath Aster Prairie Cord Grass Big Blue Stem Pale Purple Prairie Dronseed Side Oats Gramma False Boneset Switch Grass White Wild Indigo Little Blue Stem Rosin Weed Purple Prairie June Grass Cylindric Blazing Star Buffalo Grass

# Ауксин – ключевой фактор регуляции ветвления корня





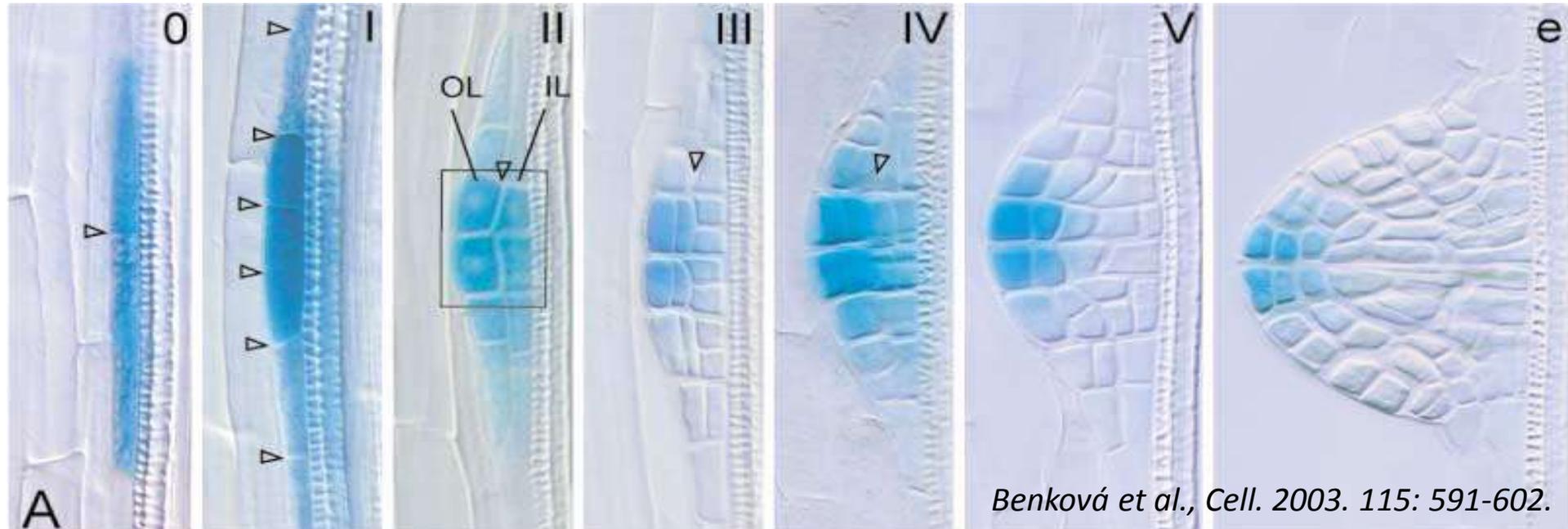
Ауксин играет важную роль на всех этапах развития бокового корня.

- Осцилляция ауксина приводит к изменению экспрессии генов, запускающих спецификацию клеток перикабла в клетки-основательницы бокового корня.
- Ауксин запускает синхронную миграцию ядер в клетках-основательницах.
- Правильное развитие примордия происходит за счет PIN-опосредованного распределения ауксина.

Транскрипционный фактор GATA23 –мишень ауксина, необходимый для спецификации клеток-основательниц в перикабле.

# Основные стадии инициации примордия бокового корня

DR5::GUS

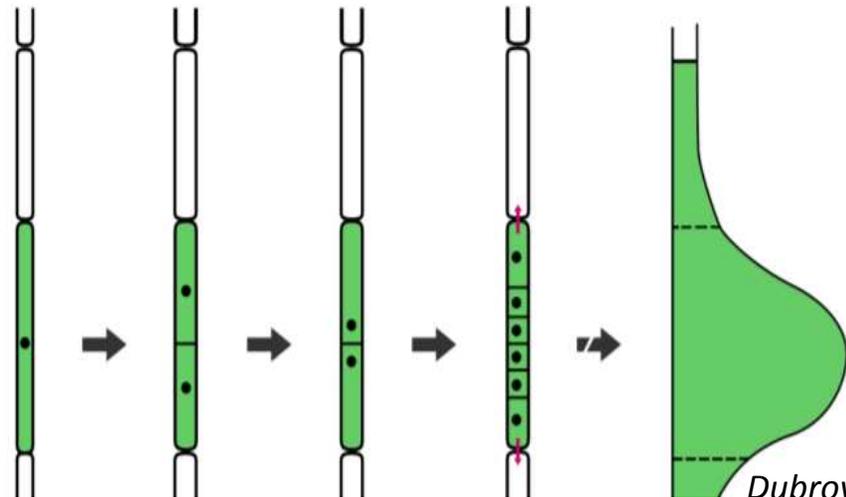


FC Specification

Stage 0 LRP

Stage I LRP

Stage VII LRP



Dubrovsky J.G.G. bioRxiv. 2018.

0

спецификация клеток-основательниц в перицикле материнского корня

I

первое антиклинальное (асимметричное) деление клеток-основательниц

II

периклиальные деление клеток перицикла и образование двух слоев

III-IV

дальнейшие периклиальные деления в слоях перицикла

V-VII

образование куполообразного примордия бокового корня

e (exit)

выход бокового корня на поверхность

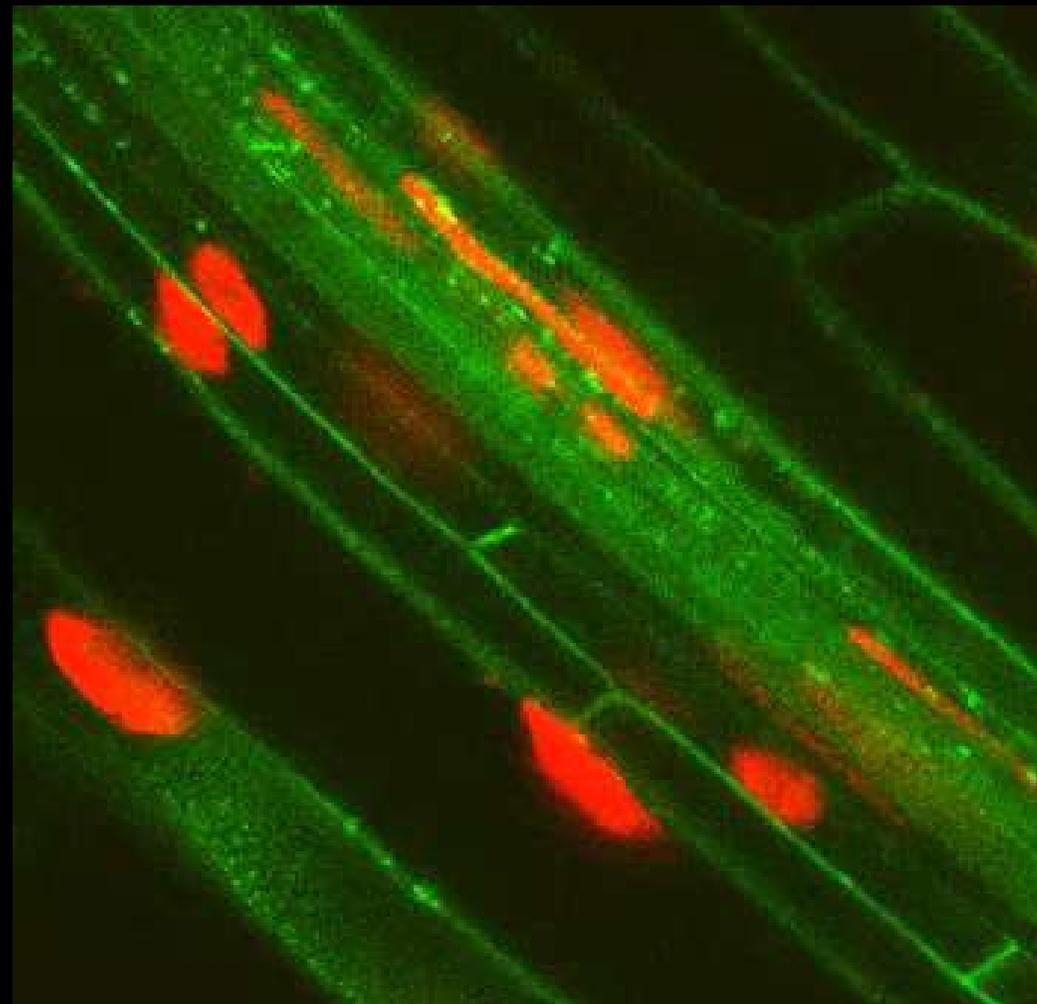
# Локализация клеточного ответа на ауксин при инициации бокового корня *Arabidopsis*

p35S::FH6-GFP - маркер мембраны

p35S::H2B-RFP - маркер ядер клеток

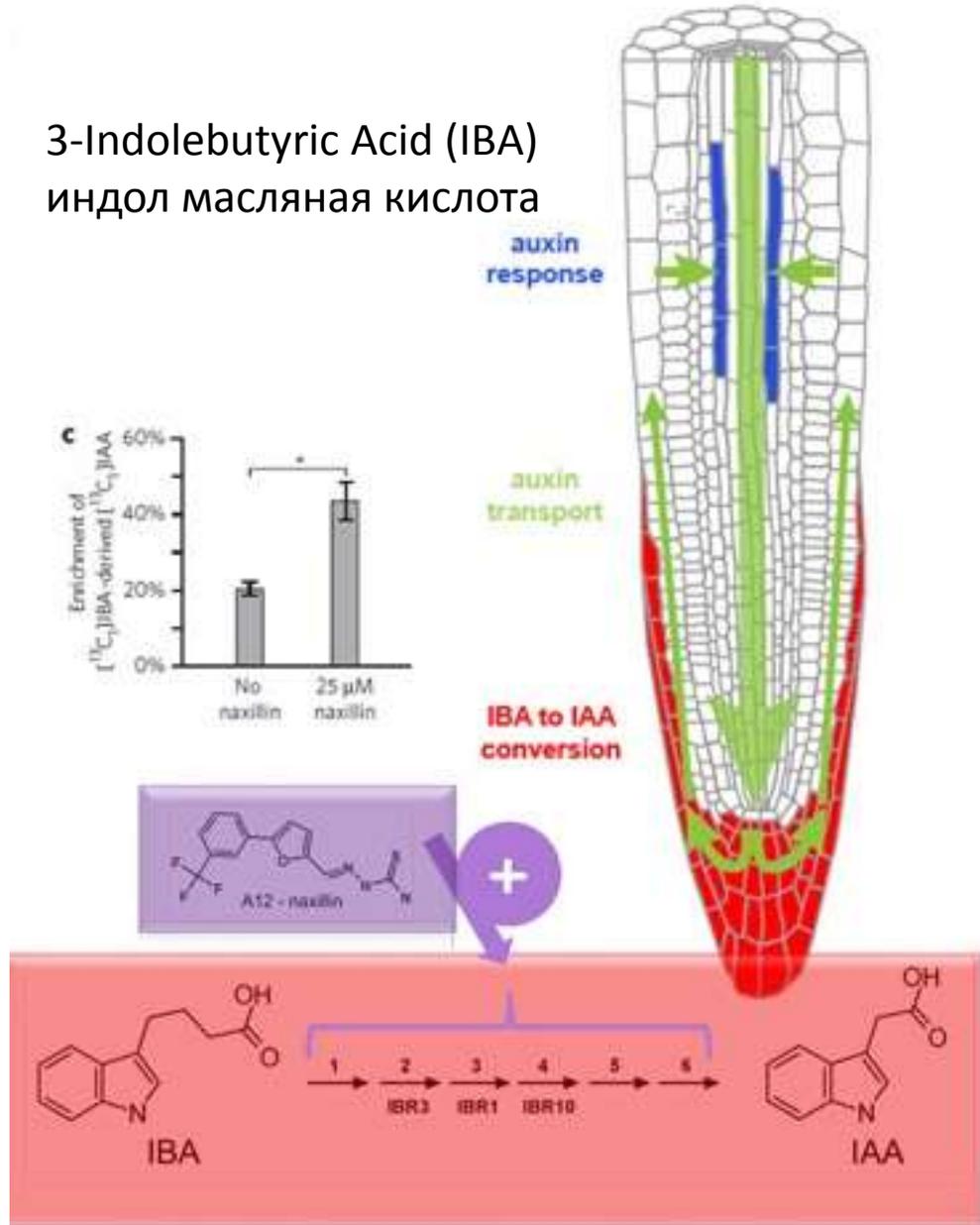
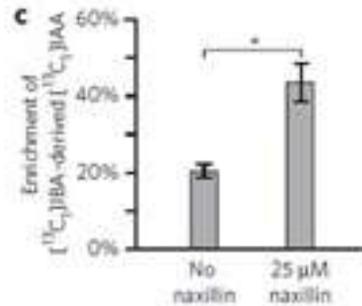
pDR5::GFP-NLS - клеточный ответ на ауксин

De Rybel et al. 2010. A Novel Aux/IAA28 Signaling Cascade Activates GATA23-Dependent Specification of Lateral Root Founder Cell Identity. *Current Biology*.



# Ауксин в апикальной меристеме корня

3-Indolebutyric Acid (IBA)  
индол масляная кислота

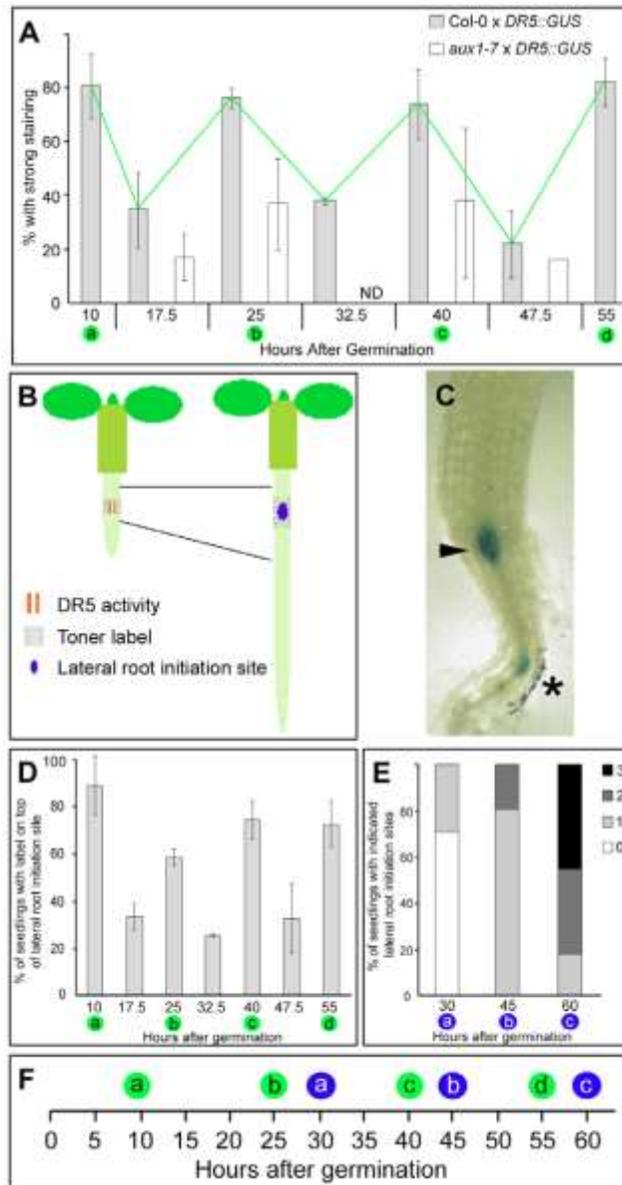


Индолилуксусная кислота, образующаяся в корневом чехлике из предшественника, индол-3-масляной кислоты, модулирует амплитуду осцилляции этого гормона в корне.

Осцилляция концентрации ауксина, в свою очередь, определяет создание зоны компетентности образования бокового корня (prebranch site).

De Rybel. A role for the root cap in root branching revealed by the non-auxin probe naxillin.  
*Nat Chem Biol.* 2012

# Осциляция клеточного ответа на ауксин при инициации бокового корня



## Regular lateral root spacing and oscillation in DR5::GUS activity in the basal meristem

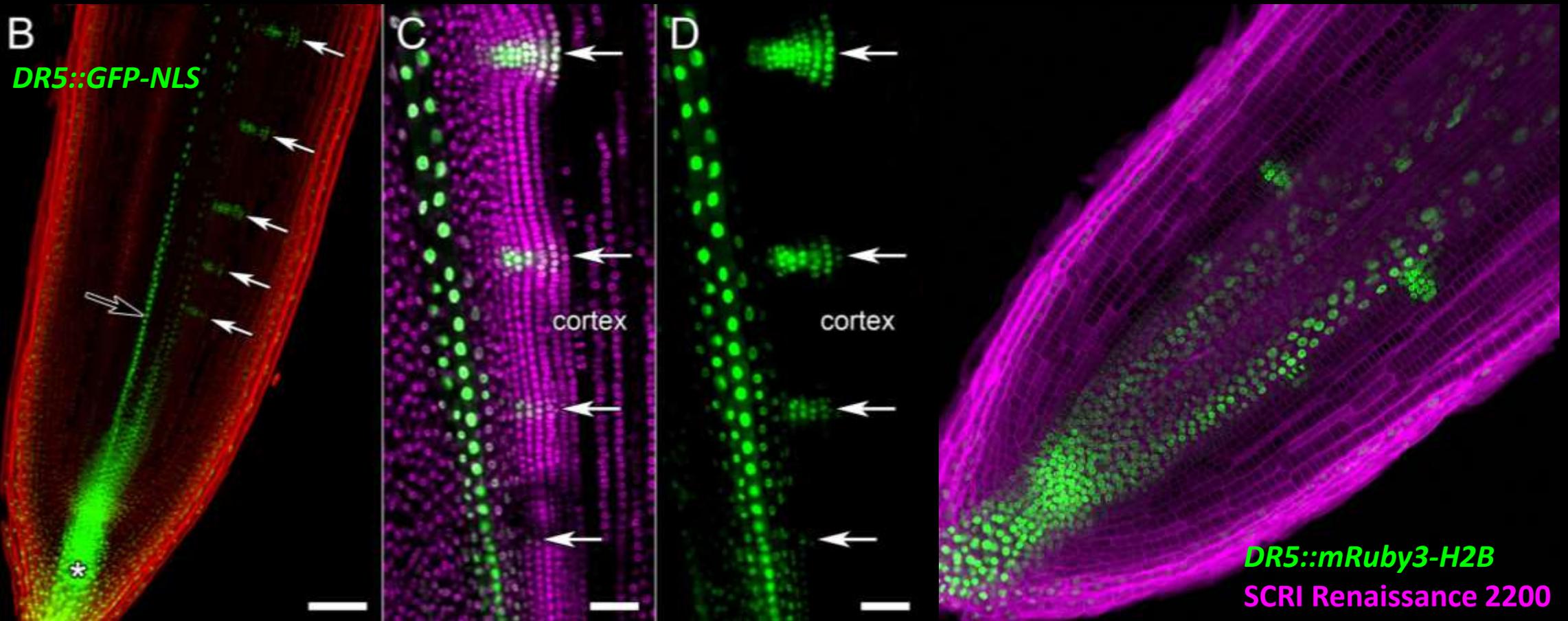
(A) *DR5::GUS*-activity in a 7.5-hour time course in Col-0 (gray) and *aux1-7* (white) expressed as percentage of seedlings with strong GUS staining at each time point. The green line highlights the oscillation in DR5 activity in Col-0. Labels a-d (green circles) mark the time points with high DR5 activity.

De Smet et al. 2007. Auxin-dependent regulation of lateral root positioning in the basal meristem of Arabidopsis. *Development*. 134(4): 681-690.

# Паттерн клеточного ответа на ауксин при инициации бокового корня

*Cucurbita pepo* – кабачок

*Cucumis sativus* – огурец

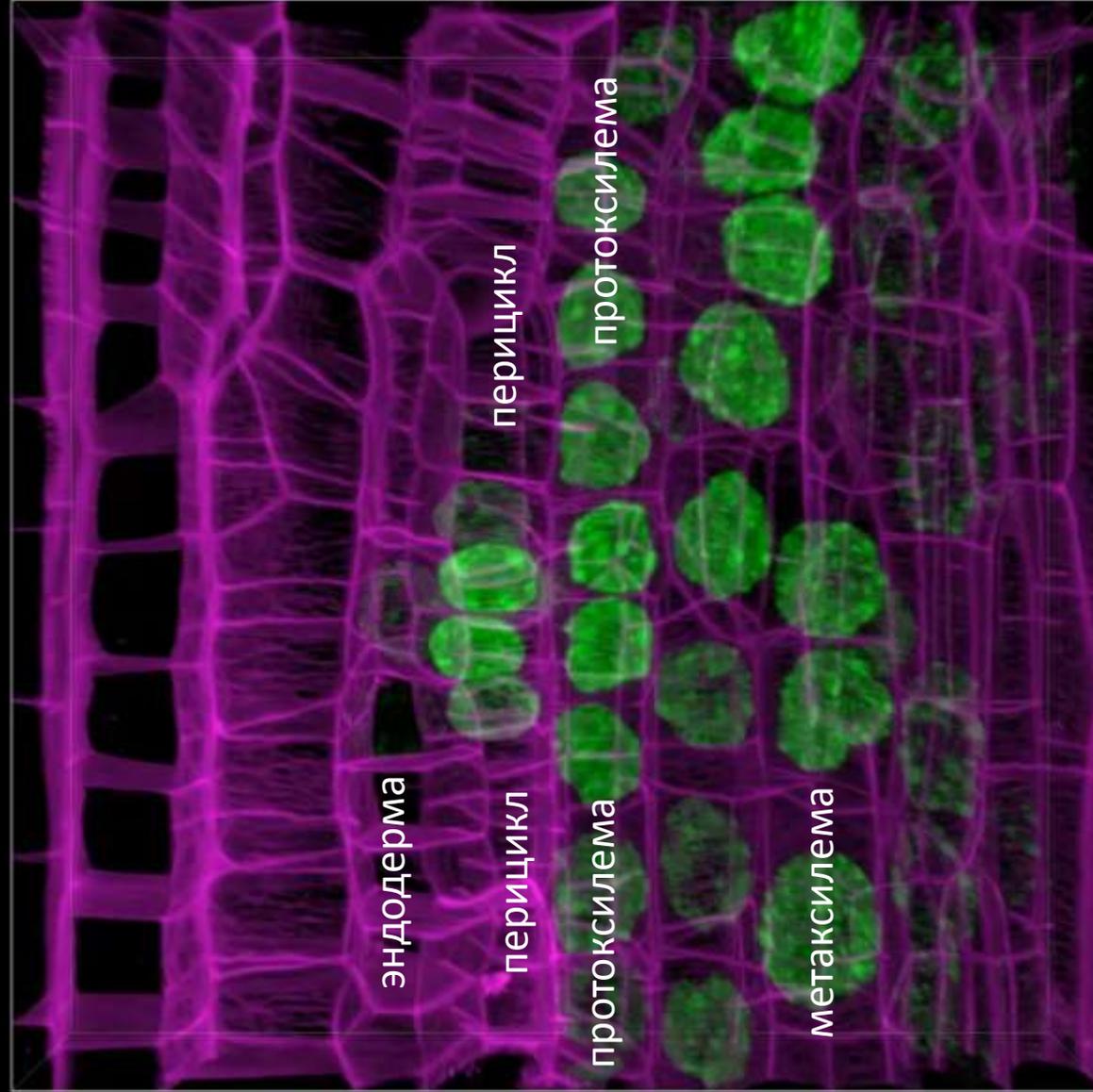


Ilinca et al. 2018. Lateral root initiation and formation within the parental root meristem of *Cucurbita pepo*: is auxin a key player? *Annals of Botany*. 121: 1-16.

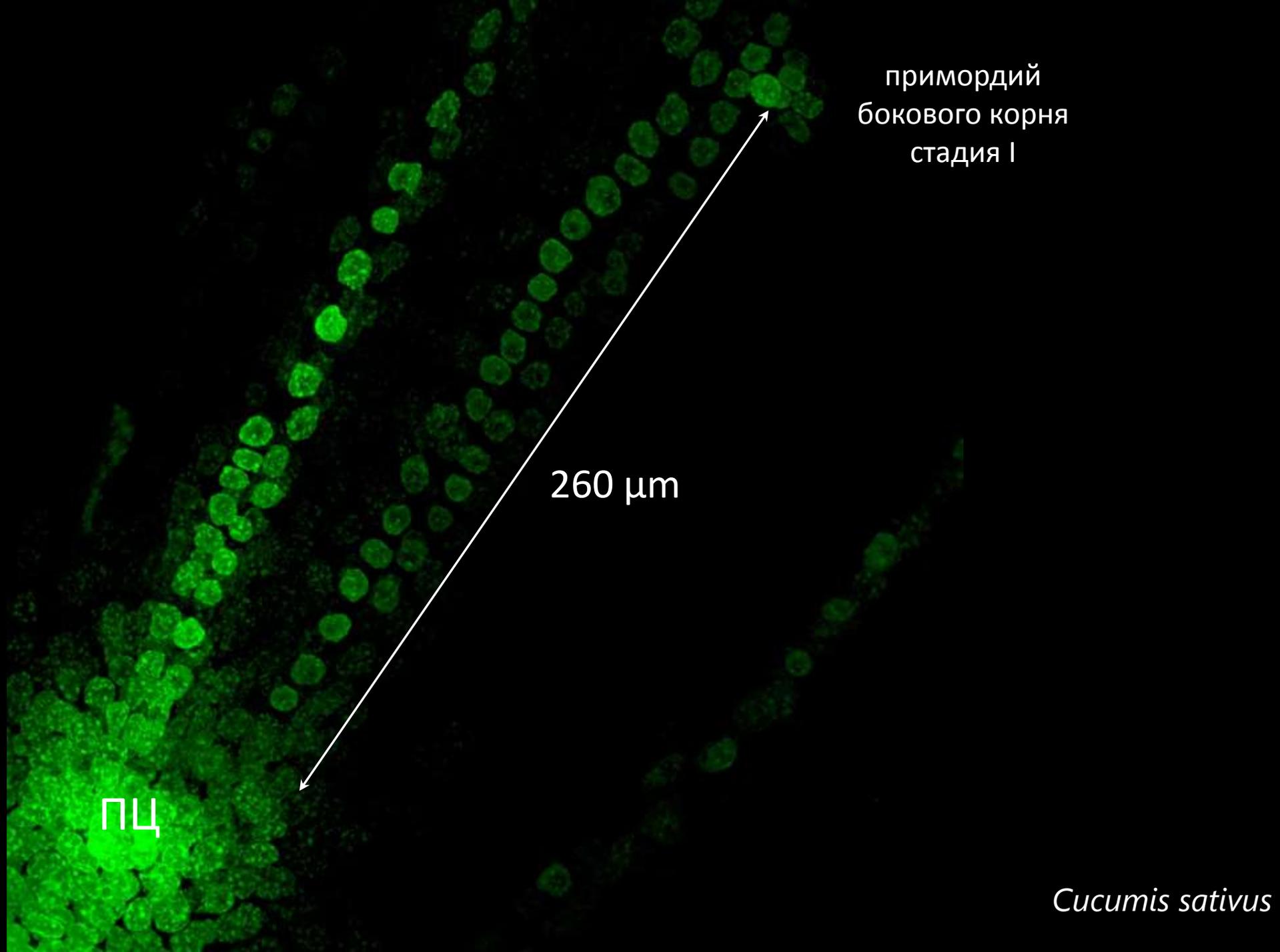
Максимумы ответа на ауксин локализованы в примордиях бокового корня

**DR5::mRuby3-H2B**

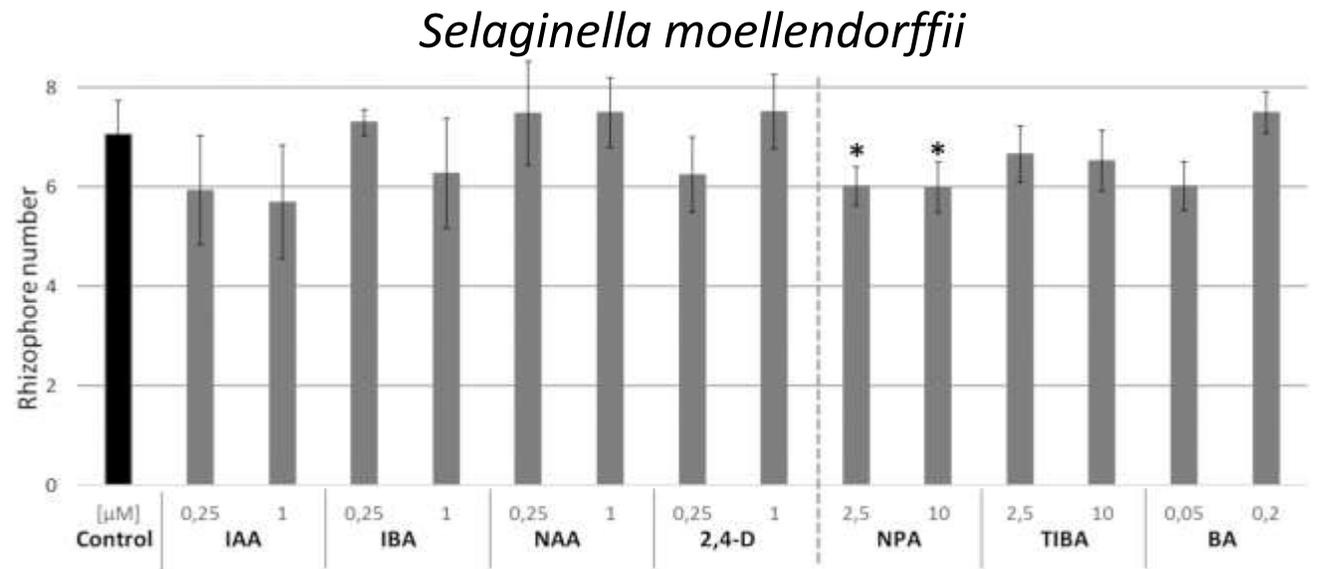
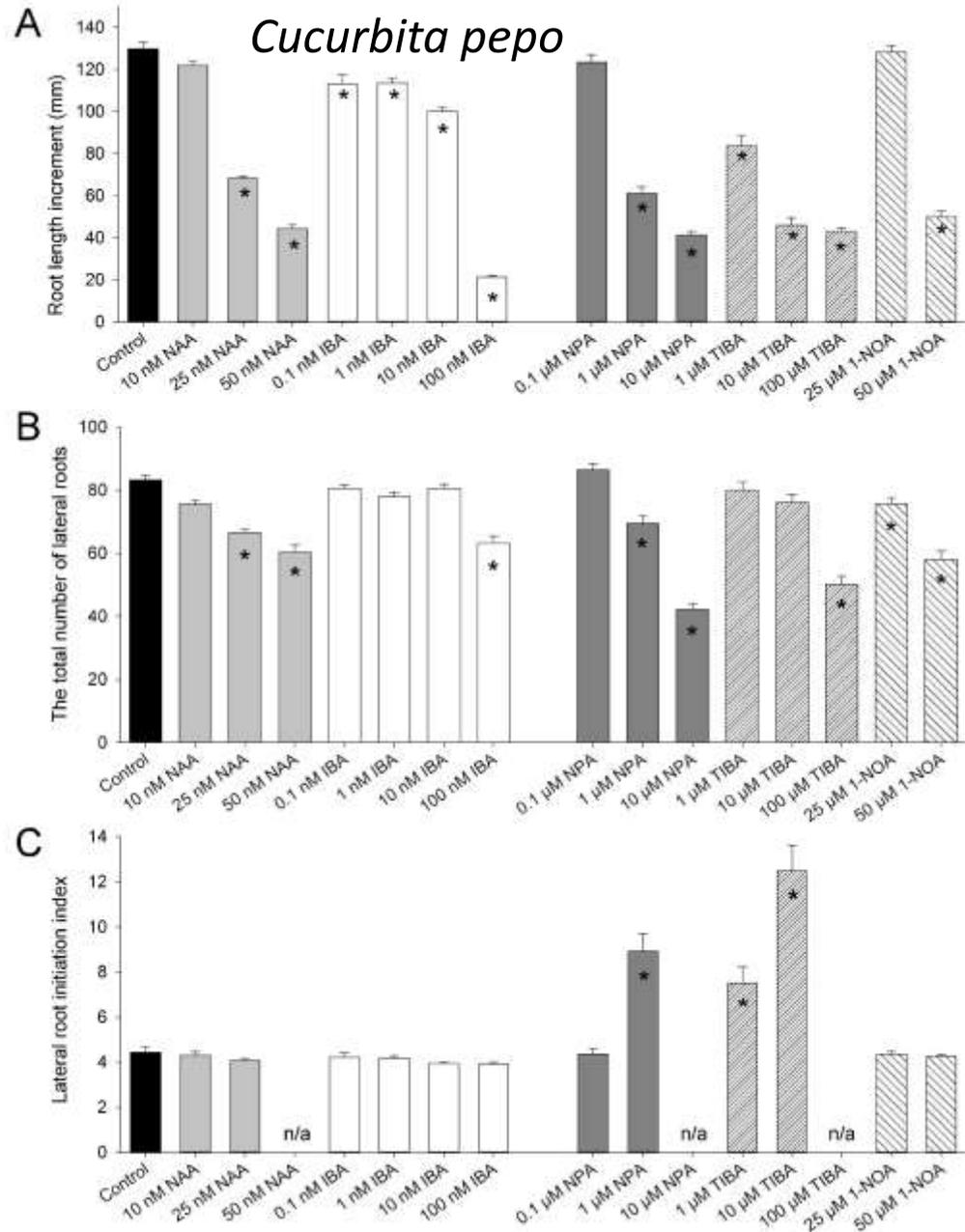
**SCRI Renaissance 2200**



*Cucumis sativus*

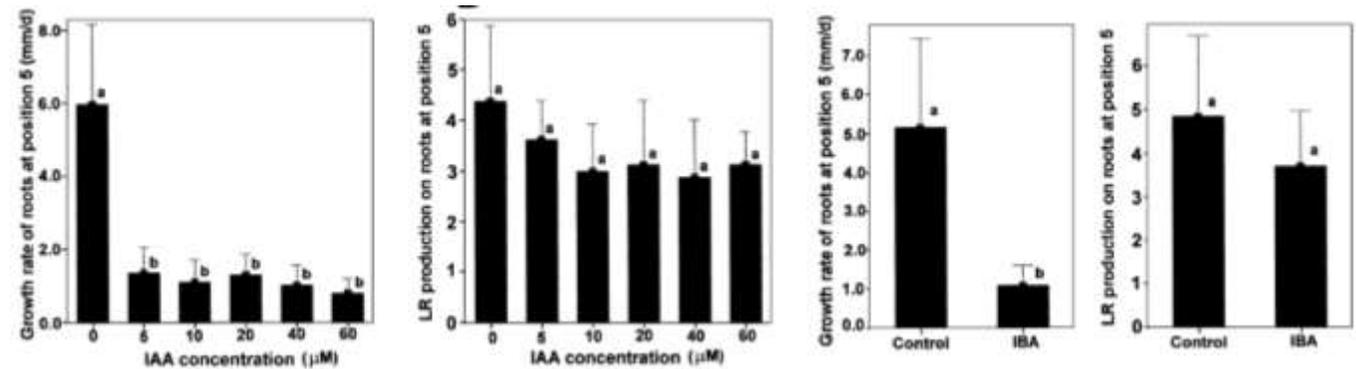


# Экзогенный ауксин в инициации бокового корня



Fang T., Motte H., Parizot B., Beeckman T. Root branching is not induced by auxins in *Selaginella moellendorffii*. *Frontiers in Plant Science*. 2019

## *Ceratopteris richardii*



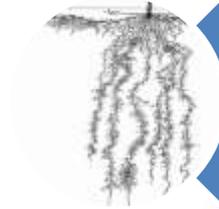
Hou G., Hill J.P., Blancaflor E.B. Developmental anatomy and auxin response of lateral root formation in *Ceratopteris richardii*. *Journal of Experimental Botany*. 2004.



# IX

## СЪЕЗД ОБЩЕСТВА ФИЗИОЛОГОВ РАСТЕНИЙ

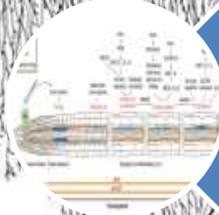
<https://congresskazan2019.ofr.su>



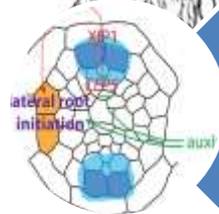
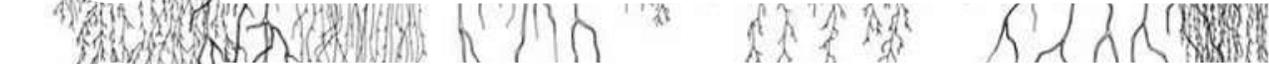
Разнообразие ветвления корней  
наземных растений



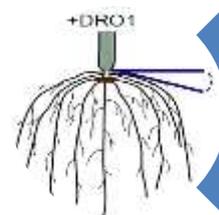
Роль ауксина, как ключевого фактора  
инициации ветвления



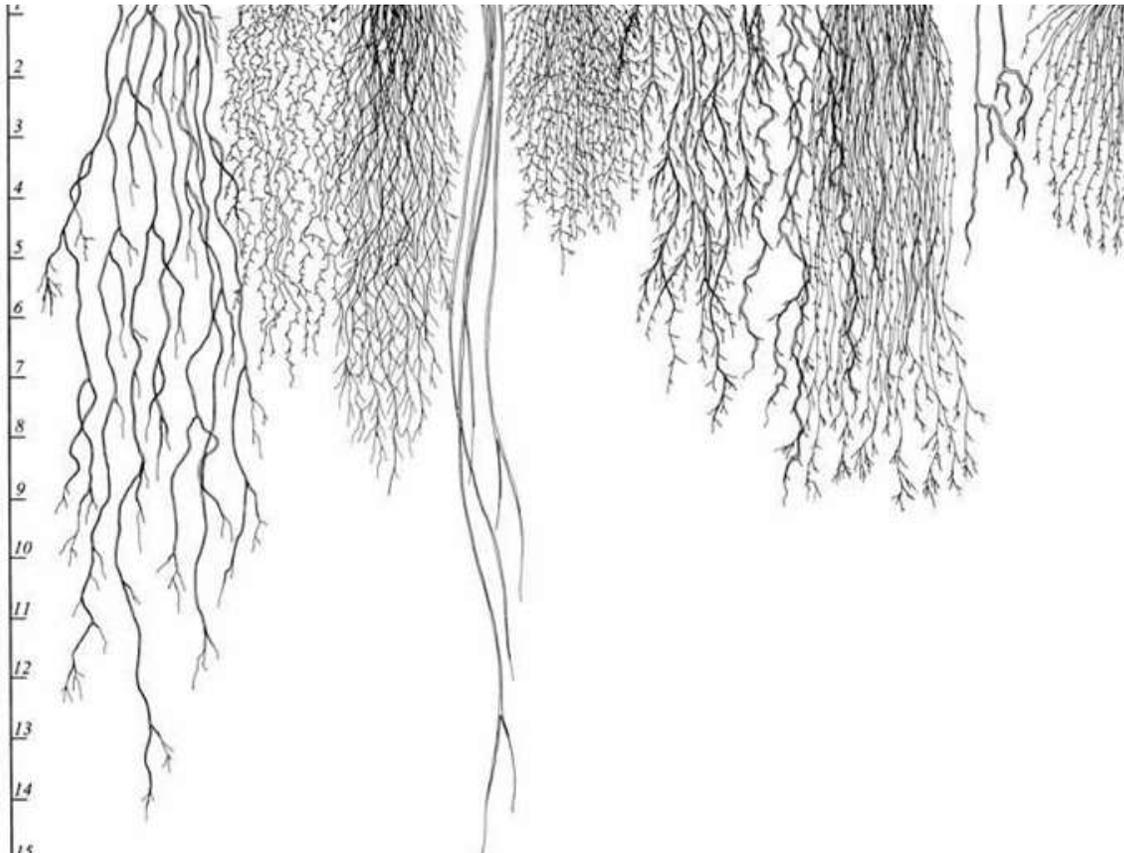
**Мишени ауксина при инициации  
бокового корня. Основные генные сети и  
модули**



Роль малых сигнальных пептидов в  
регуляции ветвления

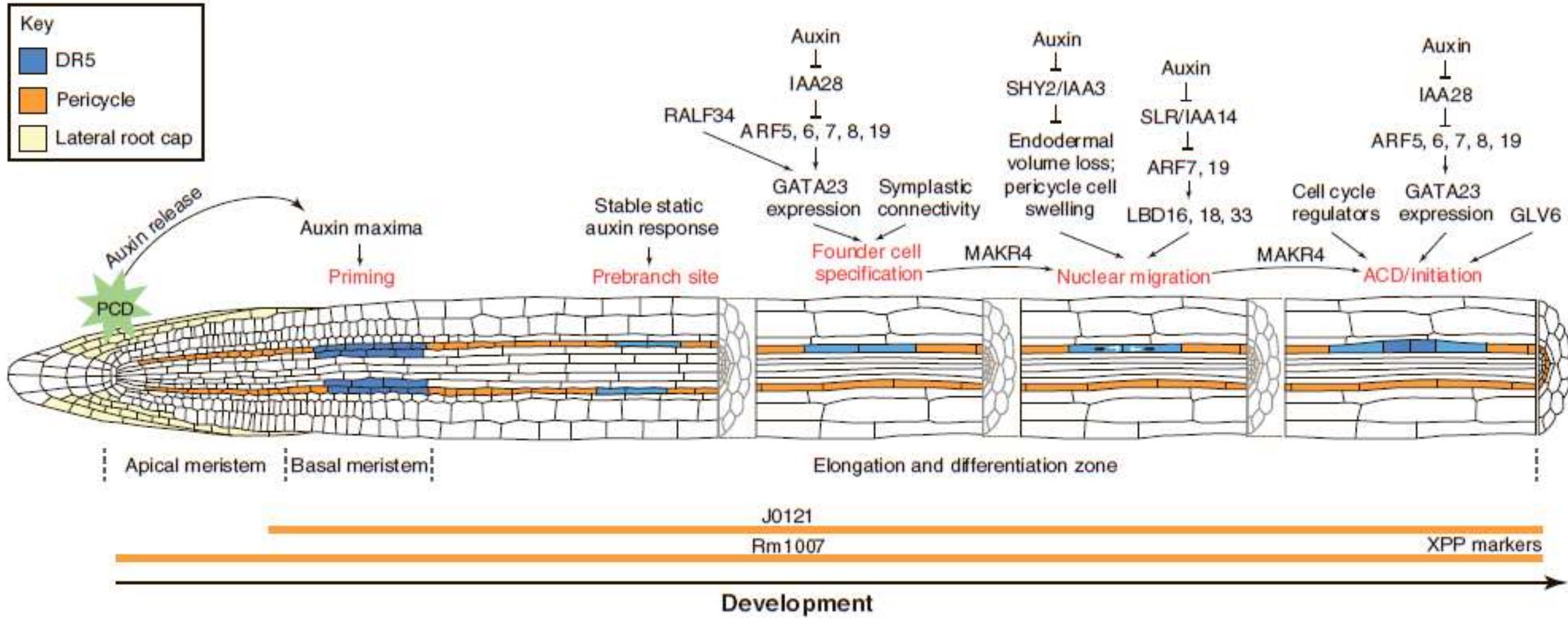


Генетические факторы разнообразия  
архитектуры корневых систем цветковых  
растений



Kentucky Blue Grass Lead Plant Missouri Goldenrod Indian Grass Compass Plant Porcupine Grass Heath Aster Prairie Cord Grass Big Blue Stem Pale Purple Prairie Dronseed Side Oats Gramma False Boneset Switch Grass White Wild Indigo Little Blue Stem Rosin Weed Purple Prairie June Grass Cylindric Blazing Star Buffalo Grass

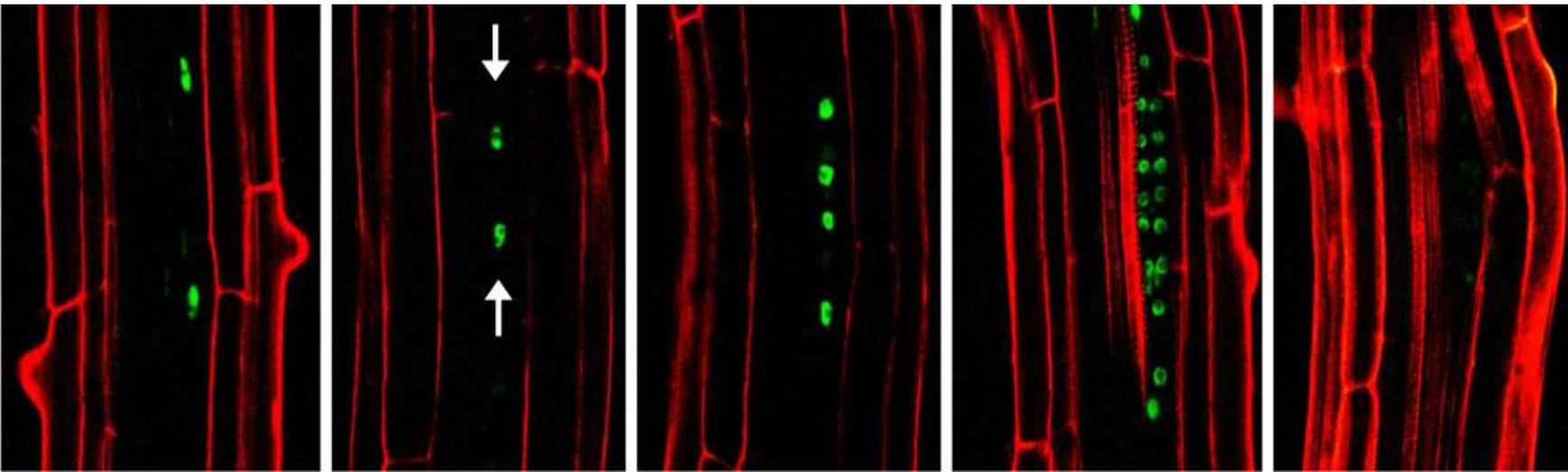
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1  
1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15



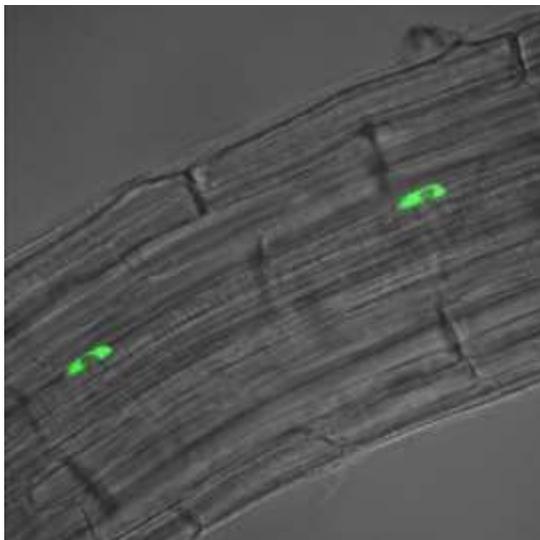
Trinh C.D., Laplaze L., Guyomarc'h S. Lateral root formation: building a meristem *de novo*. *Annual Plant Reviews*. 2018.

# Идентификация регуляторных факторов инициации бокового корня

## Транскрипционный фактор *GATA23* – мишень ауксина



В настоящее время, экспрессия гена *GATA23* считается наиболее ранним событием, связанным с инициацией примордия бокового корня.

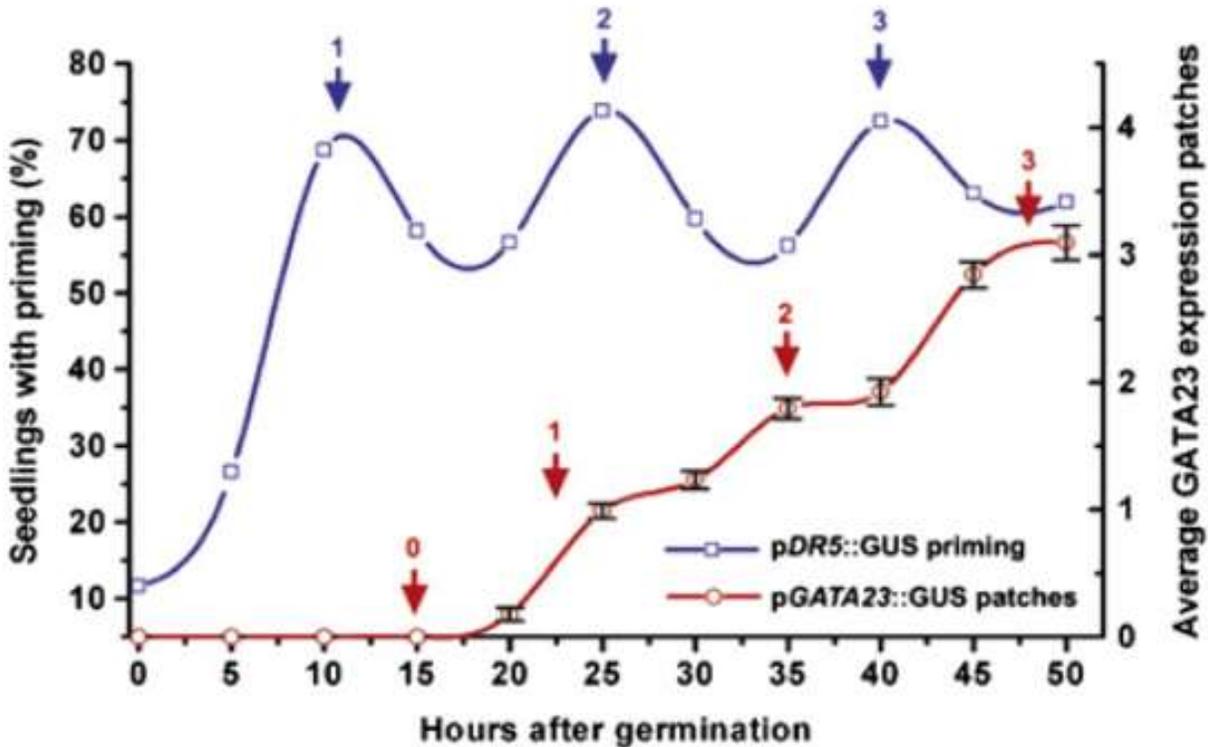


*GATA23* первый молекулярный компонент спецификации клеток-основательниц и компонент сигнальной системы TIR1–IAA28.

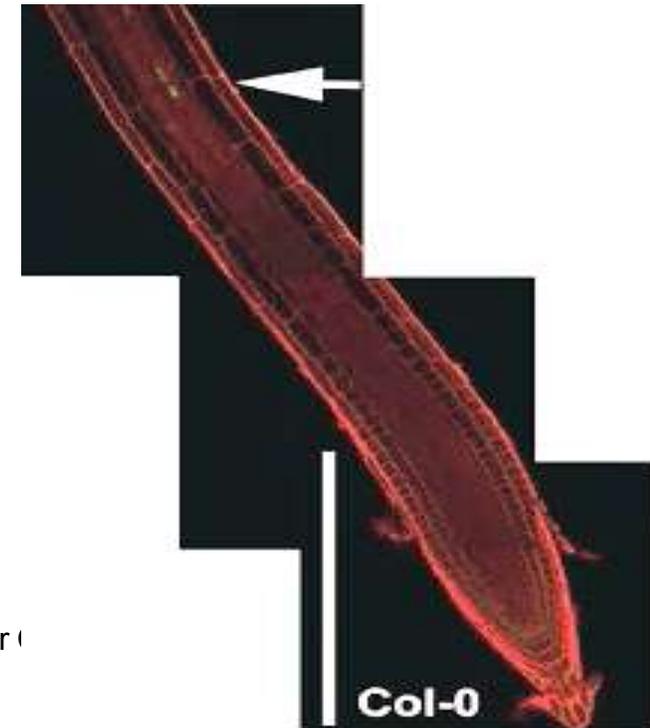
Возможно, он формирует компетенцию клеток перицикла на ксилемном полюсе в базальной части меристемы к инициации бокового корня.

De Rybel B. et al. A Novel Aux/IAA28 Signaling Cascade Activates *GATA23*-Dependent Specification of Lateral Root Founder Cell Identity. *Current Biology*. 2010. 20(19): 1697-1706.

# Идентификация регуляторных факторов инициации бокового корня



В пределах базальной части меристемы в клетках протоксилемы осциллирующие пики активности pDR5 и сопутствующая локальная экспрессия *GATA23* в клетках перицикла ксилемного полюса начинается через 10 ч после пика ответа на ауксин, что приблизительно равно длительности митотического цикла.



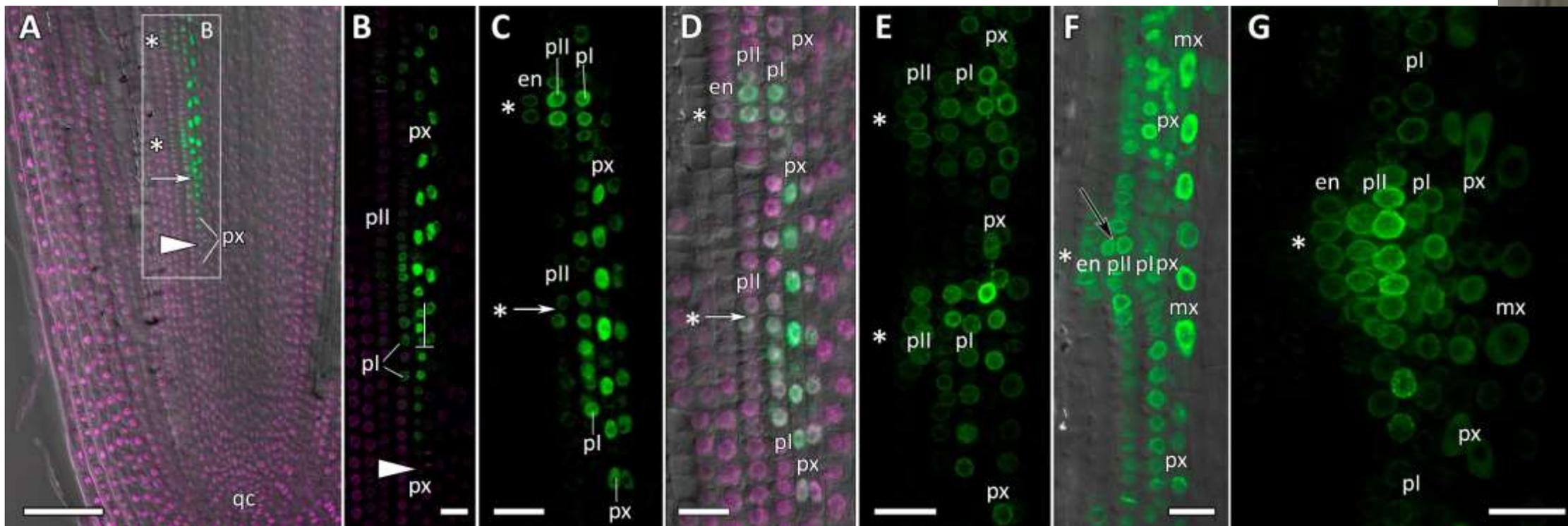
Экспрессия *GATA23* зависит от TIR1-опосредованного пути передачи ауксинового сигнала в базальной части меристемы

# Локализация активности промотора гена *GATA24* в кончике корня кабачка (*Cucurbita pepo*)



*GATA24 Cucurbita pepo* – ортолог *GATA23 Arabidopsis thaliana*

*CpGATA24::NeonGreen-H2B*

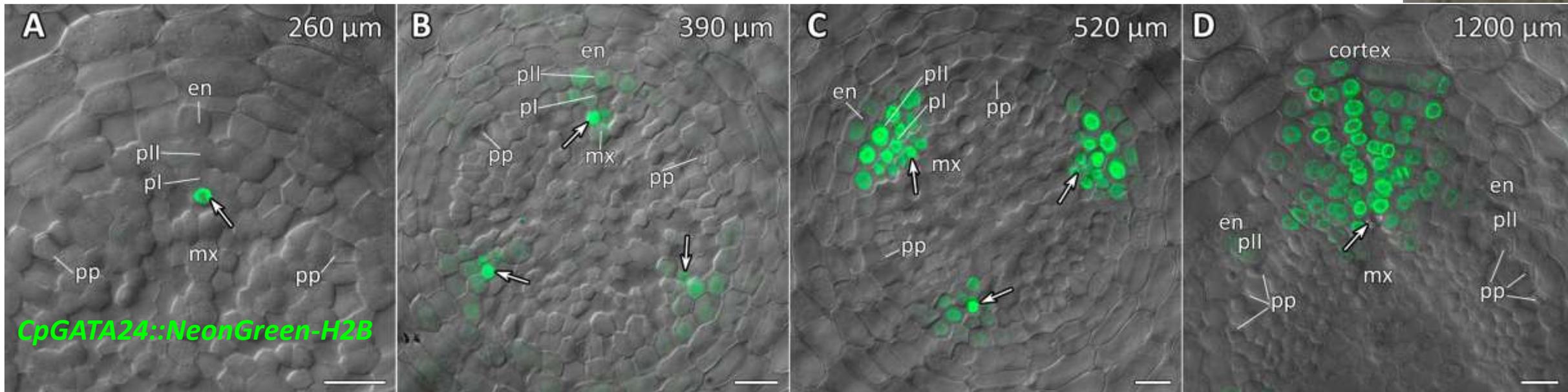


Промотор гена *CpGATA* активен в рядах протоксилемы, перицикла и эндодермы в зоне инициация примордиев бокового корня кабачка. Экспрессия активируется на удалении 250-350 мкм от инициальных клеток рядов и заканчивается на удалении 2.5-3 мм от кончика корня.

# Локализация активности промотора гена *GATA24* в кончике корня кабачка (*Cucurbita pepo*)



***GATA24 Cucurbita pepo* – ортолог *GATA23 Arabidopsis thaliana***



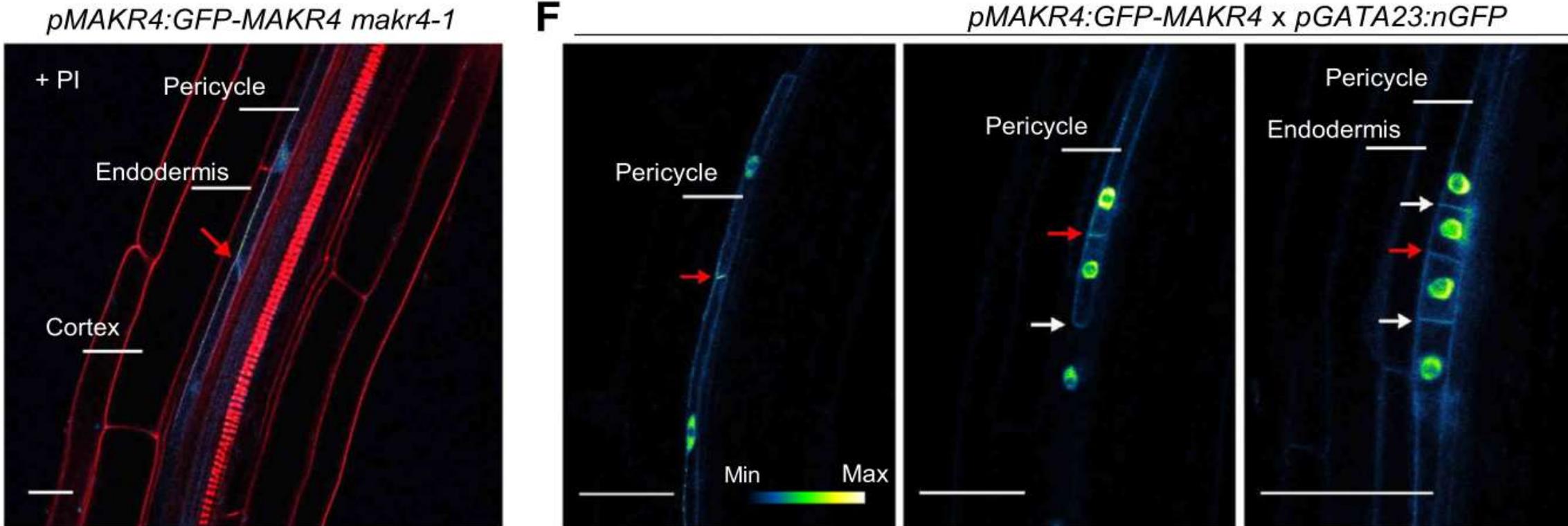
Промотор гена *CpGATA* активен в рядах протоксилемы, перицикла и эндодермы в зоне инициация примордиев бокового корня кабачка. Экспрессия активизируется на удалении 250-350 мкм от инициальных клеток рядов и заканчивается на удалении 2.5-3 мм от кончика корня.

Kiryushkin A.S., Ilina E.L., Puchkova V.A., Guseva E.D., Pawlowski K., Demchenko K.N. Lateral root initiation in the parental root meristem of cucurbits: Old players in a new position. *Frontiers in Plant Science*. 2019.



# Идентификация регуляторных факторов инициации бокового корня

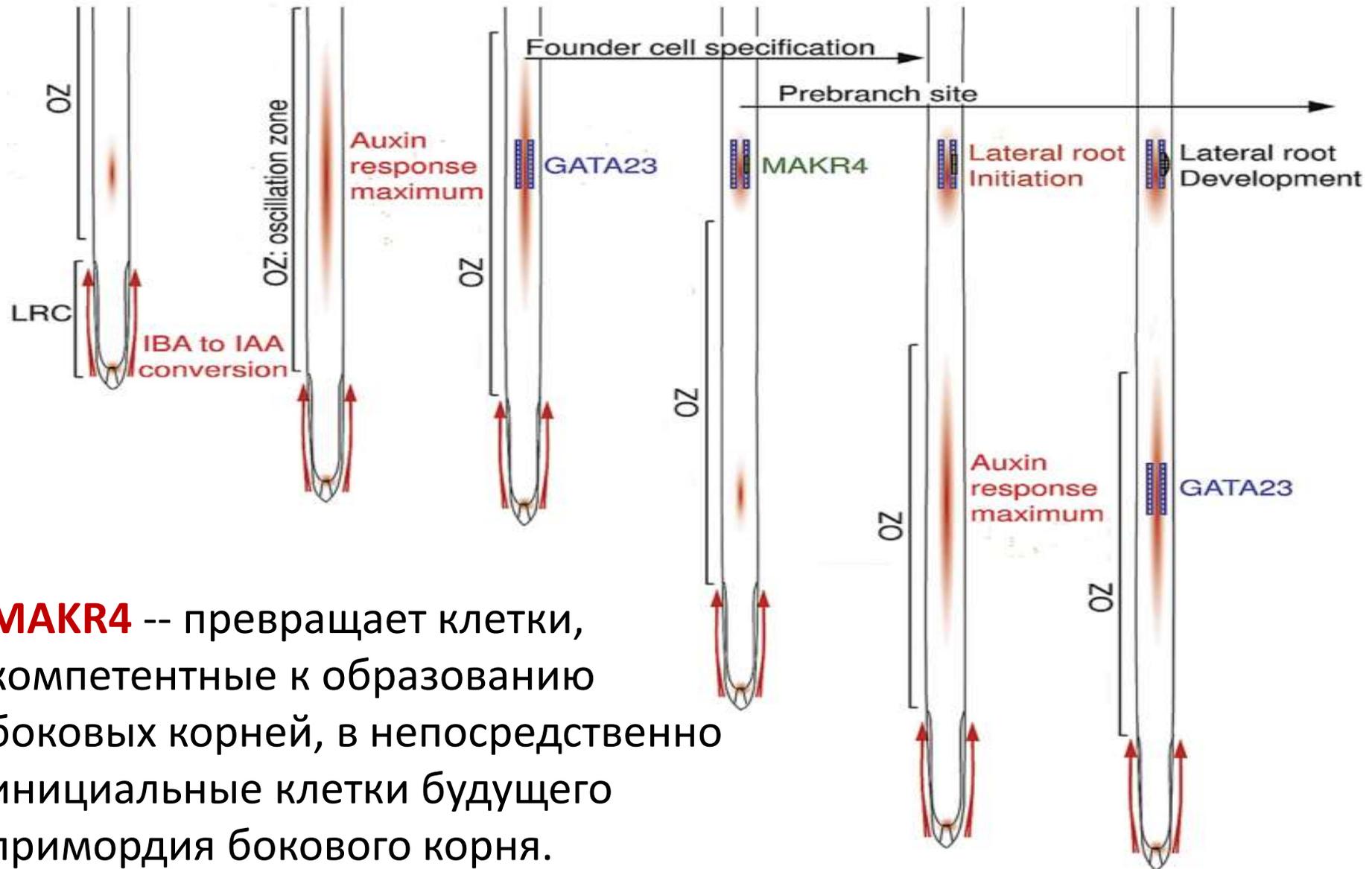
## *MEMBRANE-ASSOCIATED KINASE REGULATOR4 (MAKR4)*



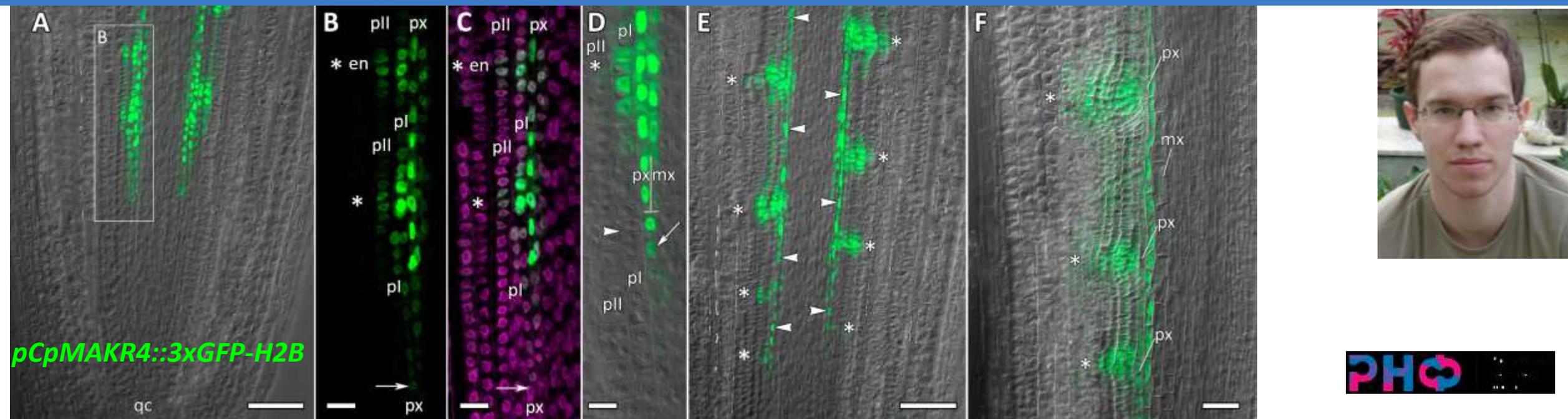
### **MAKR4 – компонент спецификации клеток – мишень индол-3-масляной кислоты**

Xuan W., Audenaert D., Parizot B., Möller B.K., Njo Maria f., De rybel B., De rop G., Van isterdael G., Mähönen Ari p., Vanneste S., Beeckman T. Root cap-derived auxin pre-patterns the longitudinal axis of the Arabidopsis root. *Current Biology*. 2015. 25(10): 1381-1388.

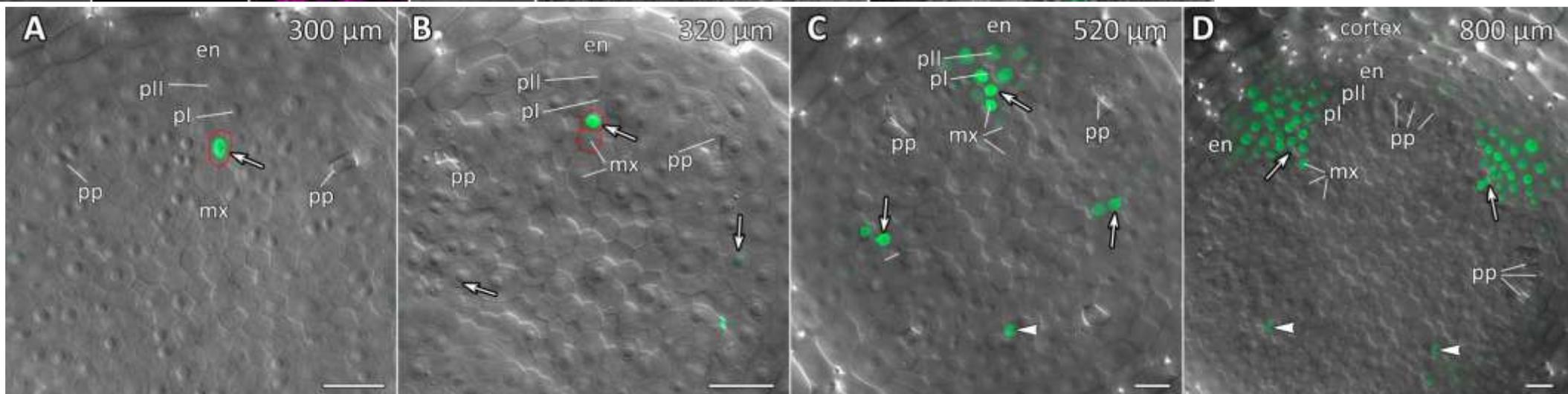
# Идентификация регуляторных факторов инициации бокового корня



# Активность промотора гена *MAKR4* в корне кабачка (*Cucurbita pepo*)

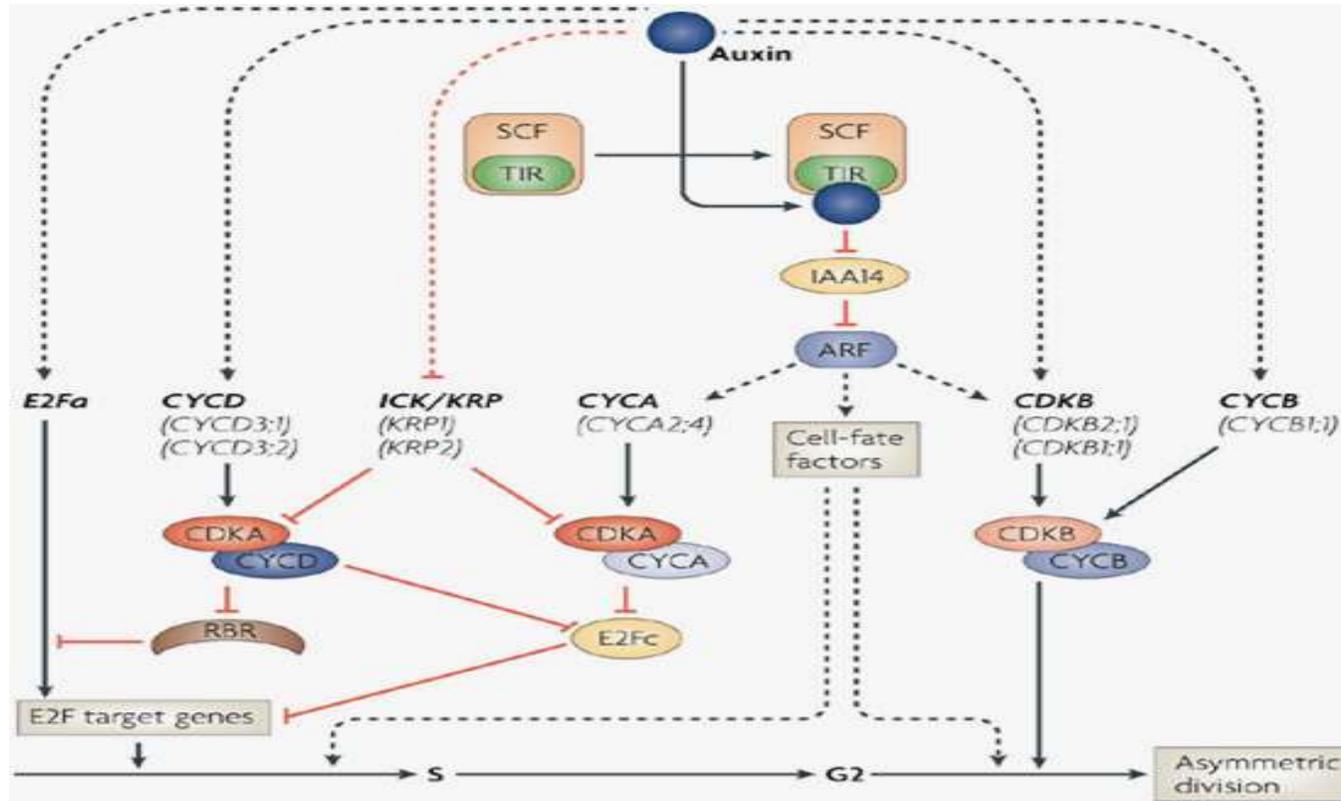


Начало экспрессии *MAKR4* в клетках протоксилемы, в среднем, на удалении 250 мкм от инициалей рядов



Kiryushkin A.S., Ilina E.L., Puchkova V.A., Guseva E.D., Pawlowski K., Demchenko K.N. Lateral root initiation in the parental root meristem of cucurbits: Old players in a new position. *Frontiers in Plant Science*. 2019.

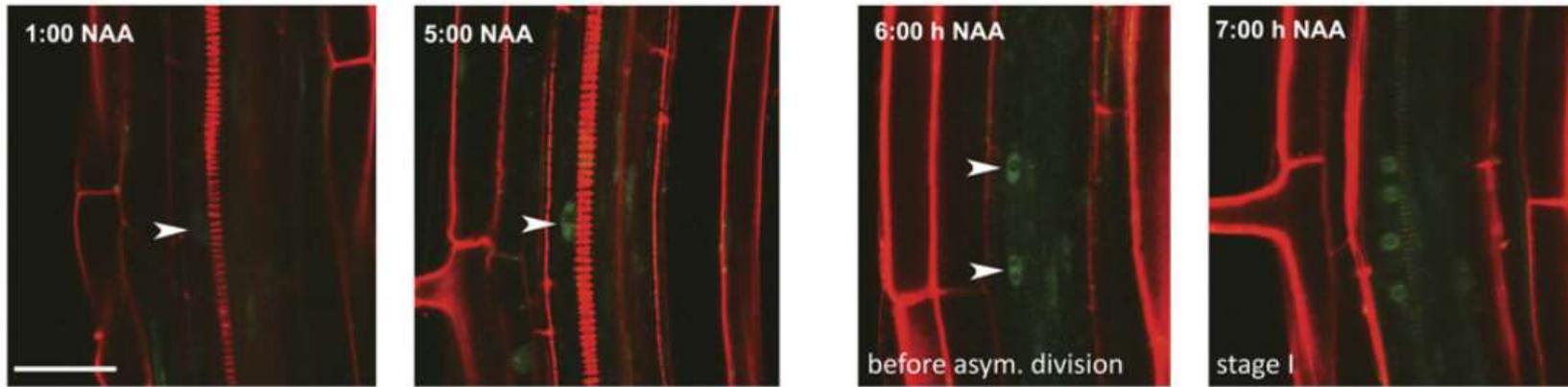
# Контроль начала пролиферации клеток при инициации бокового корня



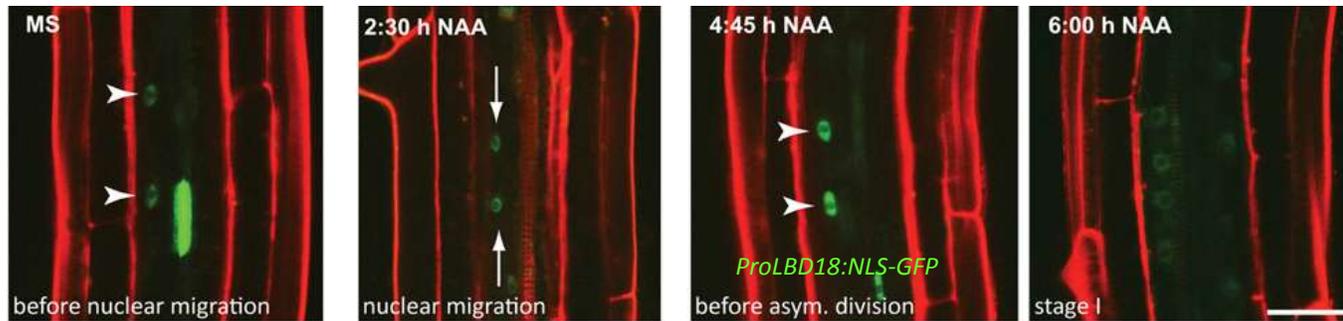
De Veylder L., Beeckman T., Inze D. The ins and outs of the plant cell cycle. *Nat Rev Mol Cell Biol.* 2007.

Переход отдельных клеток перицикла на ксилемном полюсе выше зоны растяжения из стадии G1 в стадию S (возобновление пролиферации) и последующее их деление стимулируется ауксином. Эти клетки возобновляют продвижение по митотическому циклу, только когда достигают зоны инициации боковых корней.

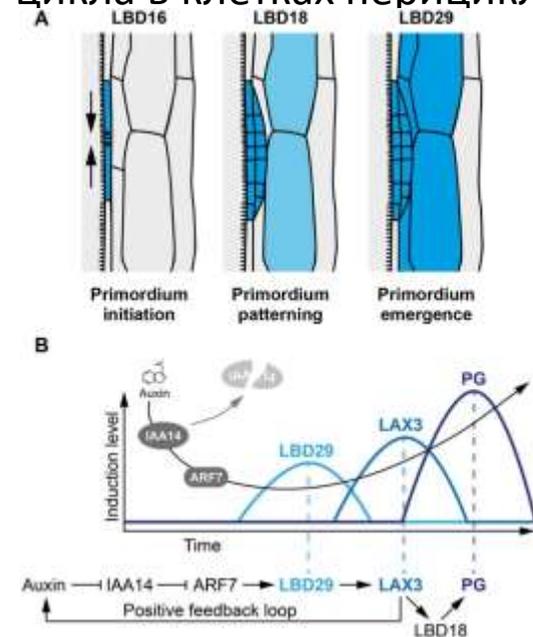
# Контроль начала пролиферации клеток при инициации бокового корня



У *Arabidopsis* **ауксин** запускает не только процесс спецификации клеток перцикла, которые в будущем дадут начало примордию бокового корня, но также и процесс активации митотического цикла в клетках перцикла.



LBD18 binds the E2Fa promoter and is induced upon lateral root initiation

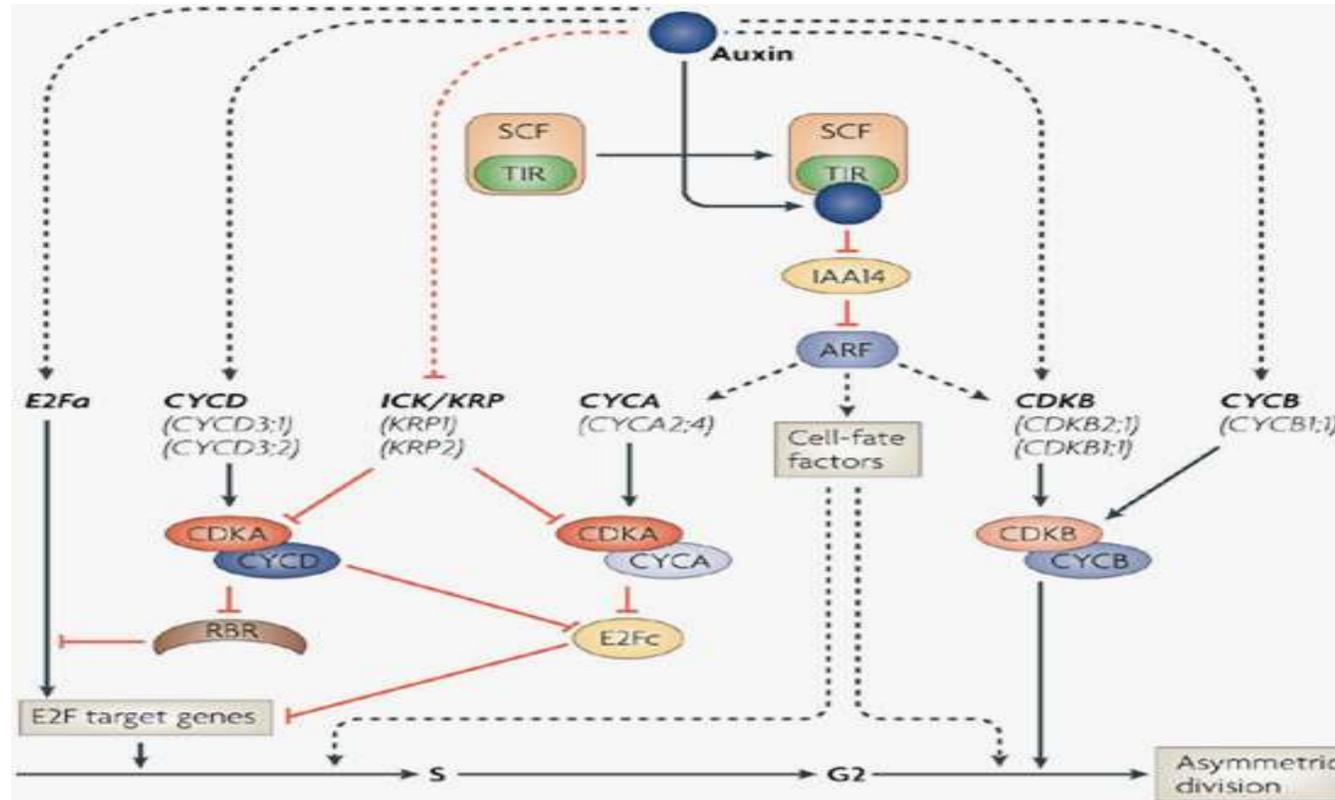


Berckmans et al.

Auxin-Dependent Cell Cycle Reactivation through Transcriptional Regulation of Arabidopsis E2Fa by Lateral Organ Boundary Proteins. *Plant Cell*. 2011.

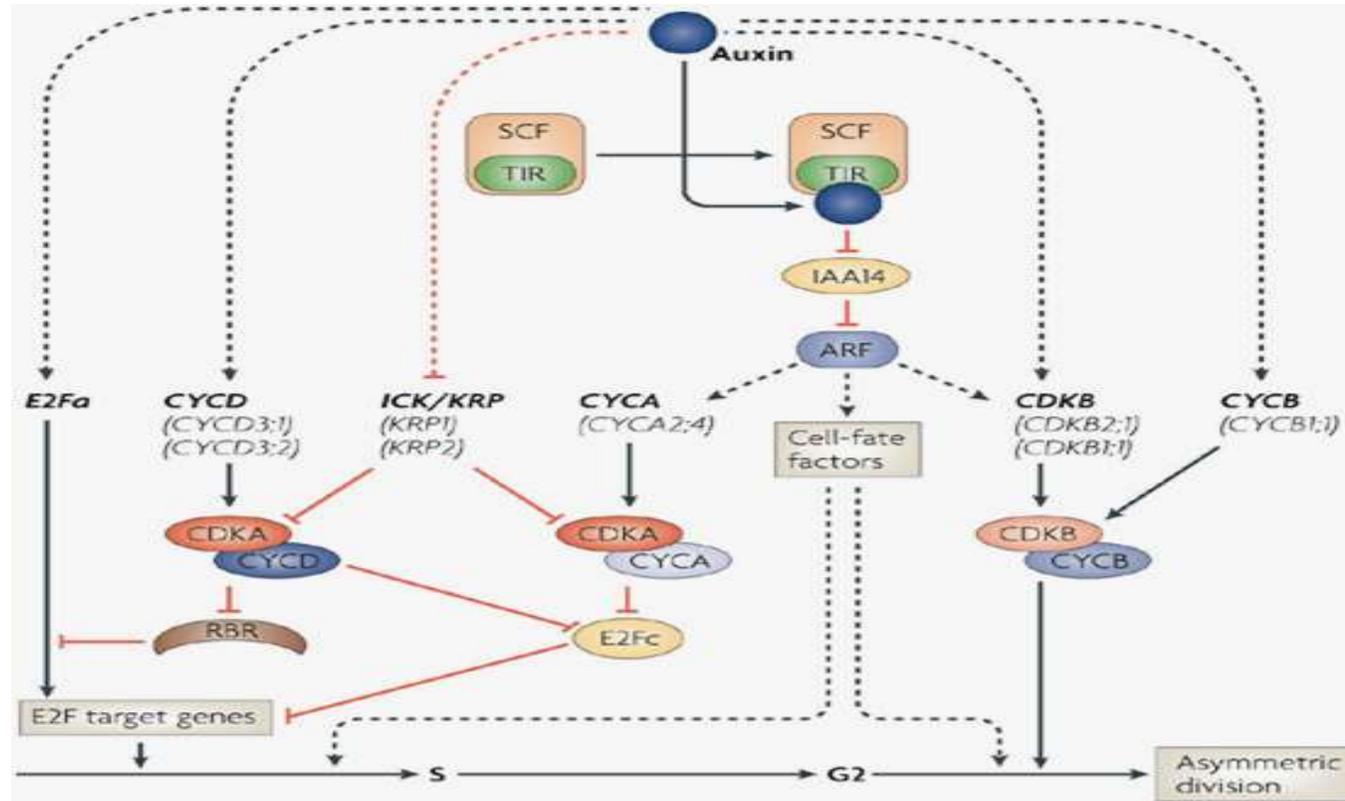
# Контроль начала пролиферации клеток при инициации бокового корня

E2F transcription factor a, retinoblastoma-binding protein



Транскрипционный фактор E2F стимулирует переход к клеточным делениям в процессе инициации бокового корня. Экспрессия *E2Fa* регулируется димером транскрипционных факторов LBD18–LBD33, который, в свою очередь, регулируется передачей ауксинового сигнала. Таким образом, запуск транскрипции *E2Fa* с помощью транскрипционных факторов LBD является общим механизмом ауксин-зависимой активации митотического цикла

# Контроль начала пролиферации клеток при инициации бокового корня



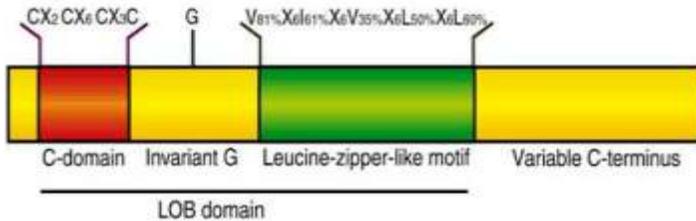
Комплексы **СУСВ1, СУСА2 и CDKA**, позволяют клеткам перицикла на **КСИЛЕМНОМ** полюсе, вышедшим из цикла в конце меристемы в стадии G1 приступить к фазе S

PICKLE interacts with RETINOBLASTOMA-RELATED 1 (RBR1) to repress the LATERAL ORGAN BOUNDARIES-DOMAIN 16 (LBD16) promoter activity

# Контроль начала пролиферации клеток при инициации бокового корня

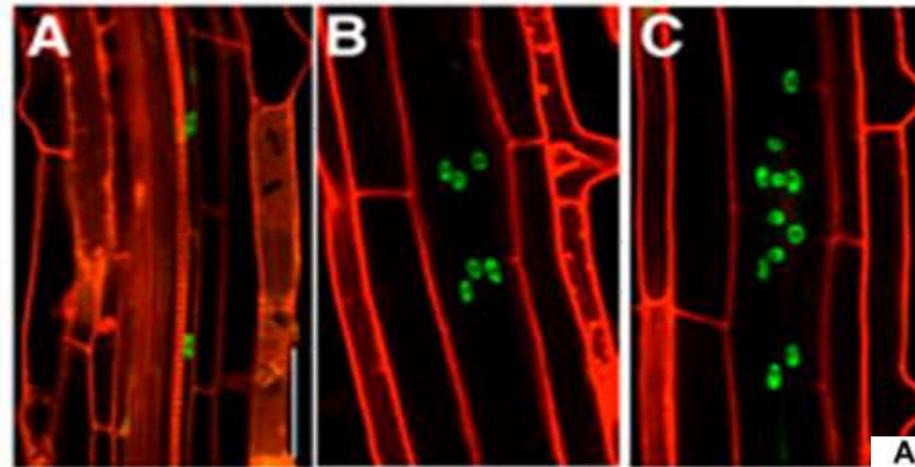
## LATERAL ORGAN BOUNDARIES DOMAIN 16 (LBD16) и его роль в инициации бокового корня *Arabidopsis*

Общая структура домена LOB

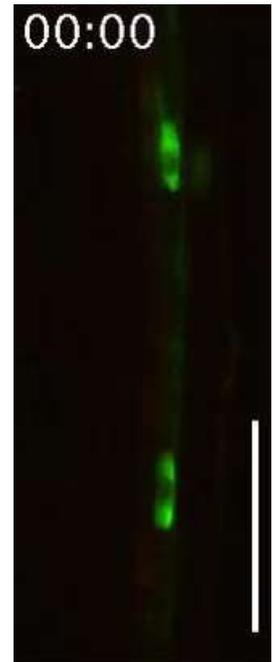


Majer et al., *Trends in Plant Science*. 2011

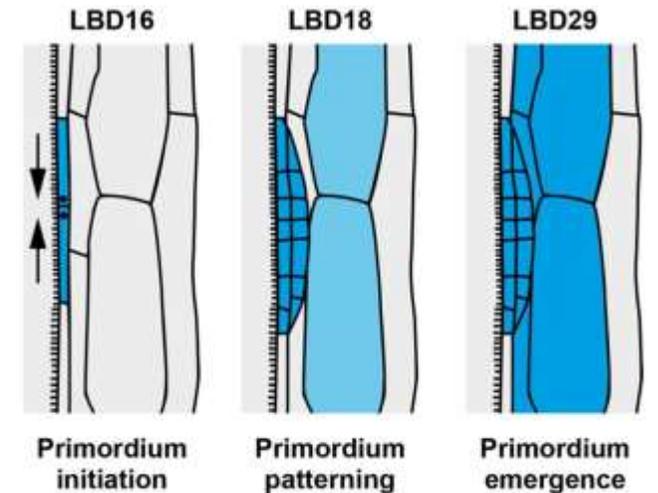
Экспрессия *AtLBD16* в паре клеток перицикла при инициации бокового корня



Goh et al., *Development*. 2012

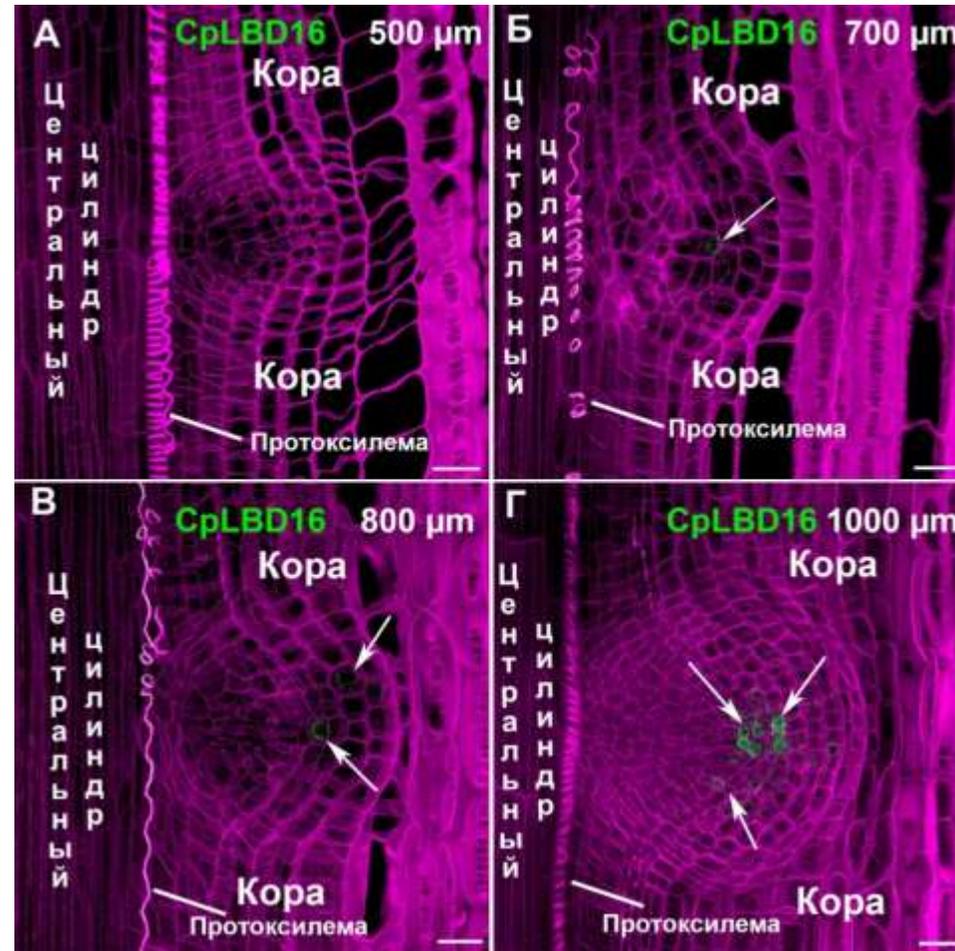
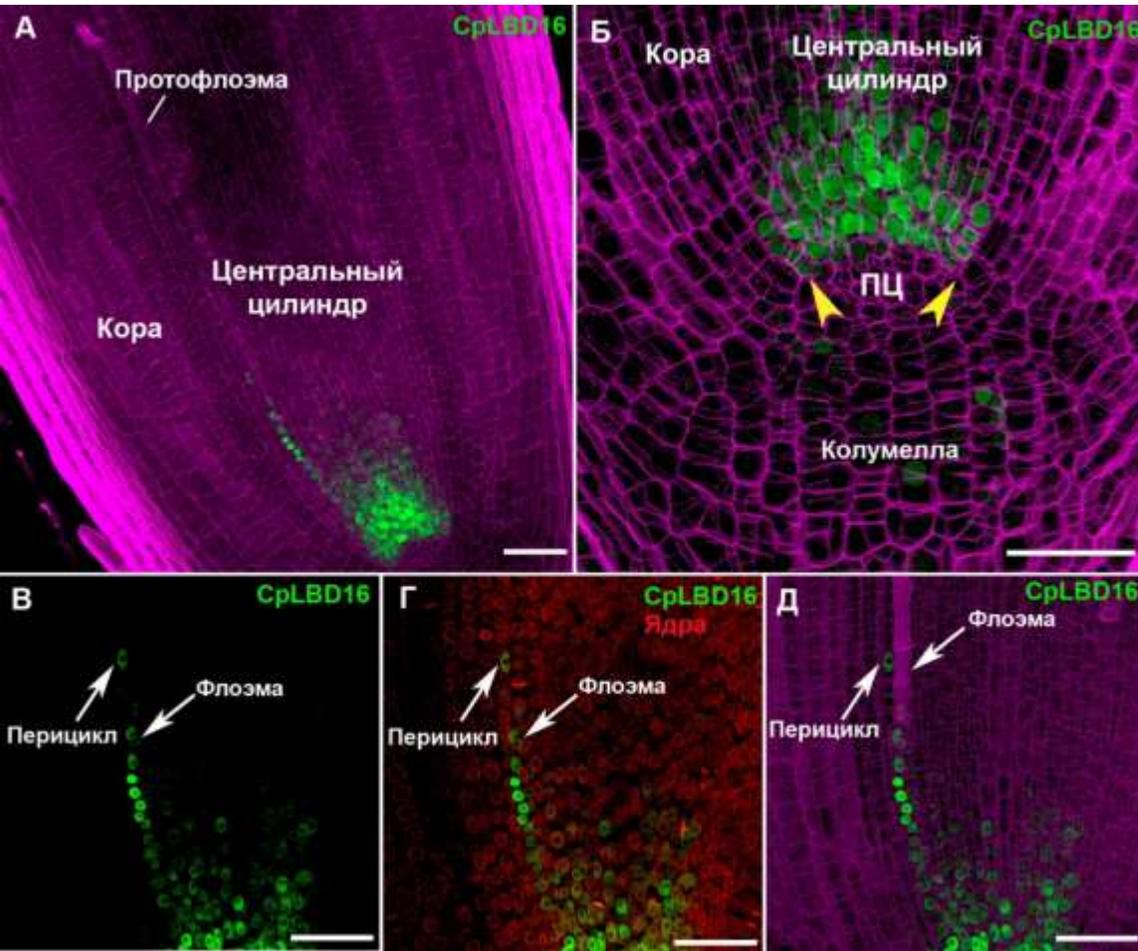


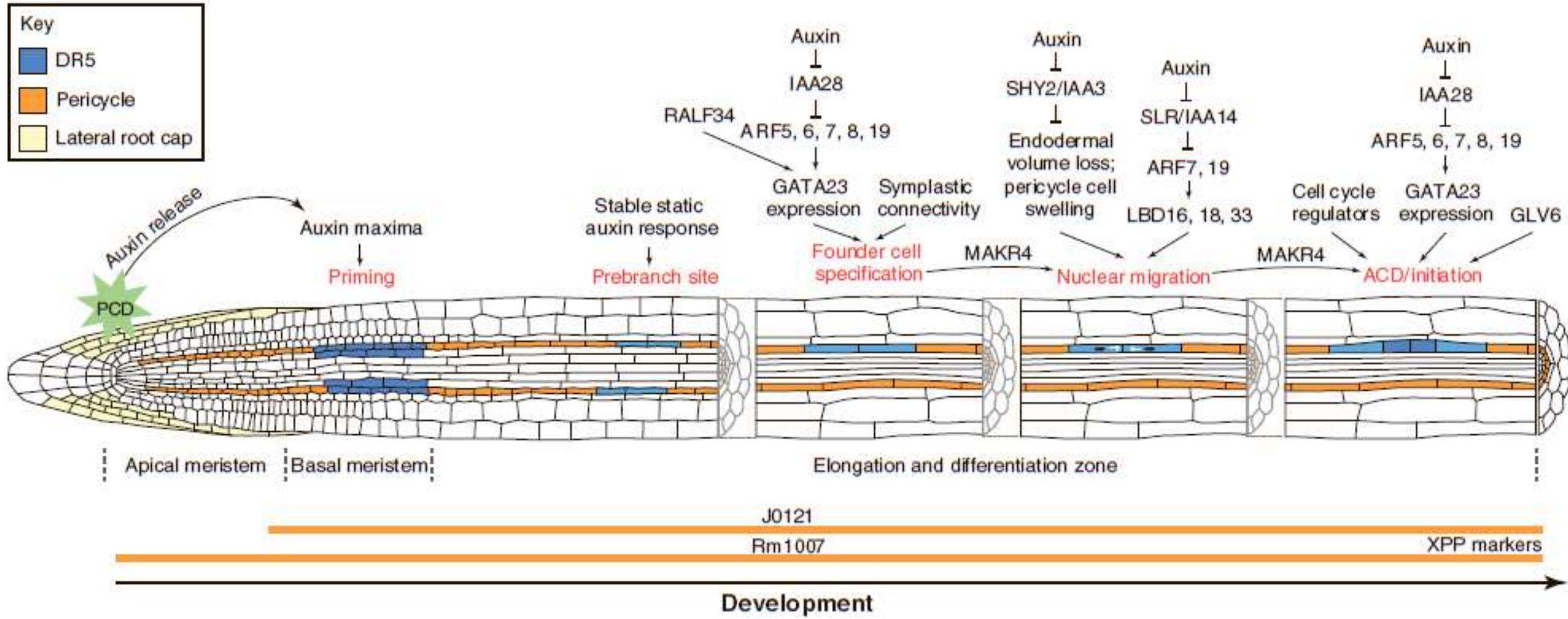
Col *lbd16* *lbd16/18/33* LBD16-SRDX



# Контроль начала пролиферации клеток при инициации бокового корня

Активность промотора гена *CpLBD16* в кончике корня кабачка (*Cucurbita pepo*)



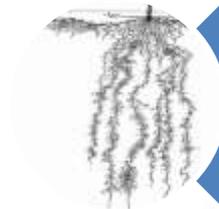


Trinh C.D., Laplaze L., Guyomarc'h S. Lateral root formation: building a meristem *de novo*. *Annual Plant Reviews*. 2018.

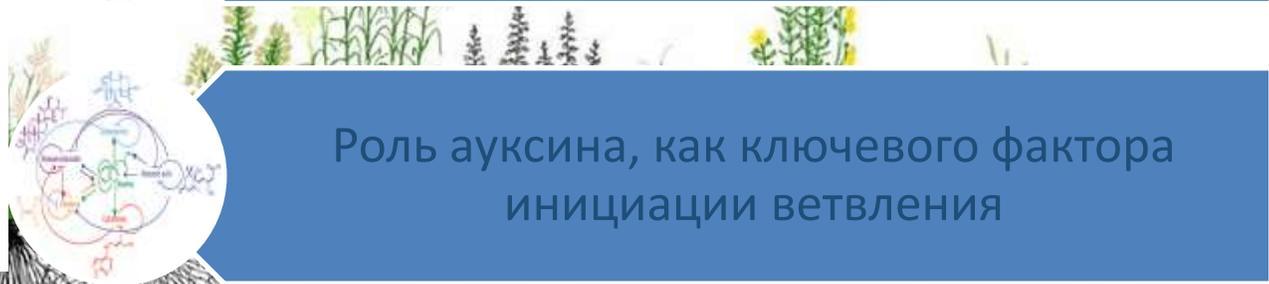


# IX СЪЕЗД ОБЩЕСТВА ФИЗИОЛОГОВ РАСТЕНИЙ

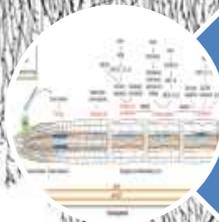
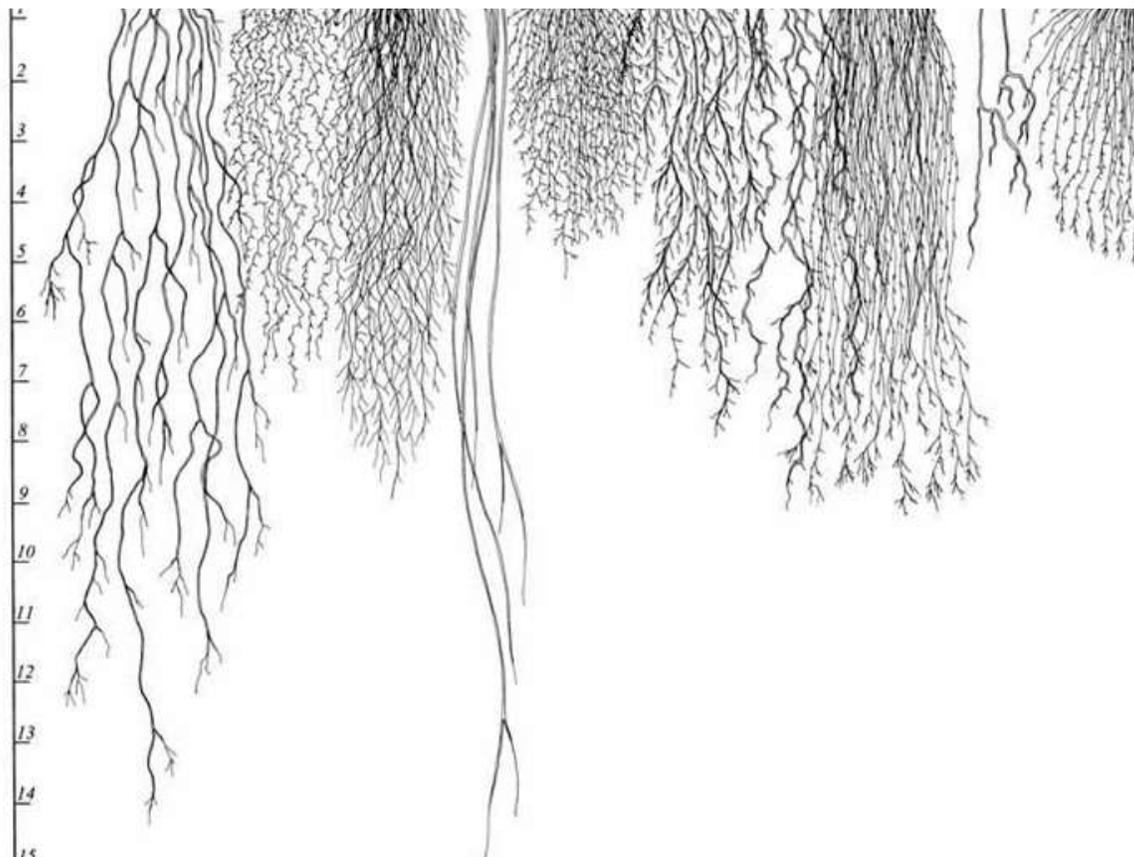
<https://congresskazan2019.ofr.su>



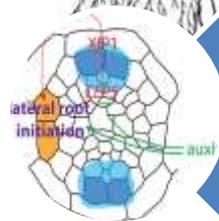
Разнообразие ветвления корней  
наземных растений



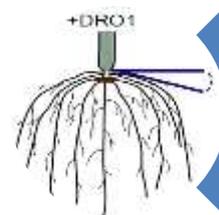
Роль ауксина, как ключевого фактора  
инициации ветвления



Мишени ауксина при инициации бокового  
корня. Основные генные сети и модули



**Роль малых сигнальных пептидов в  
регуляции ветвления**



Генетические факторы разнообразия  
архитектуры корневых систем цветковых  
растений

- |                     |            |                    |              |               |                 |             |                    |               |             |                  |                  |               |              |                   |                  |            |                |            |                        |               |
|---------------------|------------|--------------------|--------------|---------------|-----------------|-------------|--------------------|---------------|-------------|------------------|------------------|---------------|--------------|-------------------|------------------|------------|----------------|------------|------------------------|---------------|
| Kentucky Blue Grass | Lead Plant | Missouri Goldenrod | Indian Grass | Compass Plant | Porcupine Grass | Heath Aster | Prairie Cord Grass | Big Blue Stem | Pale Purple | Prairie Dronseed | Side Oats Gramma | False Boneset | Switch Grass | White Wild Indigo | Little Blue Stem | Rosin Weed | Purple Prairie | June Grass | Cylindric Blazing Star | Buffalo Grass |
|---------------------|------------|--------------------|--------------|---------------|-----------------|-------------|--------------------|---------------|-------------|------------------|------------------|---------------|--------------|-------------------|------------------|------------|----------------|------------|------------------------|---------------|

7  
6  
5  
4  
3  
2  
1  
1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15

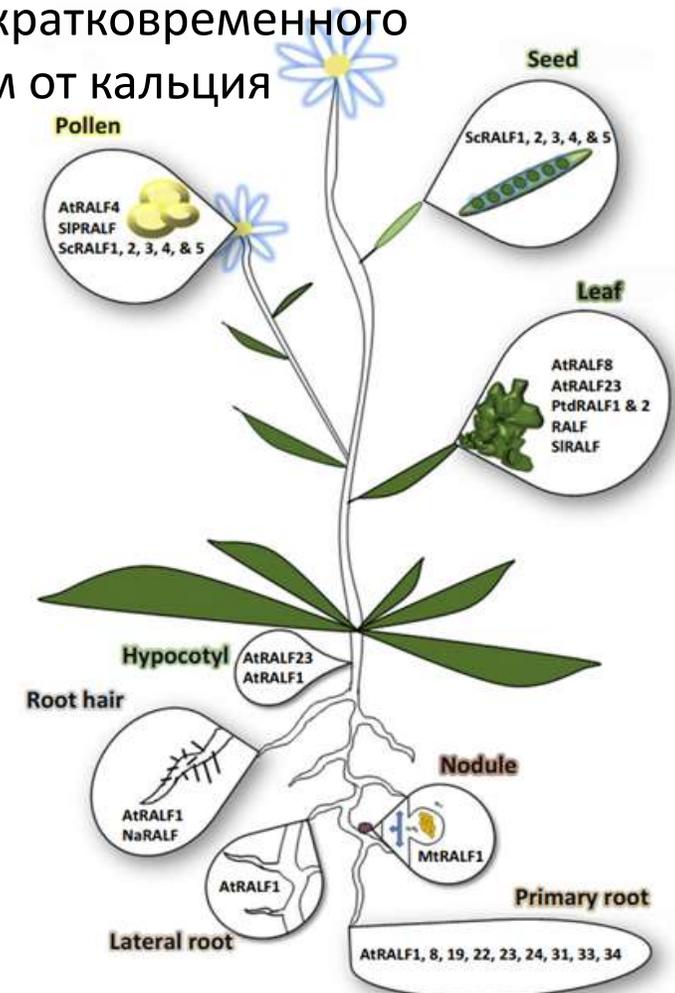
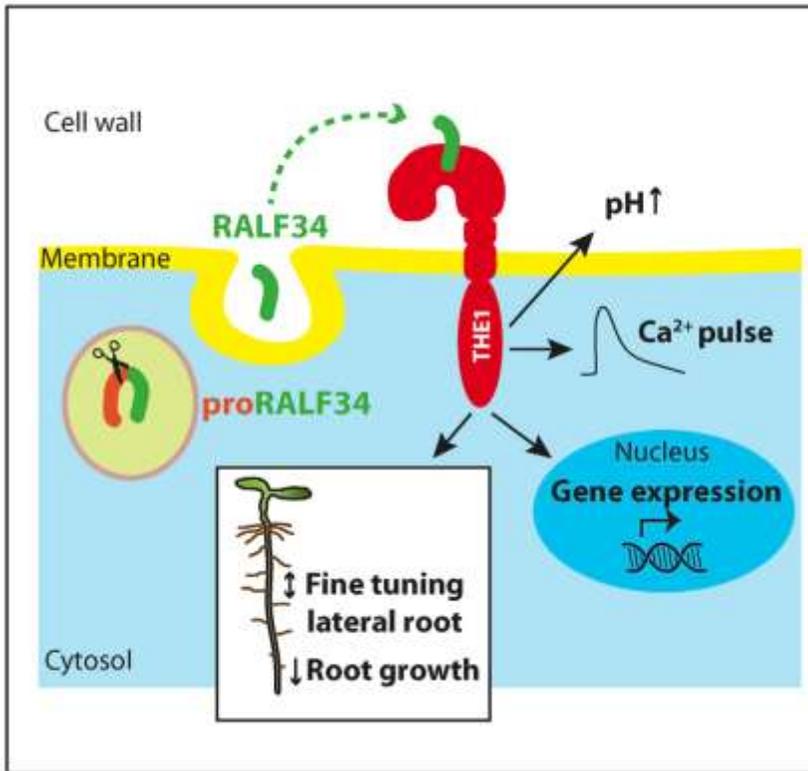
# Малые сигнальные пептиды

Семейство	Роль в растении
Системин	Химическая защита от травоядных, насекомых
CLE-пептиды	Поддержание гомеостаза в клетках в апикальной меристеме
ENOD40	Развитие азотфиксирующего клубенька
Фитосульфокины	Клеточная пролиферации
POLARIS	Развитие проводящей системы в листе
S-locus Cysteine-Rich protein/S-locus Protein 11 (SCR/SP11)	Препятствие самоопылению
ROTUNDIFOLIA4 и DEVIL1	Размер и форма листа
Inflorescence Deficient in Abscission (IDA)	Отмирание органов цветка после выполнения физиологической функции
<b>Rapid Alkalinization Factor (RALF, RALFL)</b>	<b>Подщелачивание внеклеточной среды и ингибирование растяжения клеток</b>

# Малые сигнальные пептиды

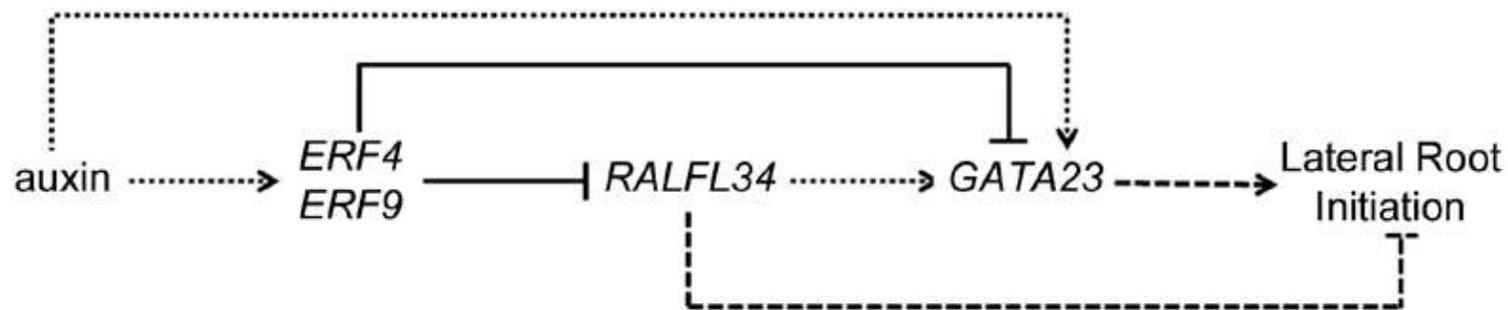
RALF – семейство клеточных сигнальных пептидов, регулирующих рост и развитие растений, а также ответы на стресс.

Отвечают за быстрое подщелачивание внеклеточного пространства путем кратковременного увеличения концентрации цитоплазматического  $\text{Ca}^{2+}$ , приводя к зависимым от кальция сигнальным событиям через рецептор на клеточной поверхности.

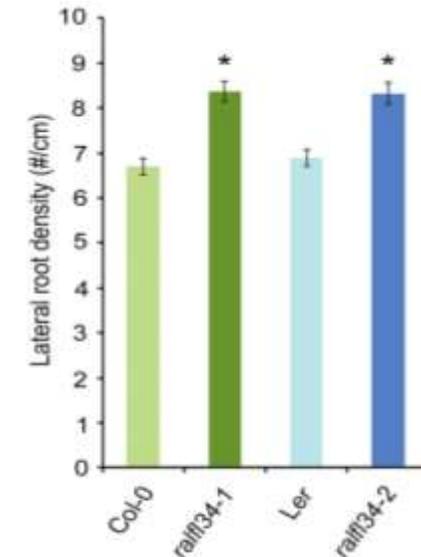


# RALFL34 в регуляции первых делений при инициации примордия бокового корня *Arabidopsis*

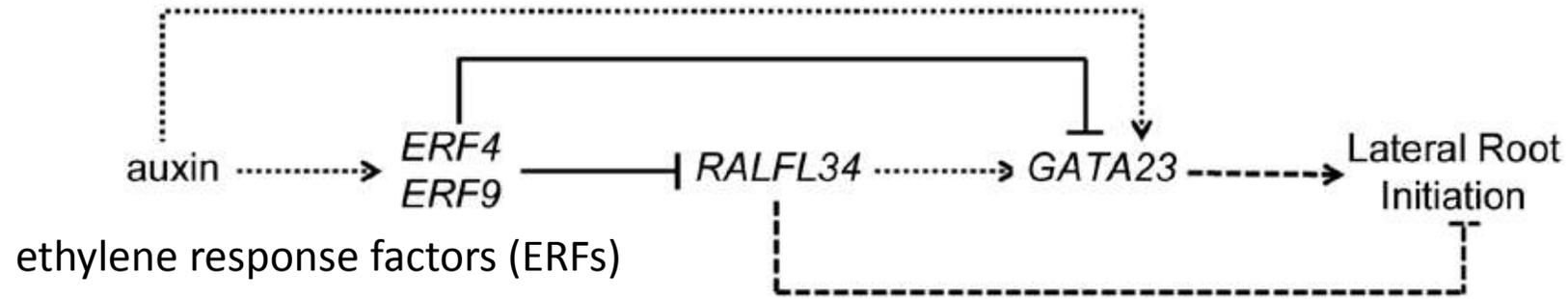
- RALFL34 влияет ранее, чем GATA23 на сигнальный каскад инициации бокового корня *Arabidopsis*.
- В промоторе были найдены ERF4- и ERF9-связывающие мотивы, возможно, этилен через ERF регулирует экспрессию RALFL34.



- Подавление экспрессии *RALFL34* приводит к увеличению плотности боковых корней.

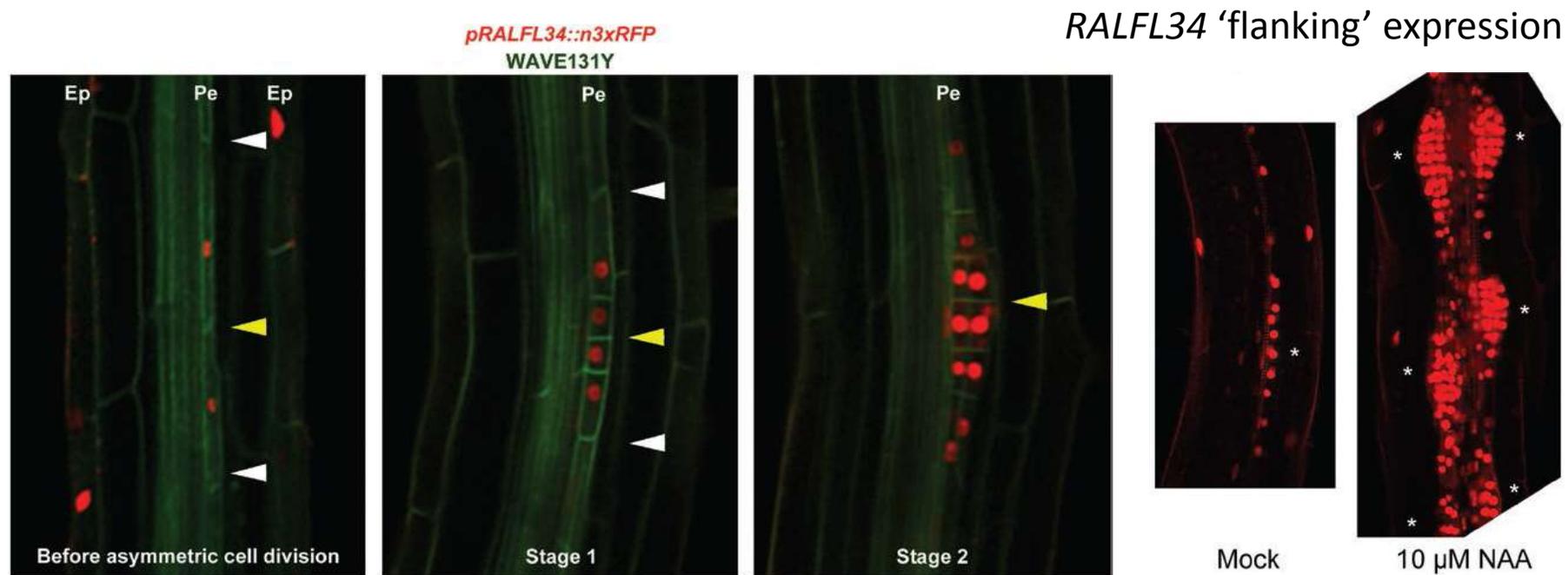


# RALFL34 в регуляции первых делений при инициации примордия бокового корня *Arabidopsis*



ethylene response factors (ERFs)

Murphy E. *et al.* Journal of Experimental Botany. 2016

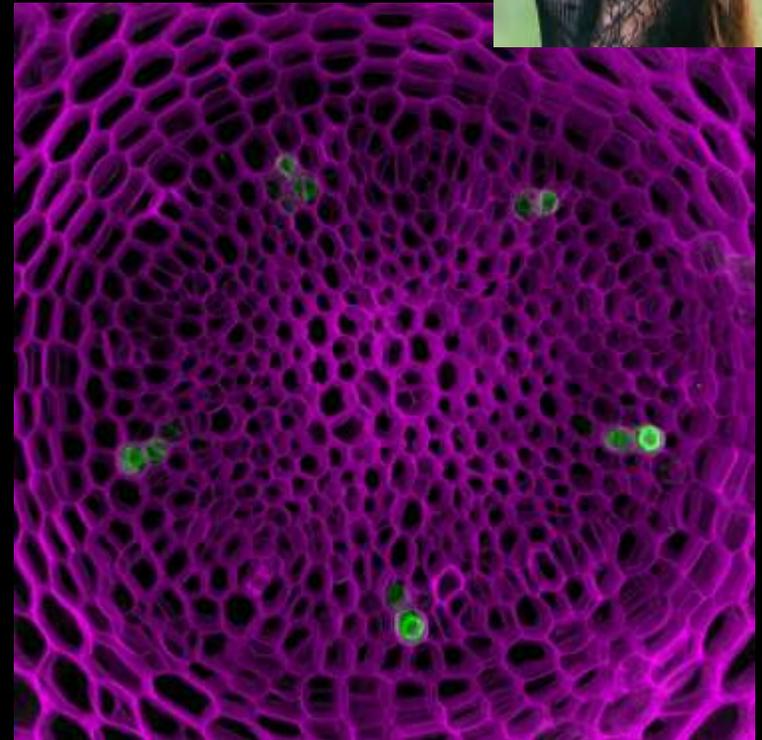
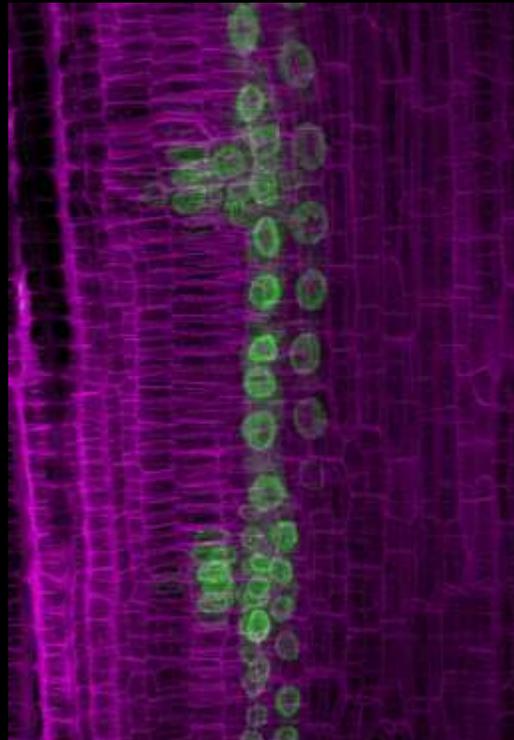
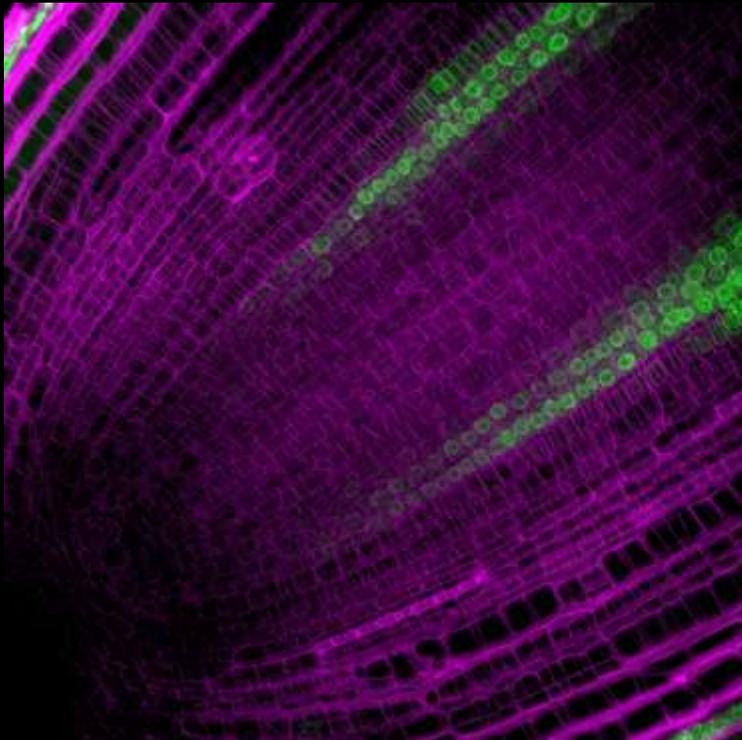


RALFL34 is interpreting a shoot-derived signal to drive the progression from founder cell to stage 1 primordia

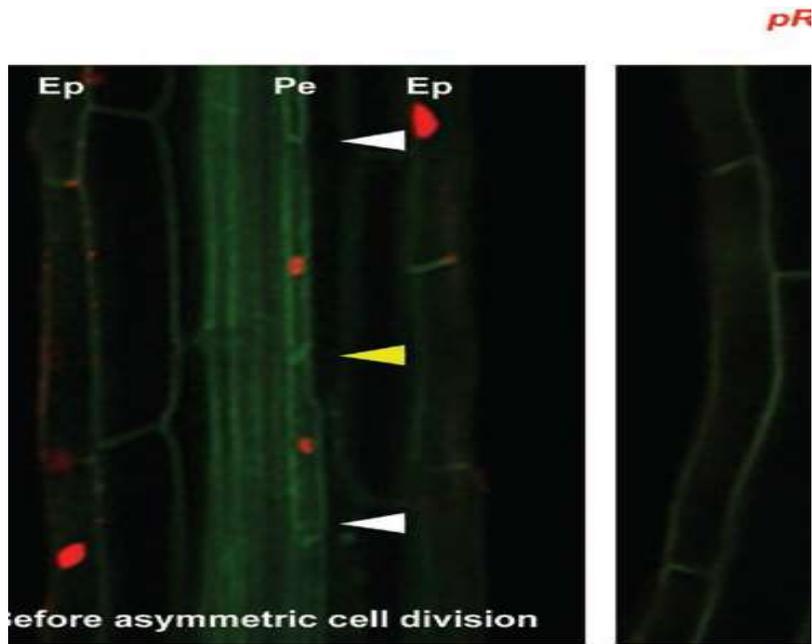
# *RALF34* в регуляции первых делений при инициации примордия бокового корня огурца (*Cucumis sativus*)



***RALF34::NeonGreen-H2B***



Экспрессия *RALFL34* начинается в клетках ряда протоксилемы на удалении около 200 мкм от инициальных клеток;  
На удалении 250-300 мкм распространяется в клетки-основательницы бокового корня, расположенные в перицикле;  
Экспрессия сохраняется в клетках рядов ксилемы между примордиями бокового корня, а также в примордиях до удаления 1800 мкм.

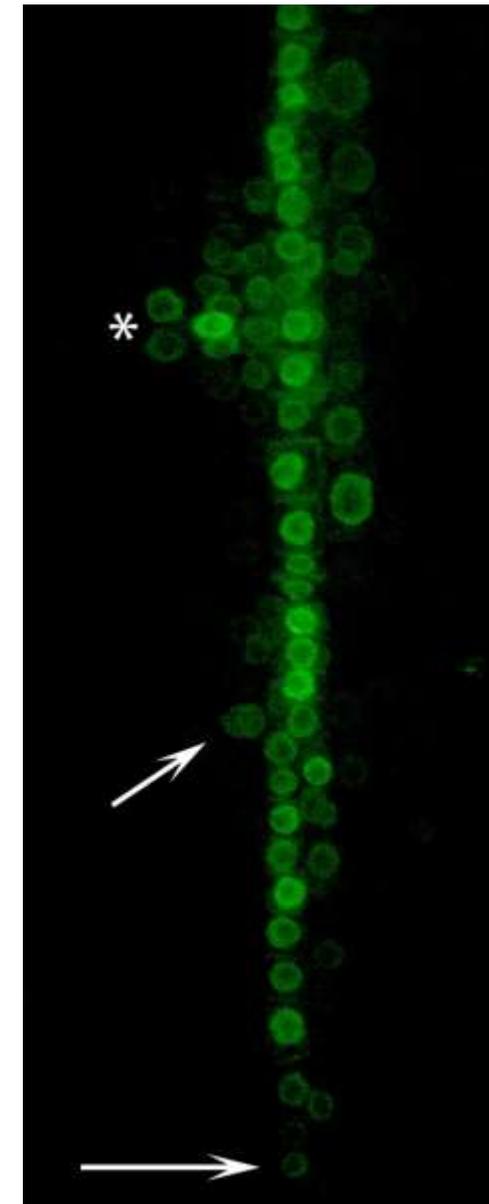


## NeonGreen-H2B

Активация экспрессии гена *RALFL34* происходит в ксилеме раньше видимых признаков инициации бокового корня в перicycle цветковых растений.

Сравнение паттерна экспрессии *RALFL34* у цветковых растений с разными типами расположения зоны инициации, показало, что *RALFL34* – первый кандидат на роль системного регулятора каскада, приводящего к образованию бокового корня.

**Дальнейшее изучение функции *RALFL34* поможет понять механизмы начальных этапов инициации бокового корня**



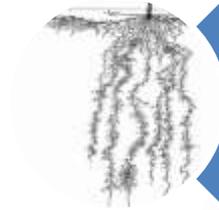
Корень огурца



# IX

## СЪЕЗД ОБЩЕСТВА ФИЗИОЛОГОВ РАСТЕНИЙ

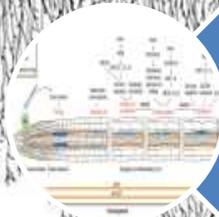
<https://congresskazan2019.ofr.su>



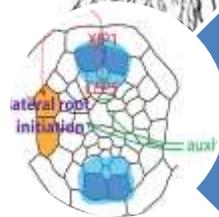
Разнообразие ветвления корней  
наземных растений



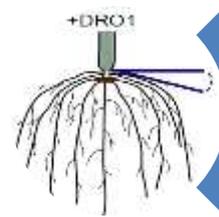
Роль ауксина, как ключевого фактора  
инициации ветвления



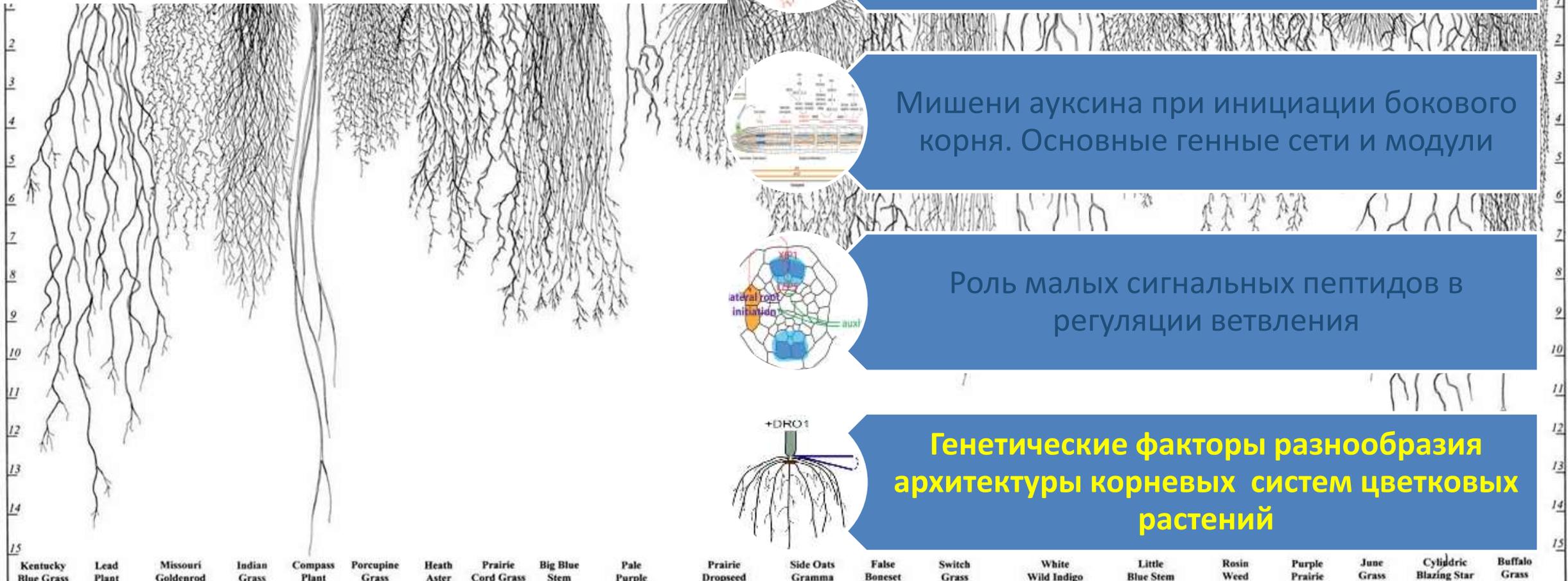
Мишени ауксина при инициации бокового  
корня. Основные генные сети и модули



Роль малых сигнальных пептидов в  
регуляции ветвления



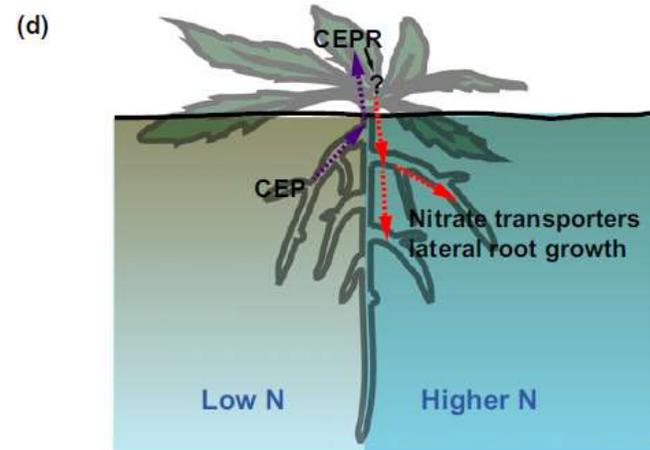
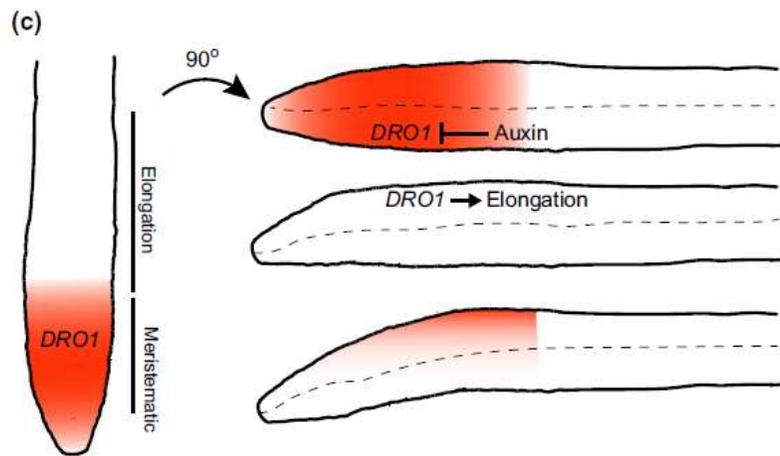
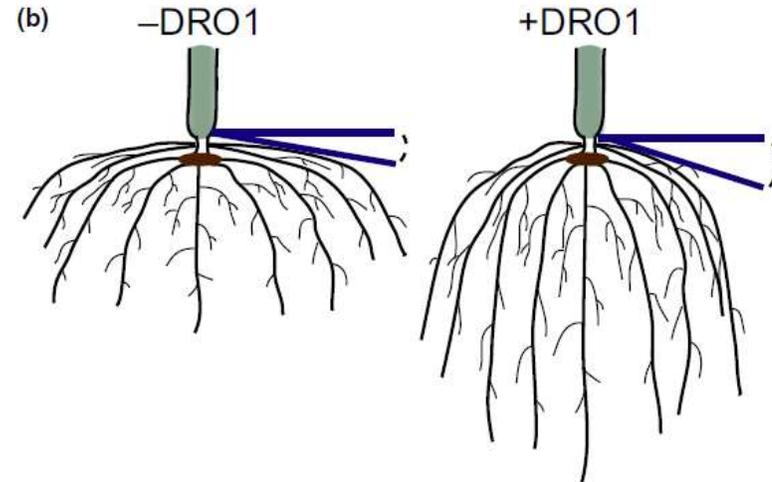
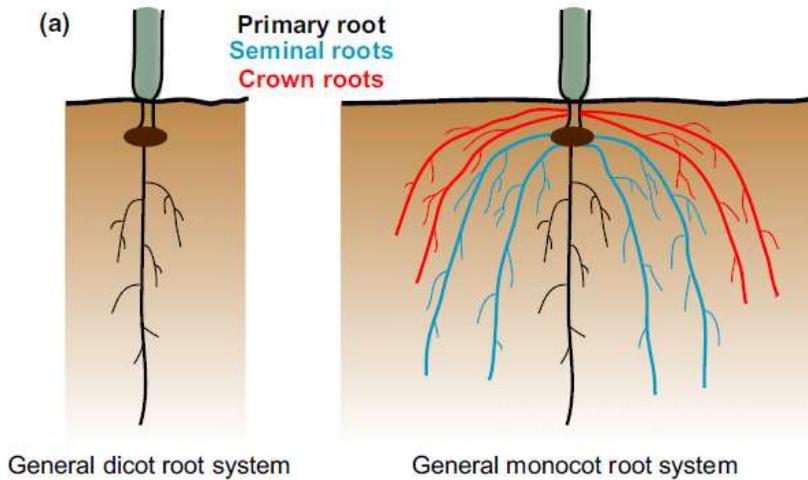
**Генетические факторы разнообразия  
архитектуры корневых систем цветковых  
растений**



# DEEPER ROOTING 1 (DRO1)

## В контроле архитектуры корневой системы

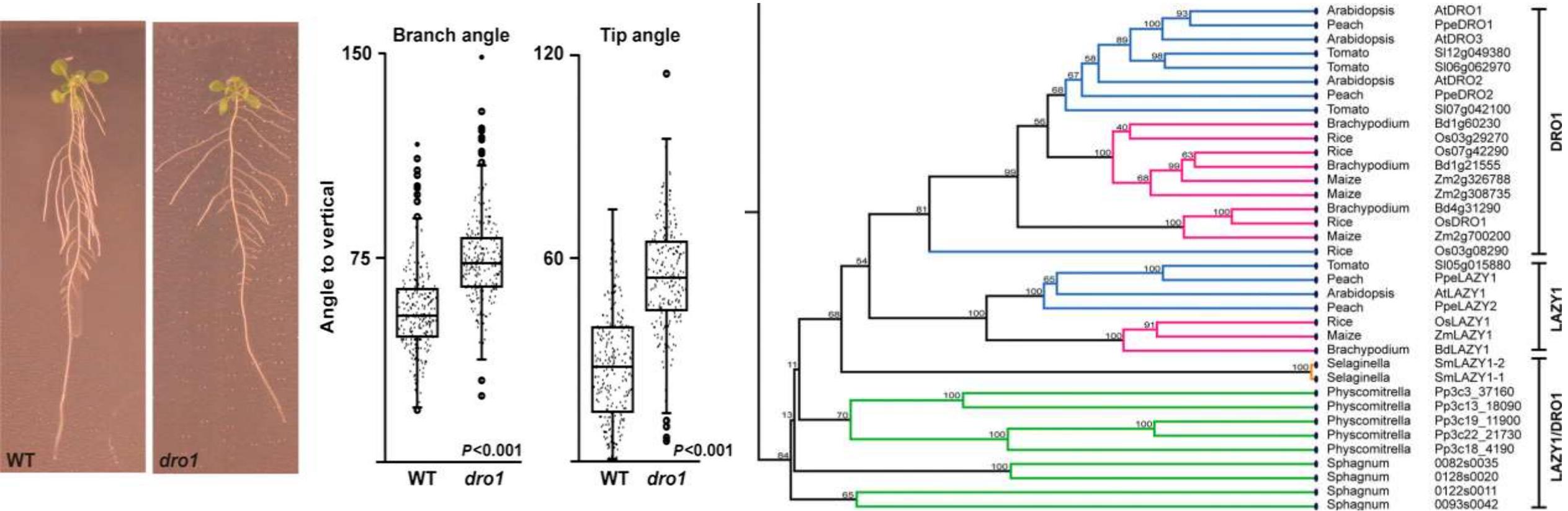
DRO1 регулирует угол роста корня путем модуляции ответа на гравитацию у злаков.



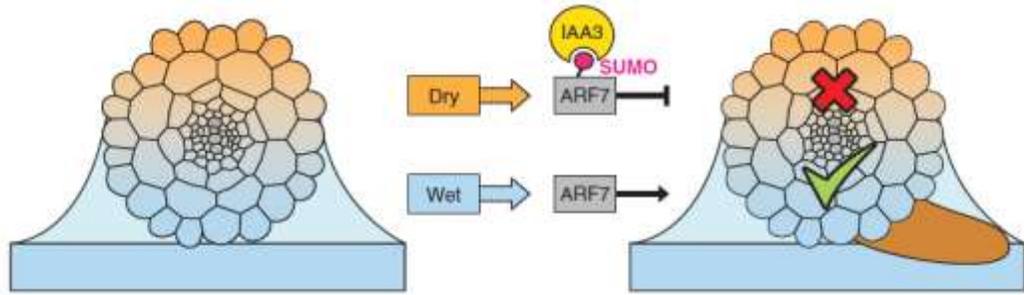
# DEEPER ROOTING 1 (DRO1)

## в контроле архитектуры корневой системы

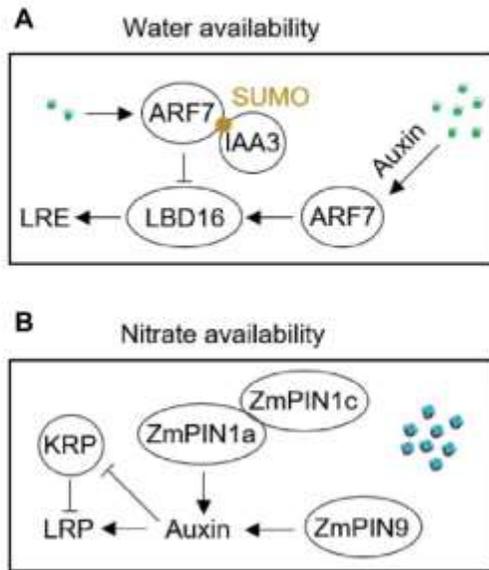
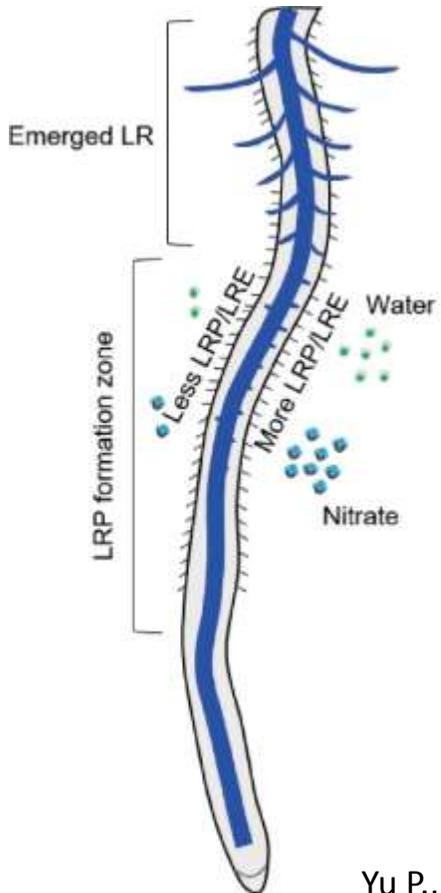
*AtDRO1* влияет на ориентацию боковых корней у *Arabidopsis*



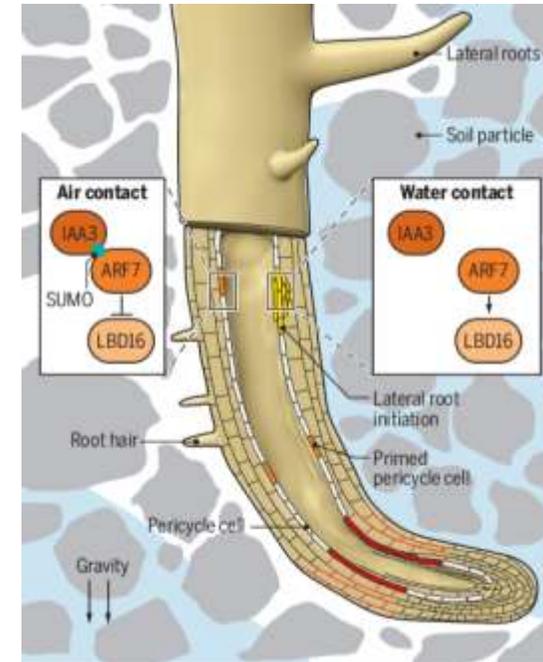
## Plasticity of Lateral Root Branching in Maize



Hydropatterning is dependent on auxin response factor ARF7. This transcription factor induces asymmetric expression of its target gene LBD16 in lateral root founder cells. This differential expression pattern is regulated by posttranslational modification of ARF7 with the small ubiquitin-like modifier (SUMO) protein. SUMOylation negatively regulates ARF7 DNA binding activity. ARF7 SUMOylation is required to recruit the Aux/IAA (indole-3-acetic acid) repressor protein IAA3.



Yu P., Hochholdinger F., Li C. Plasticity of Lateral Root Branching in Maize. *Frontiers in Plant Science*. 2019

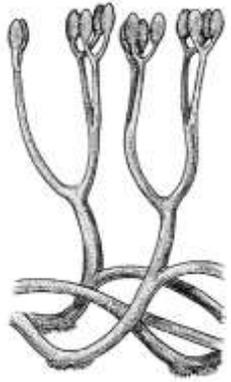


Orosa-Puente B. et al. Root branching toward water involves posttranslational modification of transcription factor ARF7. *Science*. 2018.

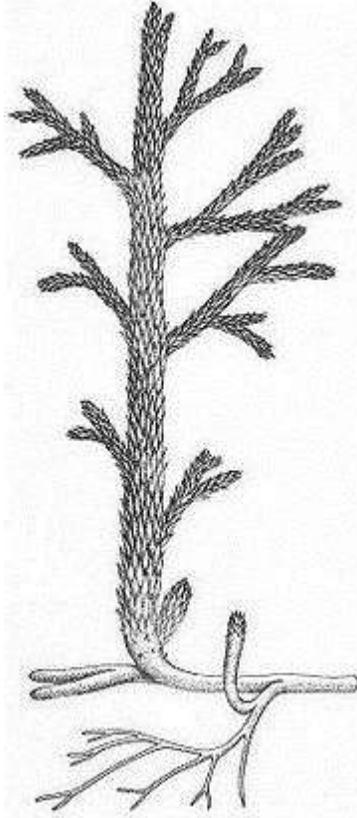
# Заключение

# Эволюция корневых систем

## Roots of Rhynie chert plants (Devonian)

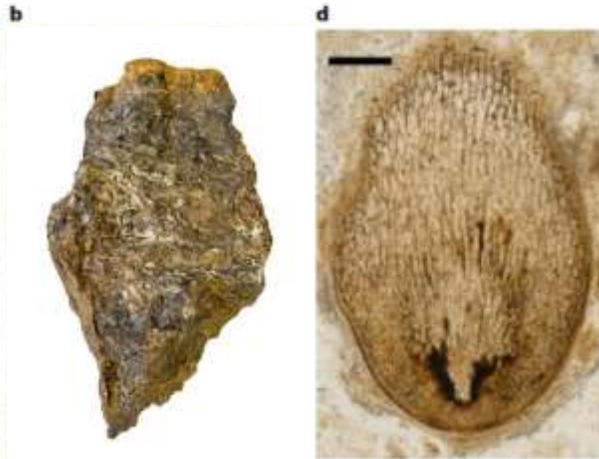


*Rhynia gwynne-vaughanii*

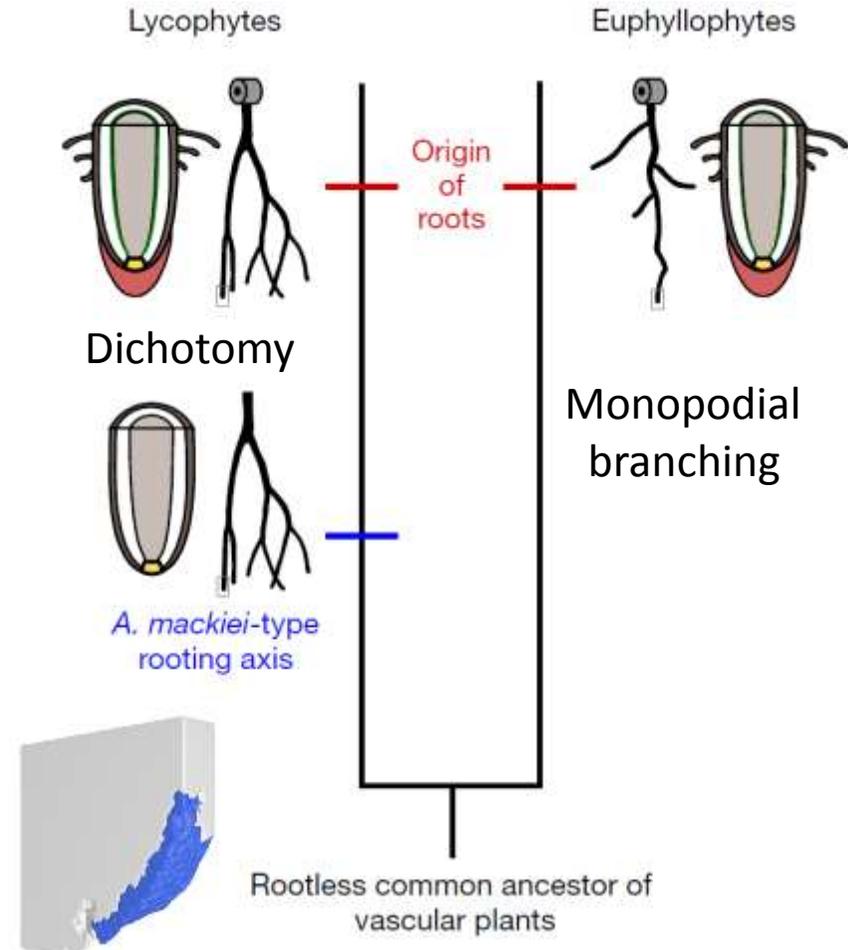


bifurcating  
shoot-like axes  
(rhizomorphs)

*Asteroxylon mackiei*

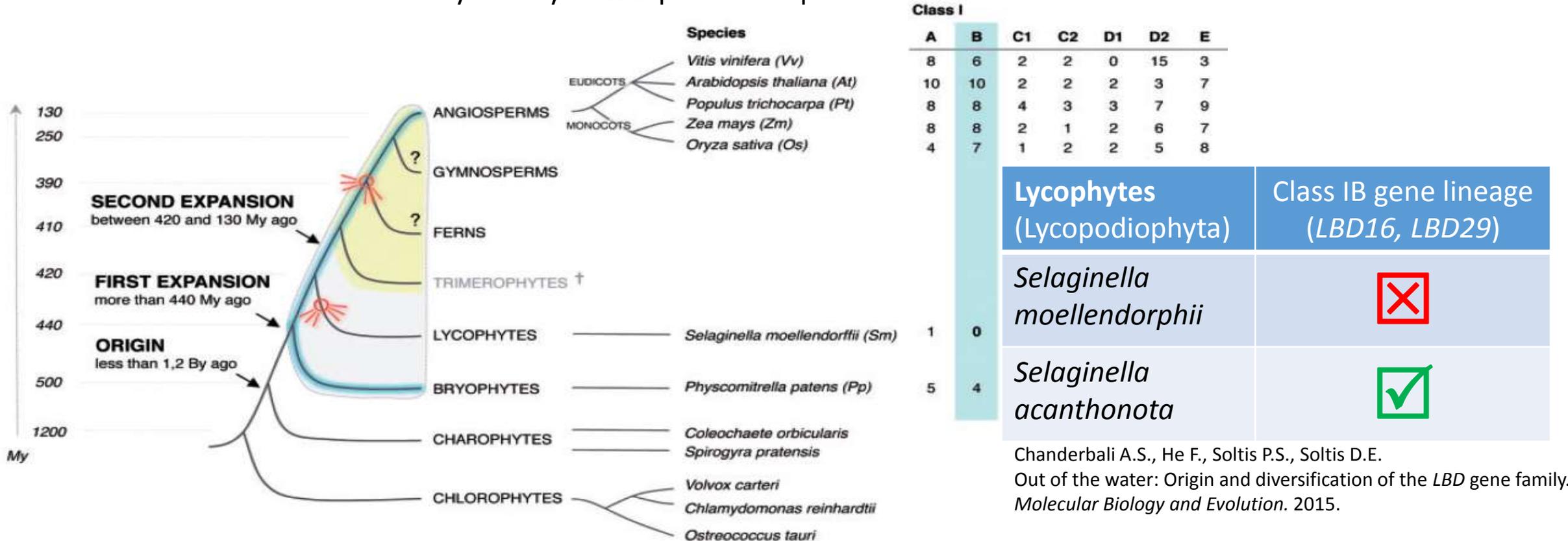


## Stepwise and independent origins of roots among vascular plants



# Эволюция корневых систем

Root evolution and the evolutionary history of LBD proteins in plants



Chanderbali A.S., He F., Soltis P.S., Soltis D.E.  
 Out of the water: Origin and diversification of the *LBD* gene family.  
*Molecular Biology and Evolution*. 2015.

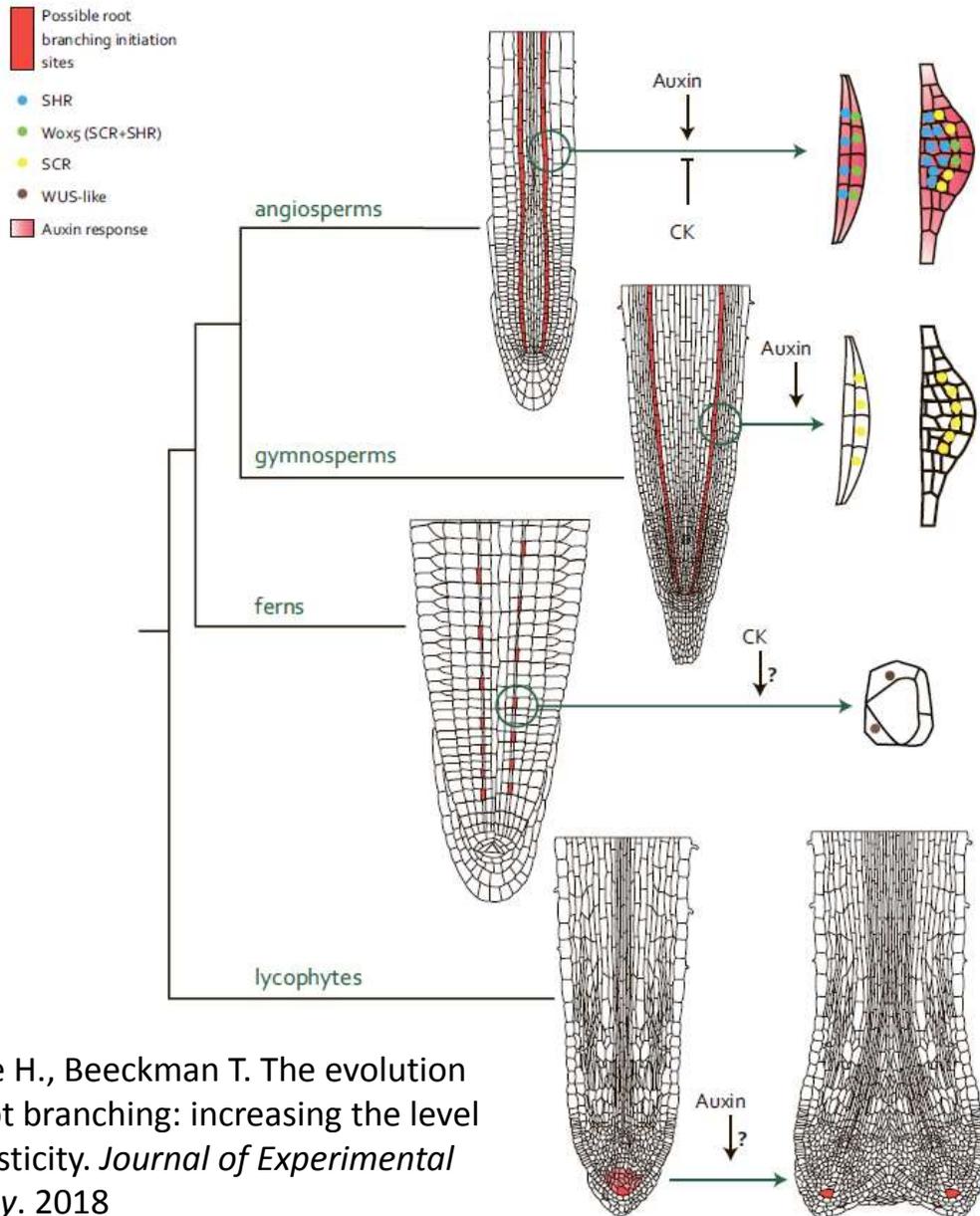
Synthetic monophyletic tree representing phylogenetic relationships between the main groups of plants in the green lineage.



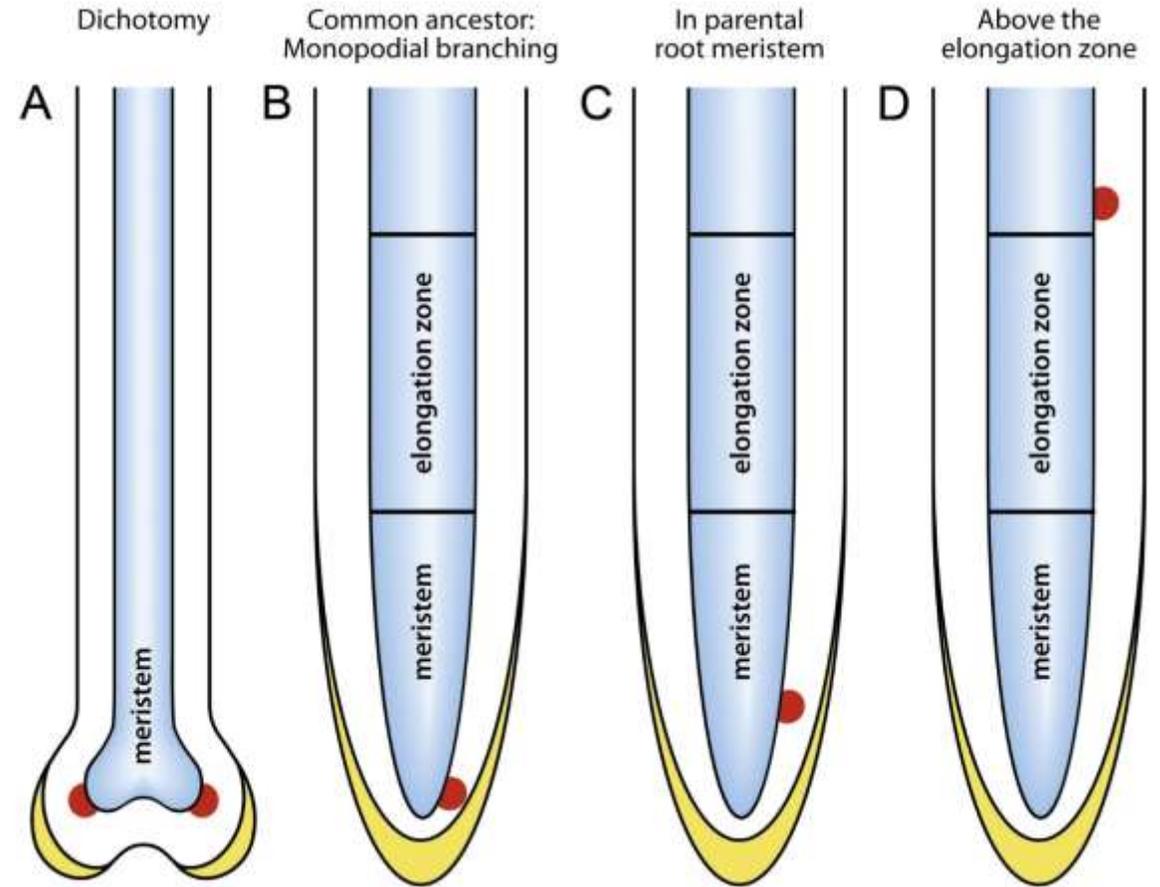
Phylogenetic analysis showing that **lycophytes** lack the *LOB* domain genes that act downstream of auxin to regulate root development in monilophytes and spermatophytes

Coudert Y., Dievart A., Droc G., Gantet P. ASL/LBD phylogeny suggests that genetic mechanisms of root initiation downstream of auxin are distinct in Lycophytes and Euphyllophytes. *Molecular Biology and Evolution*. 2013.

# Эволюция корневых систем



Motte H., Beeckman T. The evolution of root branching: increasing the level of plasticity. *Journal of Experimental Botany*. 2018



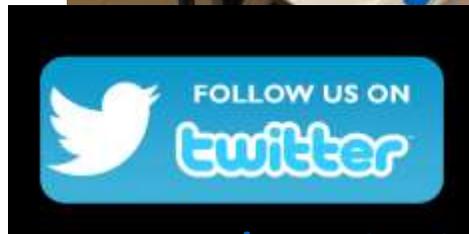
Modified after Goebel (1928) and Voronin (1964)

Ilina E.L., Kiryushkin A.S., Semenova V.A., Demchenko N.P., Pawlowski K., Demchenko K.N. Lateral root initiation and formation within the parental root meristem of *Cucurbita pepo*: is auxin a key player? *Annals of Botany*. 2018



Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН  
лаборатория клеточных и молекулярных  
механизмов развития

Демченко Кирилл Николаевич  
Ильина Елена Леонидовна  
Кирюшкин Алексей Сергеевич  
Гусева Елизавета Дмитриевна  
Островерхова Мария Геннадиевна  
Савельева Арина Петровна



[twitter.com/DemchenkoLab](https://twitter.com/DemchenkoLab)



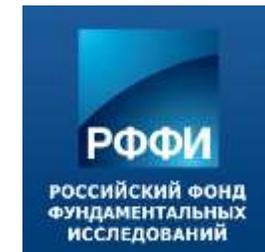
**Stockholm University, Sweden**  
Katharina Pawlowski

При финансовой поддержке:



Российский научный фонд (16-16-00089)

Российский фонд фундаментальных исследований (14-04-01413, 19-04-01079)



*Мудрый смотрит в корень: я посмотрел в корень...  
Там все по-прежнему: там много неоконченного (d'inacheve)!*

*Это успокоило меня...*

*Читатель, ты понял меня!*

*До свидания!*

*Козьма Прутков. 24 октября 1859*

*«Пух и перья. Предупреждение».*

*Современник, 1860. том 80 № 4, с. 42.*

*Спасибо за  
внимание!*