



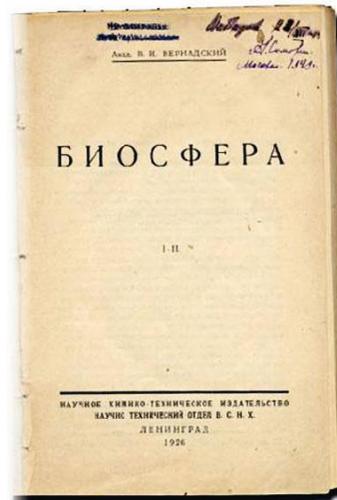
# Кремниевые препараты в сельском хозяйстве – история и перспектива

Матыченков Владимир Викторович,  
доктор биологических наук,  
ведущий научный сотрудник ИФПБ РАН





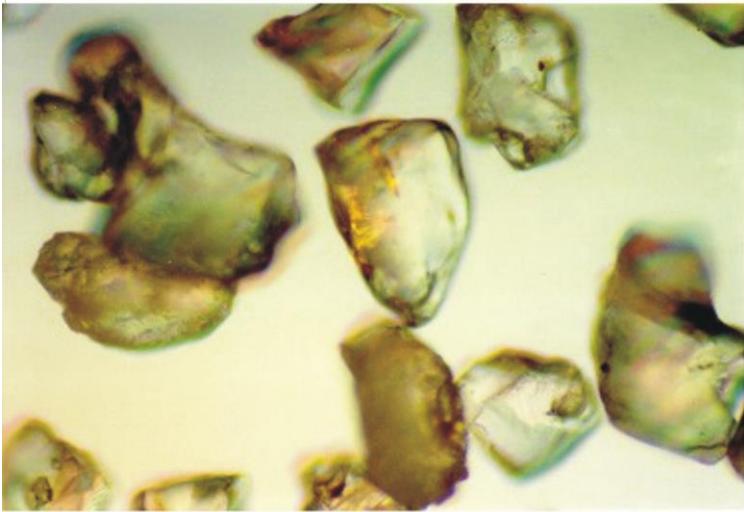
- В. И. Вернадский (1863-1945)
- «Кремний вырисовывается в мироздании как элемент, обладающий исключительным значением»
- «Не подлежит сомнению, что никакой живой организм не может существовать без кремния» (1921)





## Содержание кремния в земной коре

Земная кора	% SiO <sub>2</sub>
Нижние слои земной коры	53.1
Континентальная земная кора	59.1 – 64.8
Почвы	
Глиняные почвы	40 – 70
Песчаные почвы	90 - 98





## Миграционные ряды элементов в коре выветривания

Миграционные ряды элементов в коре выветривания  
(по Б. Б. Польшину, 1956)

Ряд элементов	Состав ряда	Показатели порядка величин миграции
Энергично выносимые	Cl, (Br, J), S	$2n \cdot 10$
Легко выносимые	Ca, Na, Mg, K	$n \cdot 10$
Подвижные	SiO <sub>2</sub> , P, Mn	$n \cdot 10^{-1}$
Инертные (слабоподвижные)	Fe, Al, Ti	$n \cdot 10^{-2}$
Практически неподвижные	SiO <sub>2</sub> кварца	$n \cdot 10^{-4}$



**ПЕРЕСЕЛЕНИЕ ЕВРОПЕЙЦЕВ**



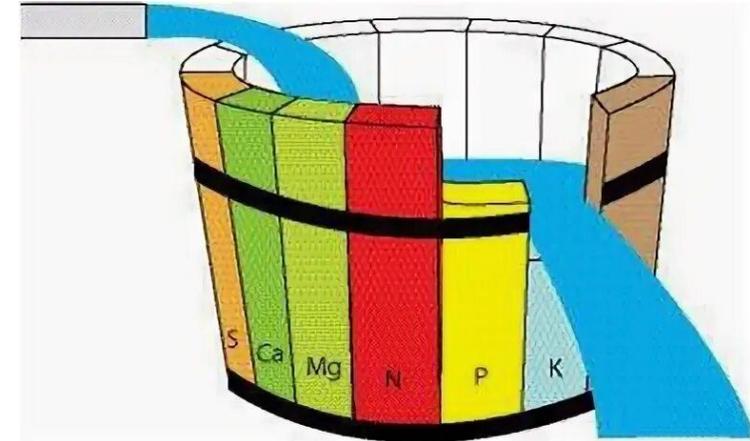


- Александр Гумбольт (1769-1859)
- Определение кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ) в растениях



## Юстиус Либих (1803-1873).

- Основатель агрохимии как науки, доказал, что кремний нужен растениям для полного минерального питания как P, K, N в 1840 “Organic Chemistry in Its Application to Agriculture and Physiology”.





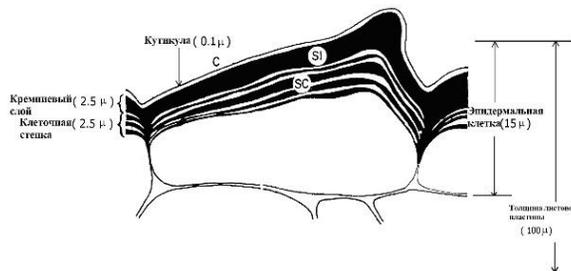
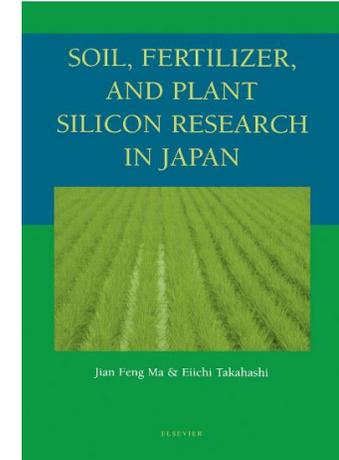


- Дмитрий Менделеев (1834-1907)
- Предложил использовать в качестве кремниевого удобрения аморфный диоксид кремния (1870)





- Онодера А. в 1917 году сообщал, что есть обратная корреляция между содержанием кремния и инфекционными болезнями растений.
- Miyake в 1922-1932 гг. провел массовые исследования, которые показали, что использование кремниевых удобрений (силикат кальция) повышает устойчивость растений к заболеваниям и атакам насекомых-вредителей.
- Takahashi E. во второй половине 20 века определил, что растения поглощают кремний в форме ортокремниевой (монокремниевой) кислоты.
- В 2006 году Ma J.F. с соавторами нашли транспортеры монокремниевой кислоты и гены отвечающие за активацию и синтез этих транспортеров.



**nature** Vol 440/30 March 2006/doi:10.1038/nature04590

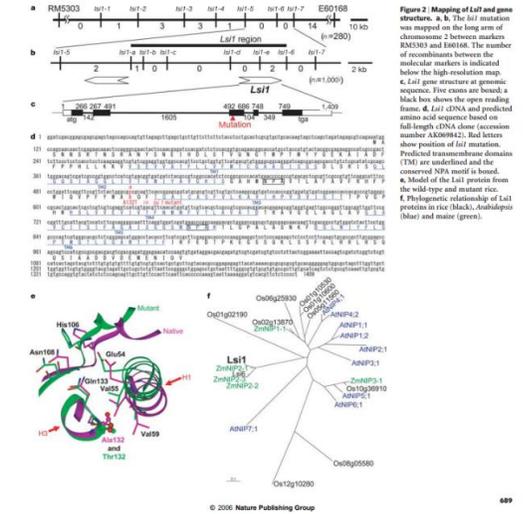
# LETTERS

## A silicon transporter in rice

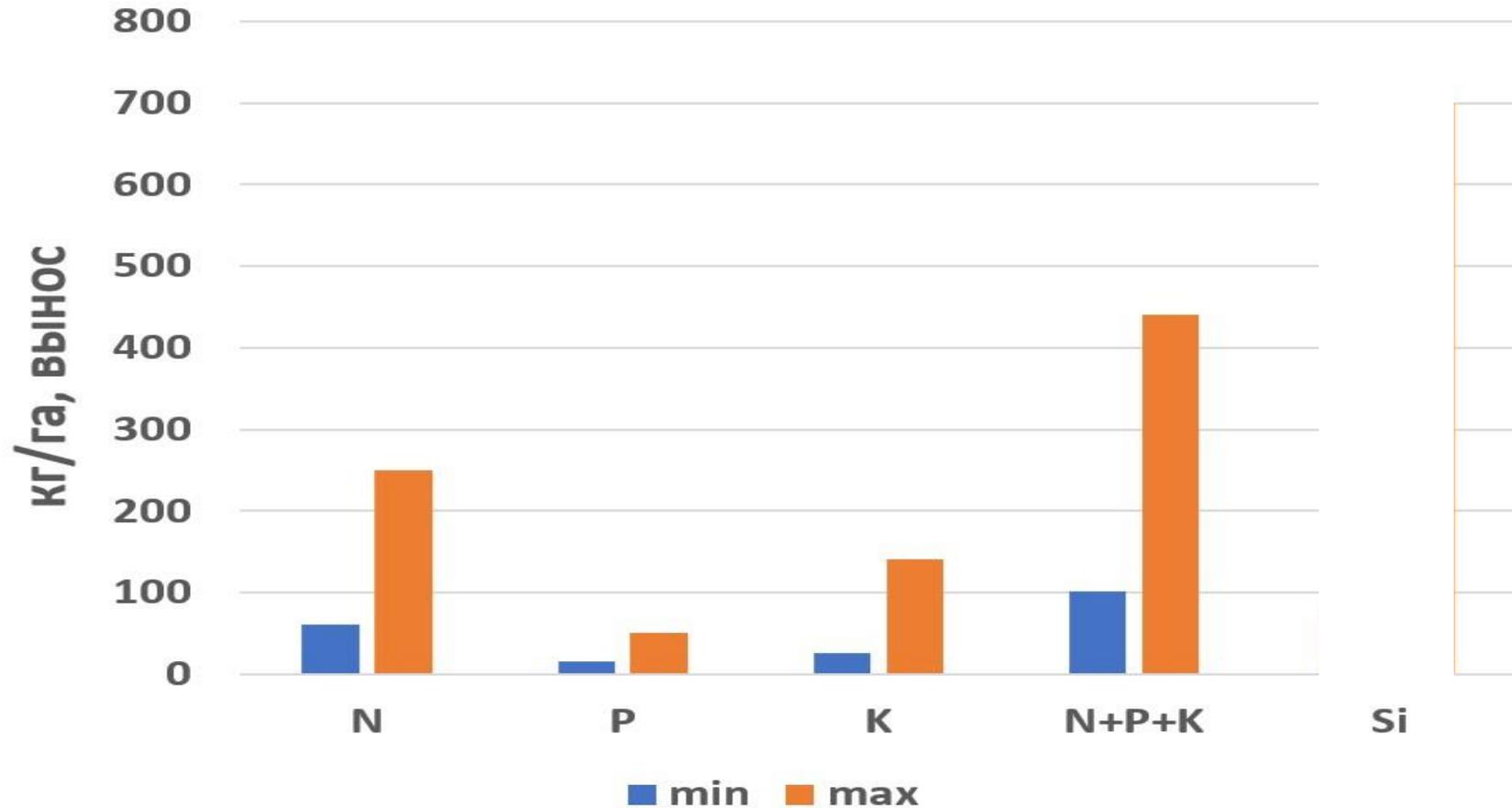
Jian Feng Ma<sup>1</sup>, Kazunori Tamai<sup>1\*</sup>, Naoki Yamaji<sup>1\*</sup>, Namiki Mitani<sup>1\*</sup>, Saeko Konishi<sup>2</sup>, Maki Katsuhara<sup>1</sup>, Masaji Ishiguro<sup>3</sup>, Yoshiko Murata<sup>3</sup> & Masahiro Yano<sup>4</sup>

Silicon is beneficial to plant growth and helps plants to overcome abiotic and biotic stresses by preventing lodging (falling over) and increasing resistance to pests and diseases, as well as other stresses<sup>1-3</sup>. Silicon is essential for high and sustainable production of rice<sup>4</sup>, but the molecular mechanism responsible for the uptake of silicon is unknown. Here we describe the Low silicon rice 1 (*Lsi1*) gene, which controls silicon accumulation in rice, a typical silicon-accumulating plant. This gene belongs to the aquaporin

13.9 kb between the markers *Lsi1-a* and *Lsi1-6* (Fig. 2a, b). Using gene prediction software we predicted a gene in the candidate region (Fig. 2b), sequenced it and made comparisons between the wild type and *lsi1* mutant. We found a mutation in the DNA sequence of the candidate gene (G in the wild type; A in the mutant) that results in an amino acid change from alanine in the wild type to threonine in the mutant at position 132 (Fig. 2d). Thus, we considered this candidate gene to be *Lsi1*. The gene consists of five exons and four introns



## Вынос питательных элементов с одного гектара некоторыми культивируемыми растениями (литературные данные)





# Глобальный биогеохимический цикл кремния

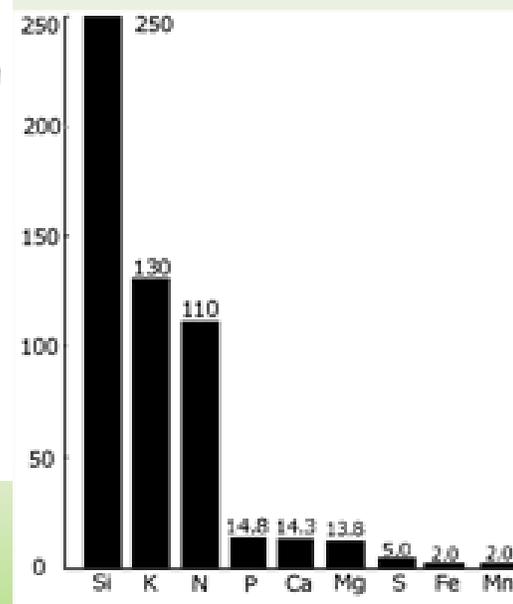
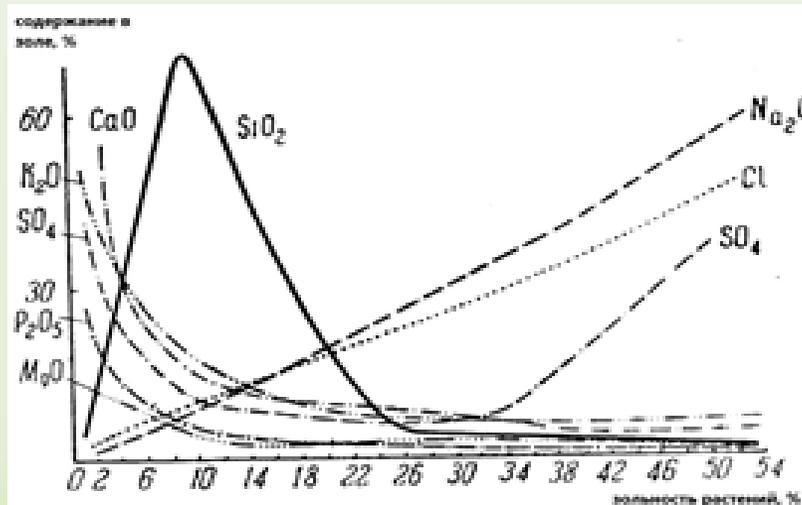
---

- Живые организмы планеты содержат около 3,5 миллиардов тонн Si (фосфора – 12 миллиардов тонн)
- Ежегодное вовлечение
- Si - 310-600 миллионов тонн (фосфора - 20-30 миллионов тонн)
- Ежегодный вынос с урожаем – 210-270 миллионов тонн Si (фосфора -10-15 миллионов тонн)

# Содержание кремния в растениях

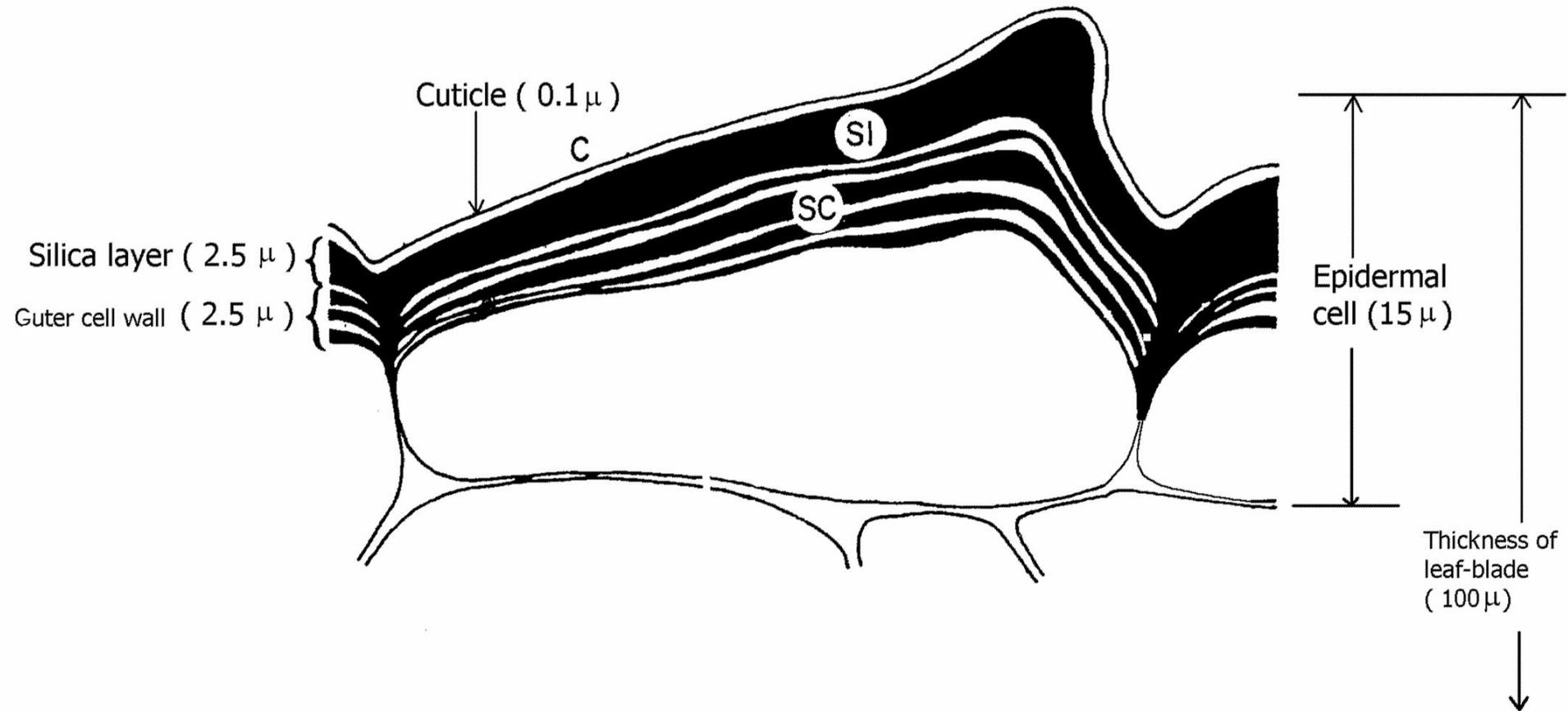


Содержание кремния в растениях



Вынос элементов с  
урожаем риса 5 т/га

# Механическая защита



# Моно- и поликремниевые кислоты в тканях ячменя, цветной капусты и *Distichlis spicata*



Часть растения	Монокремниевая кислота		Поликремниевые кислоты		Общее содержание Si, мг/кг сухой массы
	Si, мг/кг сырой массы	% от общего содержания Si	Si, мг/кг сырой массы	% от общего содержания Si	
<i>Hordeum vulgare</i> L					
Лист	100-150	7-10	800-1000	60-70	13000-15000
Узелки стебля	300-380	28-38	320-400	30-40	5400-6200
Межузелковое пространство стебля	160-190	15-20	500-570	40-60	9100-10200
Корень	340-380	6-9	650-750	15-25	15000-19000
<i>Distichlis spicata</i>					
Лист	290-330	12-16	800-920	10-15	13000-14000
Узелки стебля	140-170	18-25	630-710	15-20	6200-6400
Межузелковое пространство стебля	100-140	22-28	500-600	18-26	4000-4500
<i>Brassica oleracea</i> L					
Лист	50-70	25-30	90-110	40-55	3200-3600
Ствол	110-130	25-30	180-220	40-50	4100-4700



- Реакция конденсации ацетальдегида идет с образованием связи С=С по типу (Стрелко и др., 1962):



- Высоцкий с соавторами (Высоцкий, 1967) показали возможность образования полиаминоспиртов в тех же условиях, что и описанные выше для получения полиацетальдегида, т.е. на силикагеле:



- и также образование полиэтиленамина:

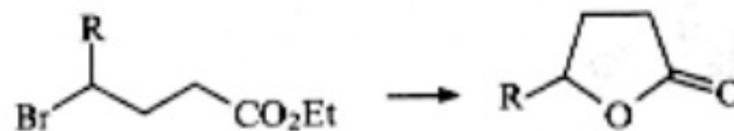
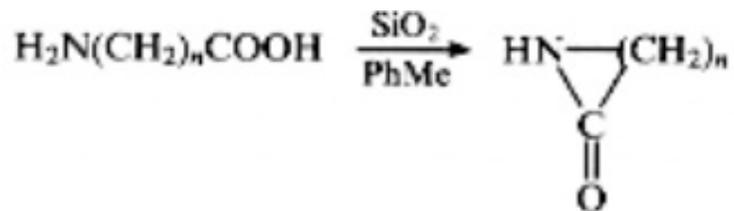


В. В. Стрелко с соавторами (Стрелко и др., 1963) высказали предположение, что «...реакции поликонденсации аминокислот, концентрируемых адсорбцией на поверхности кремнеземов, могли в свое время привести к образованию предбелков и сыграли немаловажную роль в процессе зарождения жизни на Земле».

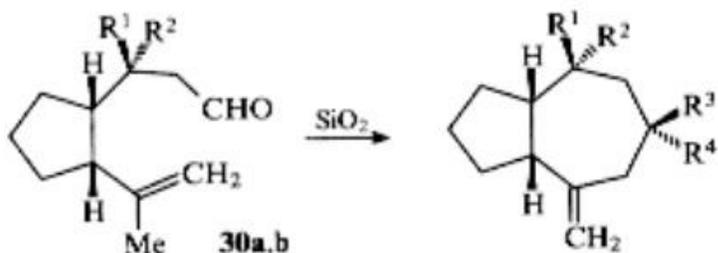
# Примеры каталитических реакций на гелях кремниевой кислоты (Banerjee et al., 2001)



## Циклизация

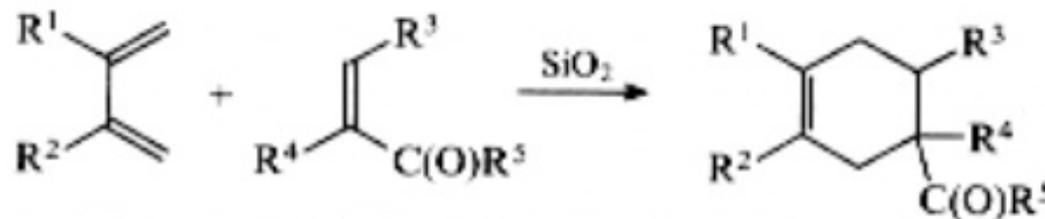
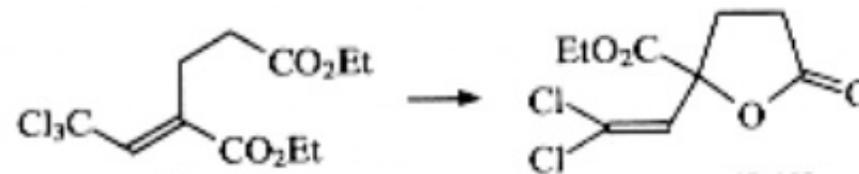


rateu anshyues 30.



**30a:**  $\text{R}^1 = \text{Me}, \text{R}^2 = \text{H}$ ,  
**30b:**  $\text{R}^1 = \text{H}, \text{R}^2 = \text{Me}$ ,

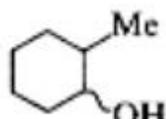
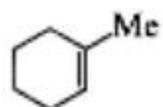
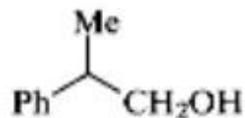
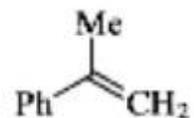
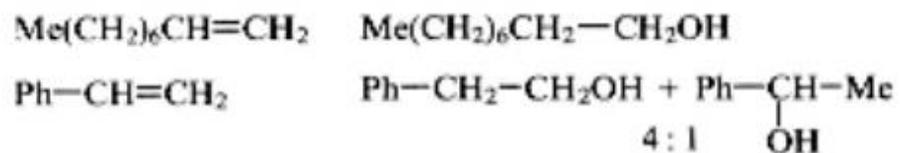
$\text{R}^3 = \text{H}, \text{R}^4 = \text{OH}$  (from **30a**),  
 $\text{R}^3 = \text{OH}, \text{R}^4 = \text{H}$  (from **30b**).



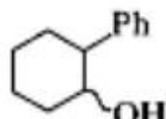
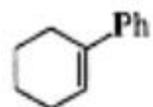
# Примеры каталитических реакций на гелях кремниевой кислоты (Banerjee et al., 2001)



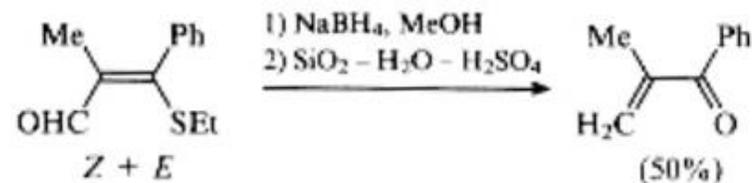
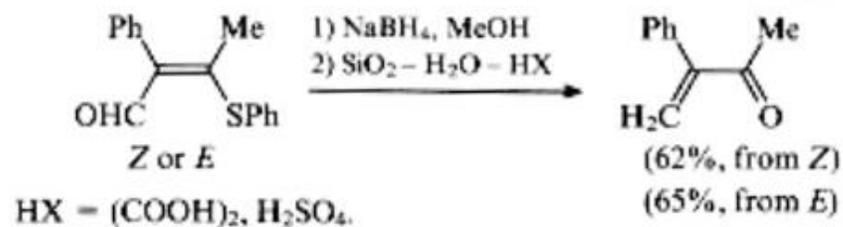
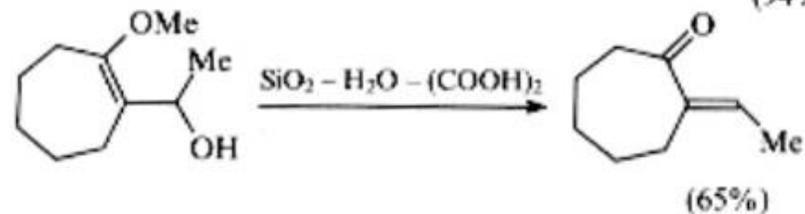
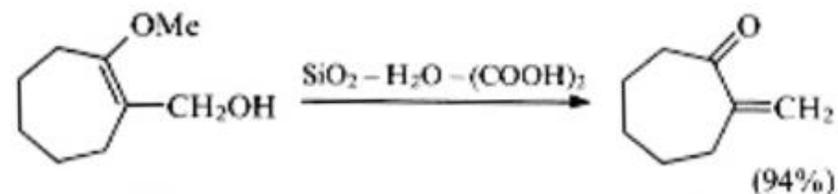
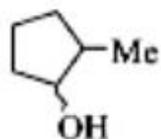
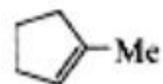
## Реакции гидратации и дегидратации



*cis:trans* = 3:7



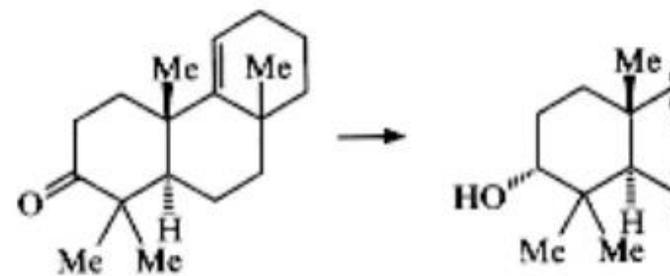
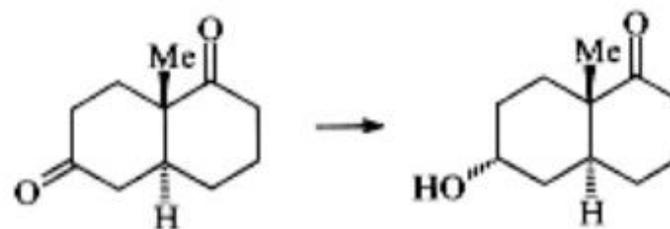
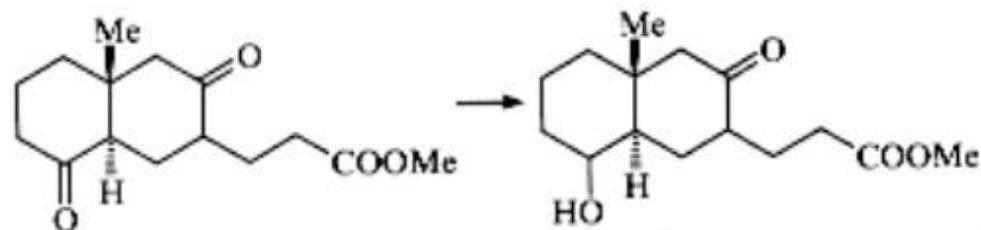
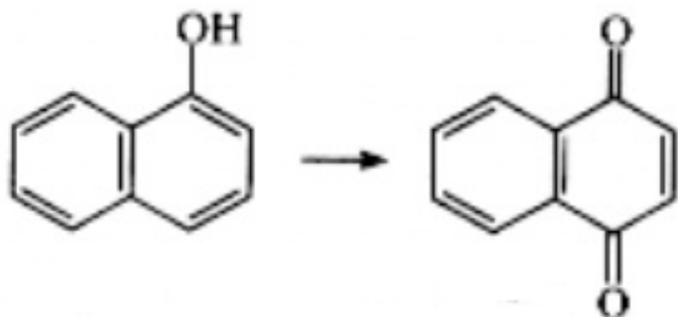
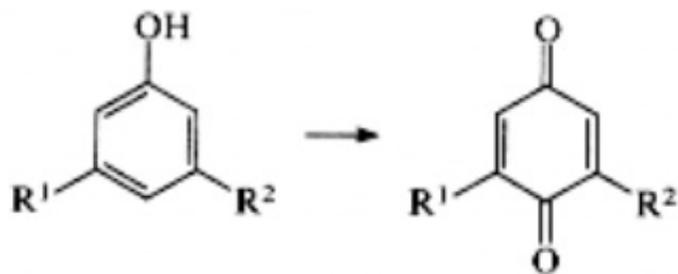
*cis:trans* = 1:3



# Примеры каталитических реакций на гелях кремниевой кислоты (Banerjee et al., 2001)



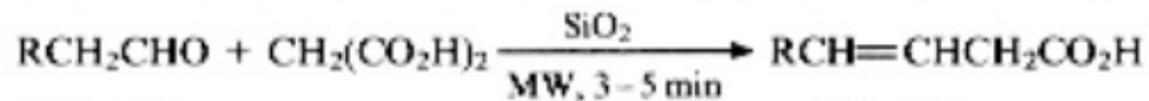
## Реакции окисления и восстановления



# Примеры каталитических реакций на гелях кремниевой кислоты (Banerjee et al., 2001)



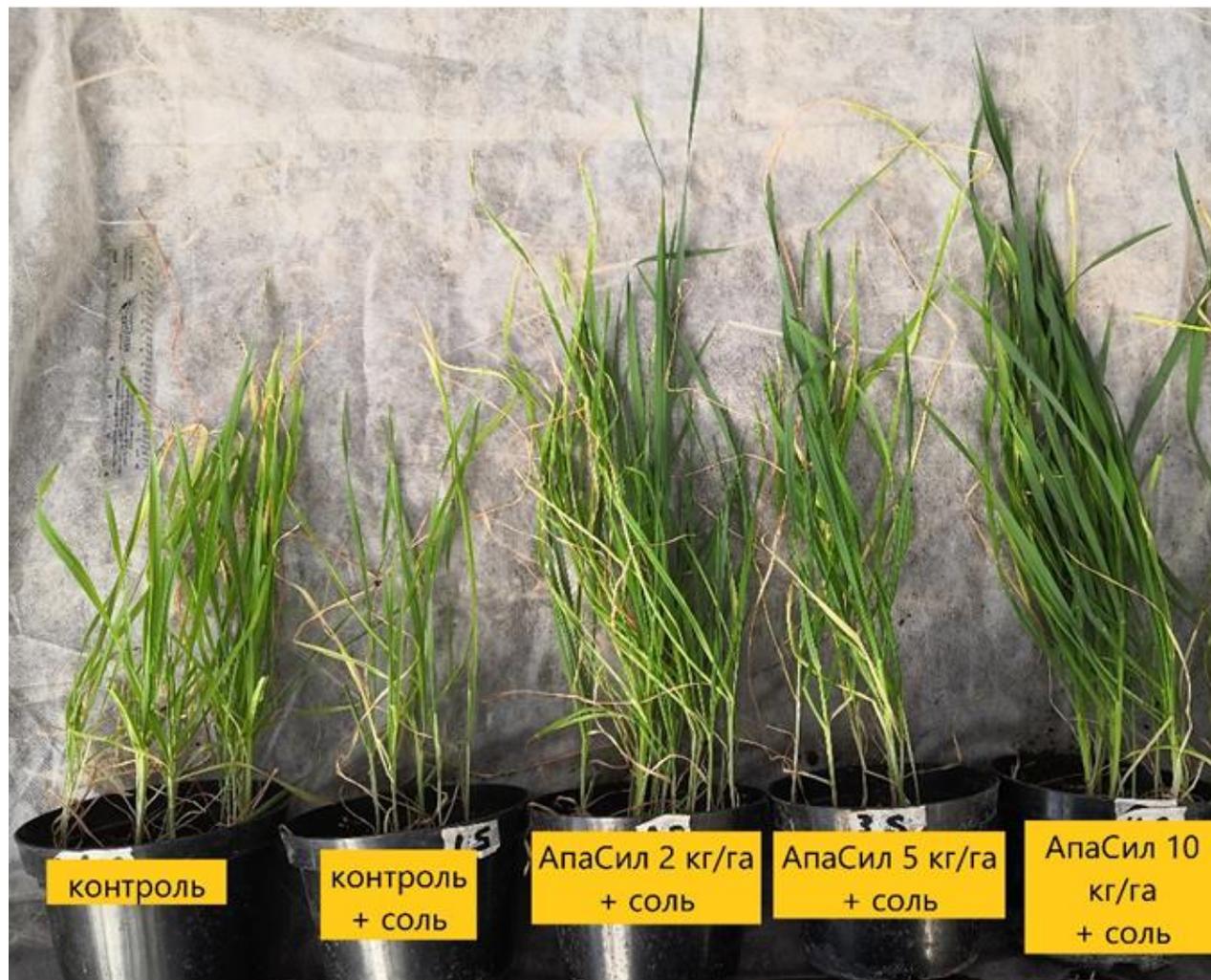
## Реакции конденсации



R <sup>1</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>3</sup>	Yield (%)	
$\begin{array}{c} \text{L-PhCH}_2\text{CH}-\text{C} \\   \quad \quad \quad \parallel \\ \text{AcNH} \quad \quad \text{O} \end{array}$	H	4-MeOC <sub>6</sub> H <sub>4</sub>	100	
	H	Ph	85	
	H	4-Me <sub>2</sub> NC <sub>6</sub> H <sub>4</sub>	58	
	H	4-O <sub>2</sub> NC <sub>6</sub> H <sub>4</sub>	37	
	H	2-HO <sub>2</sub> CC <sub>6</sub> H <sub>4</sub>	97	
	H	3-MeO-4-HOC <sub>6</sub> H <sub>3</sub>	93	
		-(CH <sub>2</sub> ) <sub>5</sub> -		46
		-(CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> -		35
		Me	Me	44
		HOCH <sub>2</sub>	Me	80
$\begin{array}{c} \text{L-PhCH}_2\text{CH}-\text{C} \\   \quad \quad \quad \parallel \\ (\text{N-Ac-L-Leu})\text{NH} \quad \text{O} \end{array}$	MeC(OH)H	Me	61	
	H	4-MeOC <sub>6</sub> H <sub>4</sub>	98	
$\begin{array}{c} \text{L-PhCH}_2\text{CH}-\text{C} \\   \quad \quad \quad \parallel \\ (\text{N-Ac-L-Leu-D-Phe})\text{NH} \quad \text{O} \end{array}$	H	4-MeOC <sub>6</sub> H <sub>4</sub>	94	

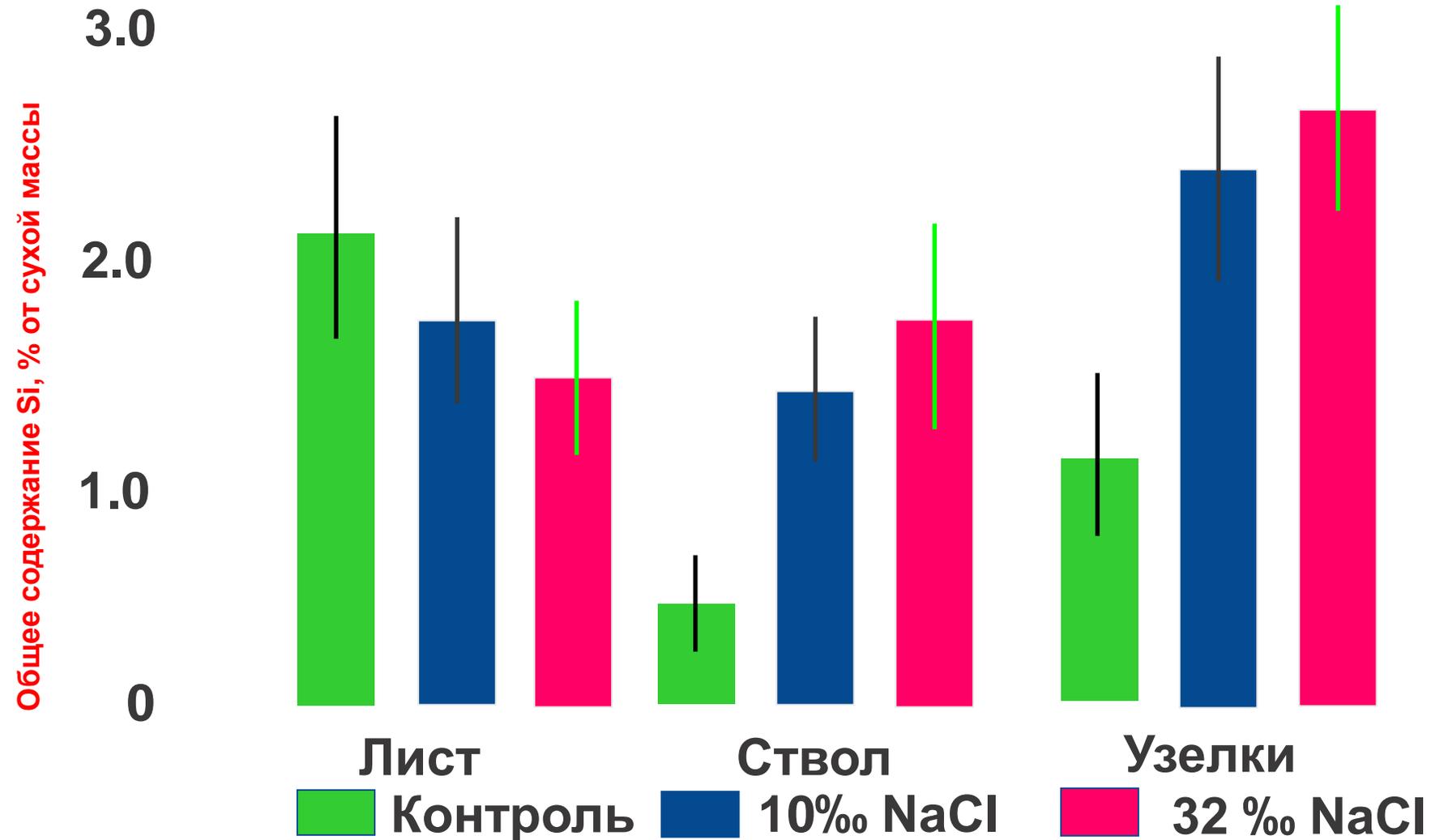


## Влияние кремниевых препаратов на солеустойчивость растений

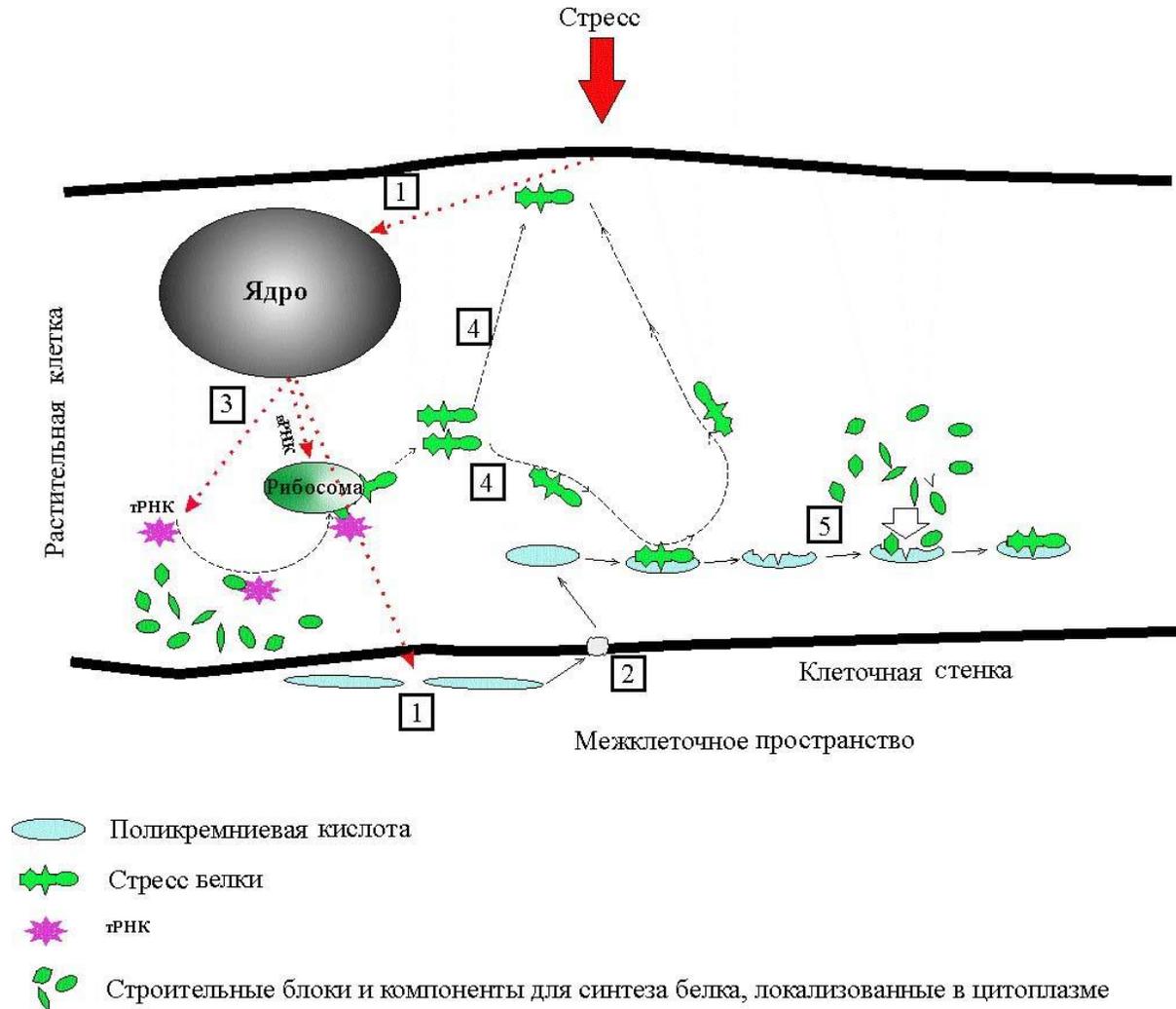


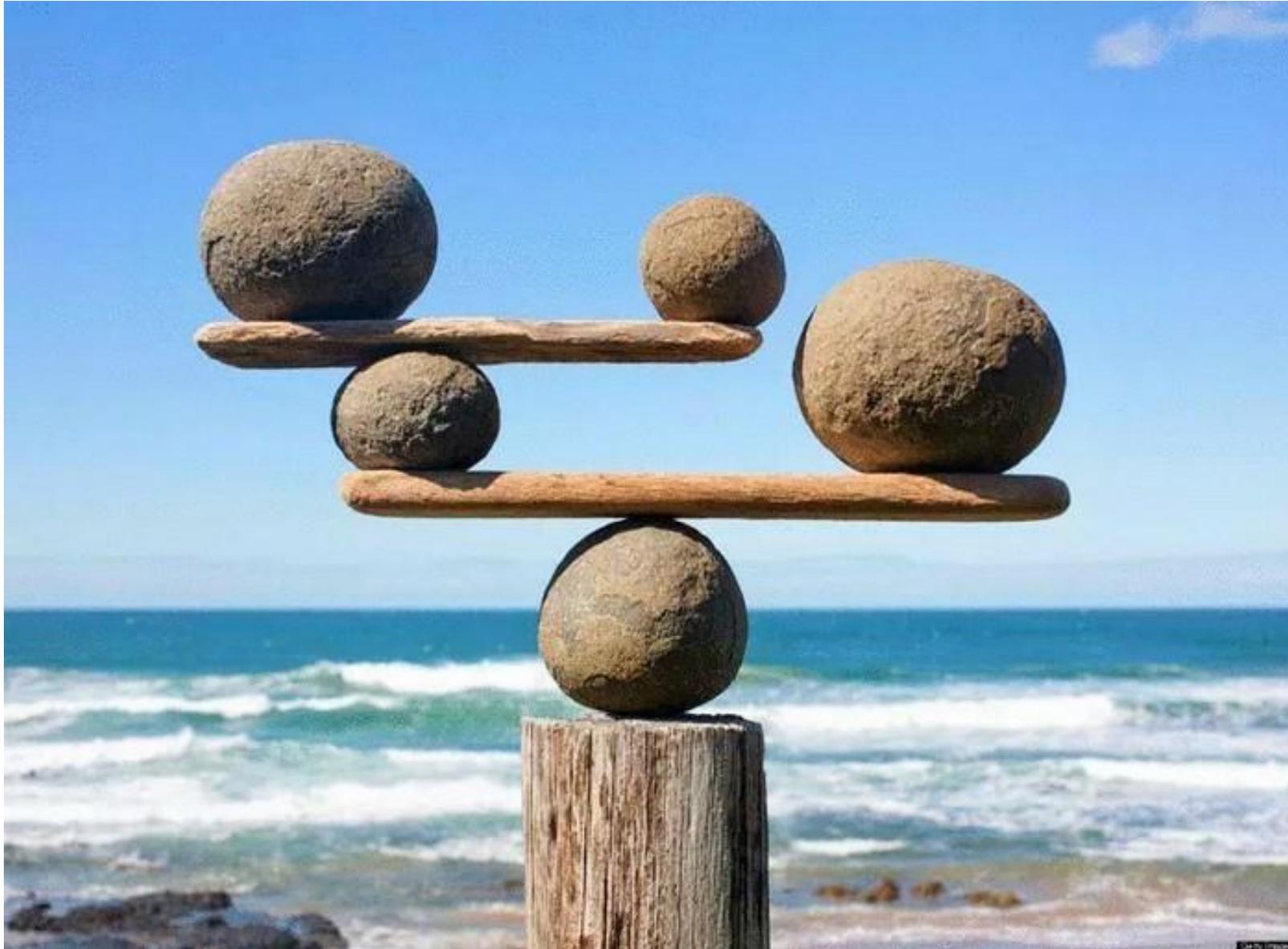


## Распределение Si в различных органах *D. spicata* при солевом стрессе



# Схема универсального вспомогательного механизма защиты растений с участием подвижных кремниевых соединений





# Стресс...



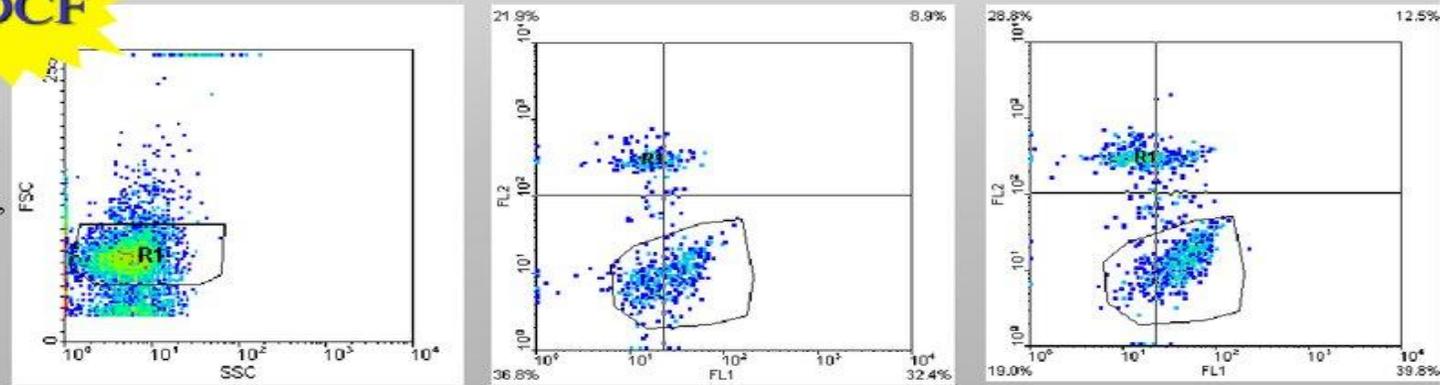




# Развитие окислительного стресса в нейроне. Регистрация АФК методом проточной цитометрии

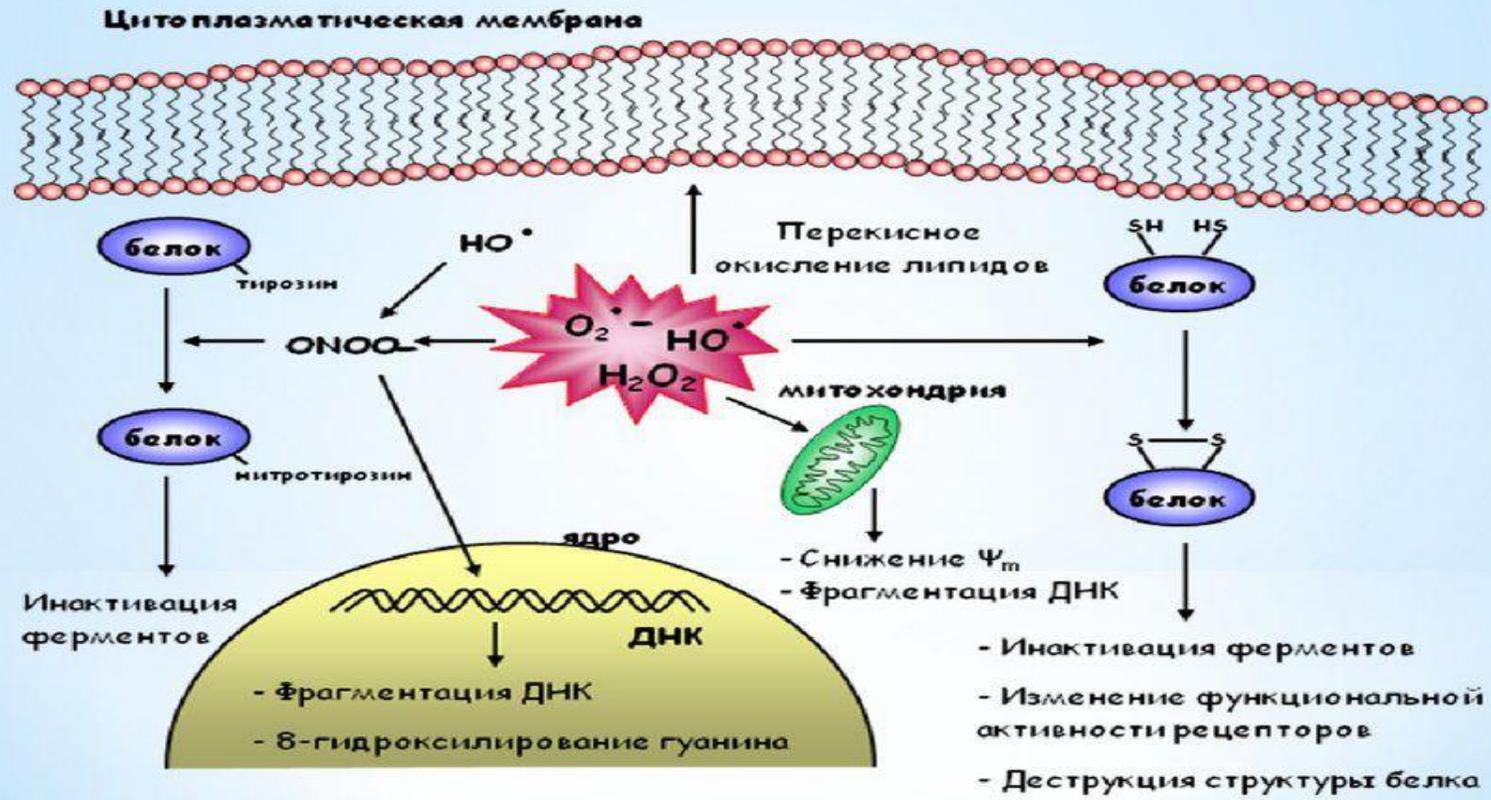


Не флуоресцирующая молекула DCF проникает в клетку, а ее окисленная форма флуоресцирует





# \* ОКИСЛИТЕЛЬНЫЙ СТРЕСС И ДЕСТРУКЦИЯ КЛЕТКИ



# Стресс...

---





## Равновесие.....

---

- активные форм кислорода (АФК):
  - супероксидный радикал ( $O_2^{\bullet-}$ ),
  - перекись водорода ( $H_2O_2$ ),  
гидроксильный радикал ( $\bullet OH$ ),
  - синглетный кислород ( $^1O_2$ ),
  - пероксидный радикал ( $ROO\bullet$ )
  - алкоксильные радикалы ( $RO\bullet$ )
- Антиоксиданты:
  - супероксиддисмутаза (SOD),
  - каталаза (CAT),
  - гваяколпероксидаза (G-POD),
  - аскорбатпероксидаза (APX),
  - глутатионпероксидаза (GPX),
  - глутатионредуктаза (GR)

## Для немикробных биостимуляторов обычно выделяют 6 подкатегорий:

---



- 1) хитозан - полисахарид, является компонентом хитина,
- 2) гуминовые и фульвокислоты,
- 4) экстракты морских водорослей,
- 5) Фосфит [ $\text{H}_2\text{PO}_3^-$  или  $\text{HPO}_3^{2-}$ ], аналог фосфата [ $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  или  $\text{HPO}_4^{2-}$  ],
- 6) Кремний является общепризнанным неорганическим биостимулятором, который активно используется во многих странах как биостимулятор.



# Si-содержащие материалы в сельском хозяйстве

## Мелиоранты

дозы: 0.5-10 т/га

Влияние на свойства почв – рН, микробную активность, сорбционную способность, активность макро и микроэлементов



## Si удобрения

дозы: 50-500 кг/га

Влияние на рост и развитие растений

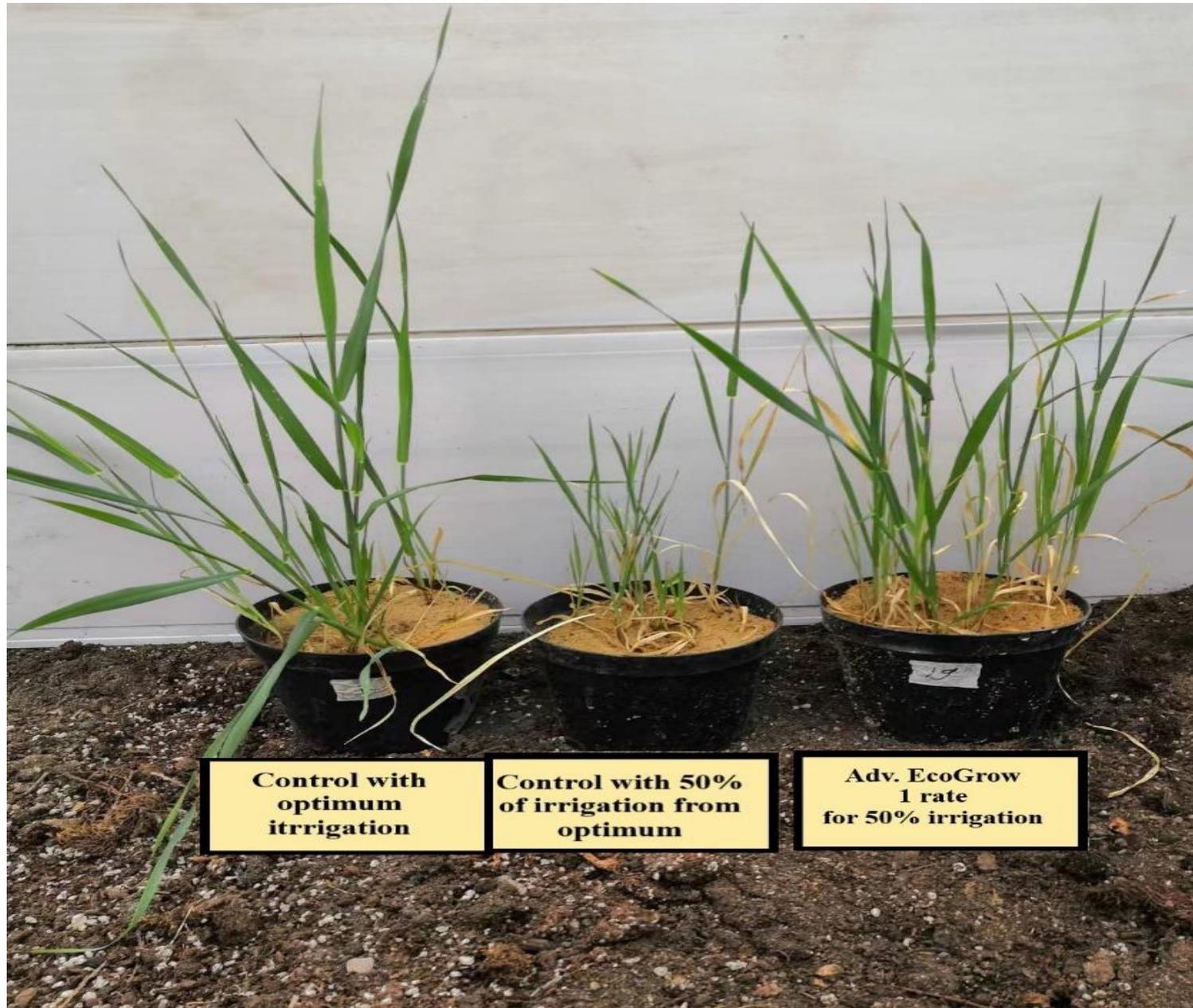


## Si биостимуляторы

дозы: 0.5-50 кг/га

Влияние на биохимические и физиологические свойства растений и их иммунную систему







## Содержание воды и атомов кремния в различных гелях кремниевой кислоты, образованных в лабораторных условиях



Номер геля	% кремния в геле	% воды в геле	Количество атомов воды на один атом кремния
<b>1</b>	<b>1.28</b>	<b>97.9</b>	<b>119</b>
<b>2</b>	<b>1.60</b>	<b>97.7</b>	<b>95</b>
<b>3</b>	<b>2.40</b>	<b>97.1</b>	<b>63</b>
<b>4</b>	<b>3.20</b>	<b>96.6</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>4.80</b>	<b>95.3</b>	<b>31</b>

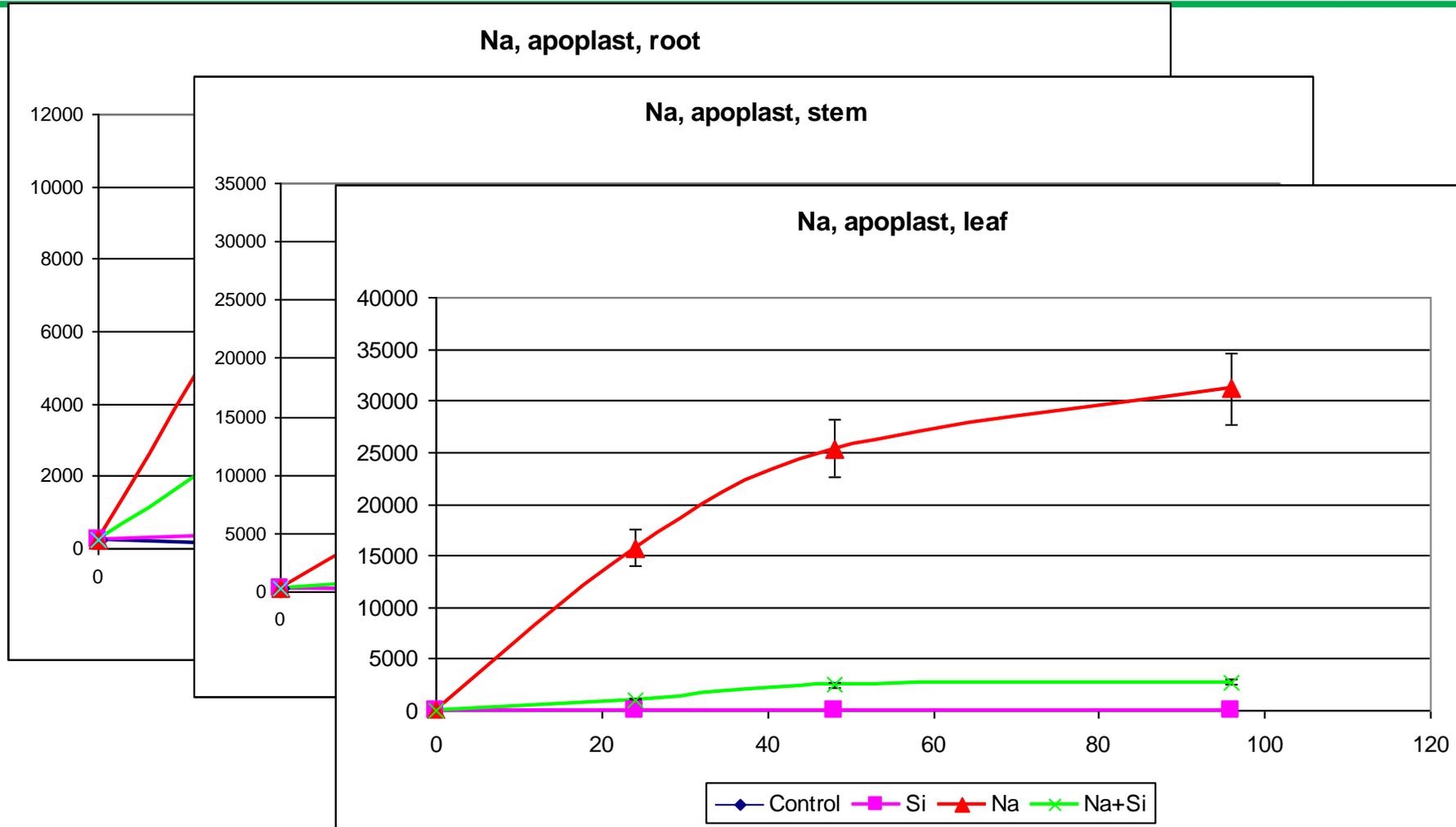
При нормальном кремниевом питании растение может запастись только с его помощью от 6 до 37 г воды на 100 г биомассы растения.

# Солеустойчивость гороха



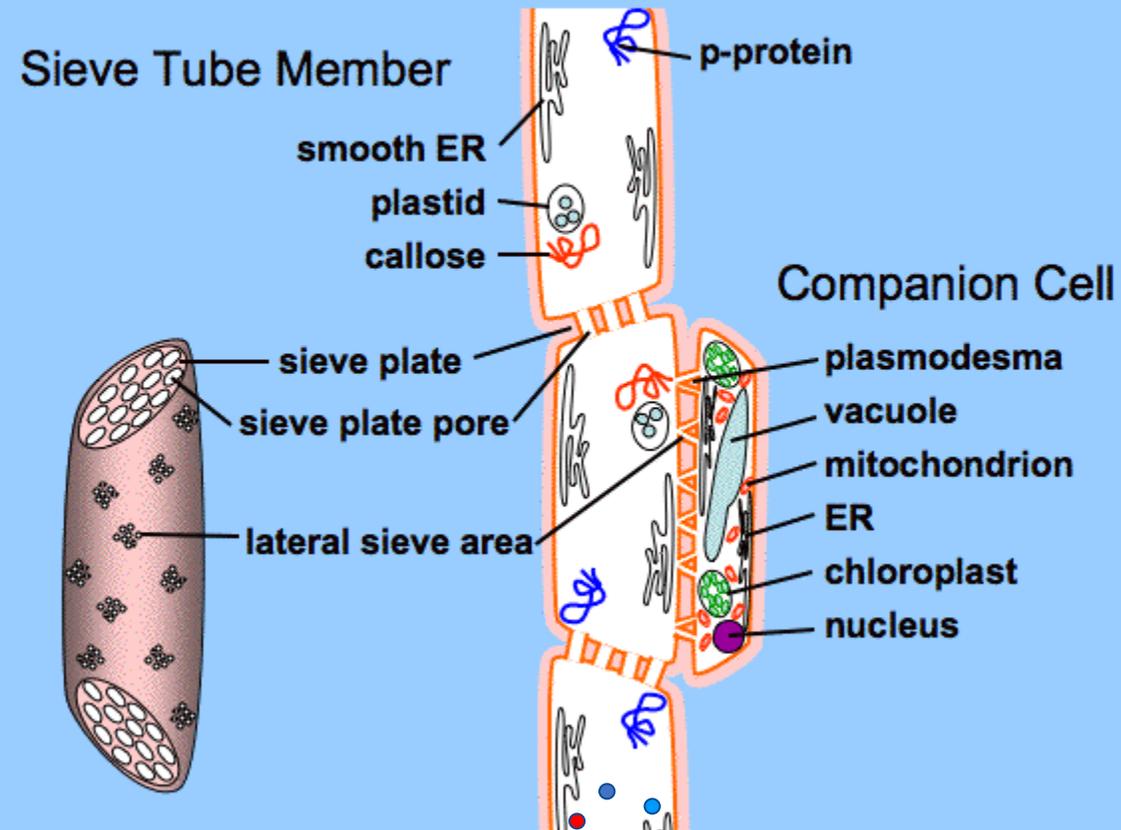


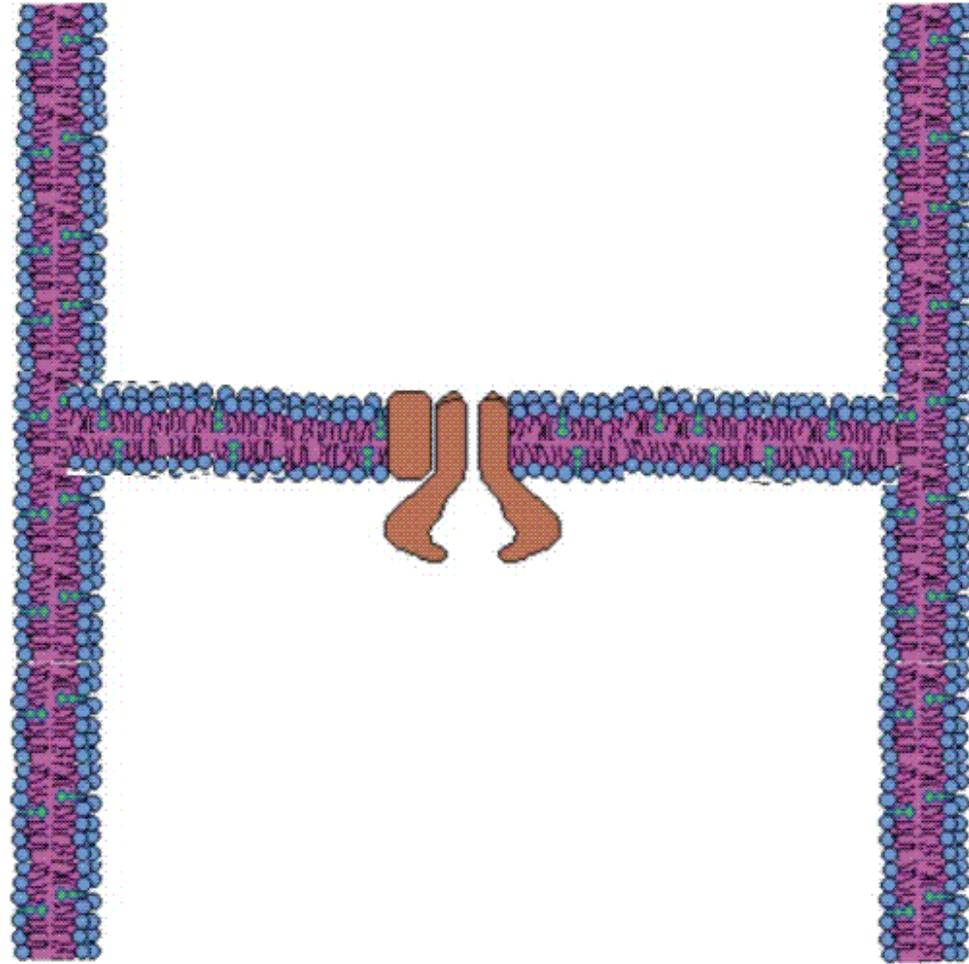
# Динамика содержания Na в апопласте ячменя



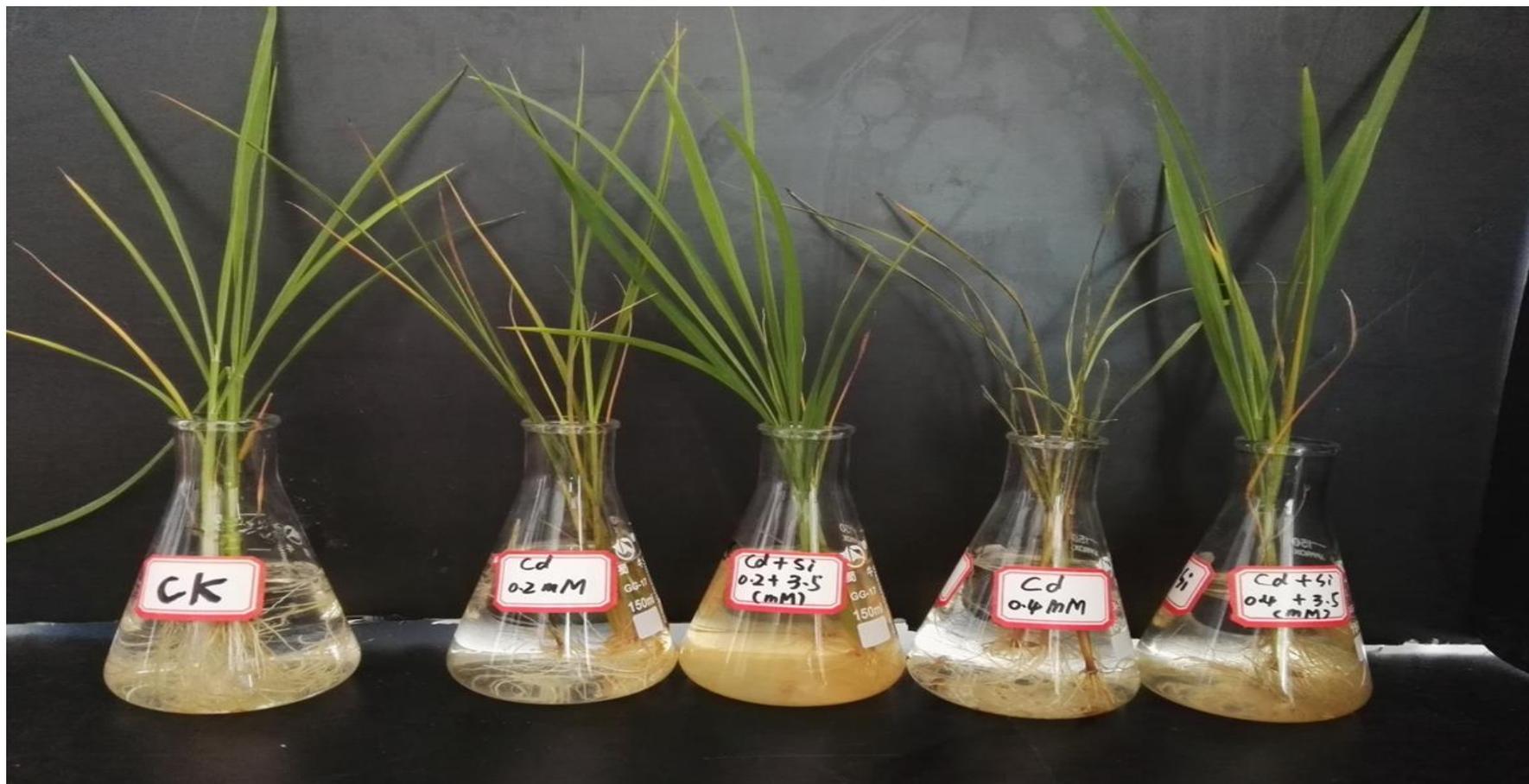


## Phloem Cell Interaction



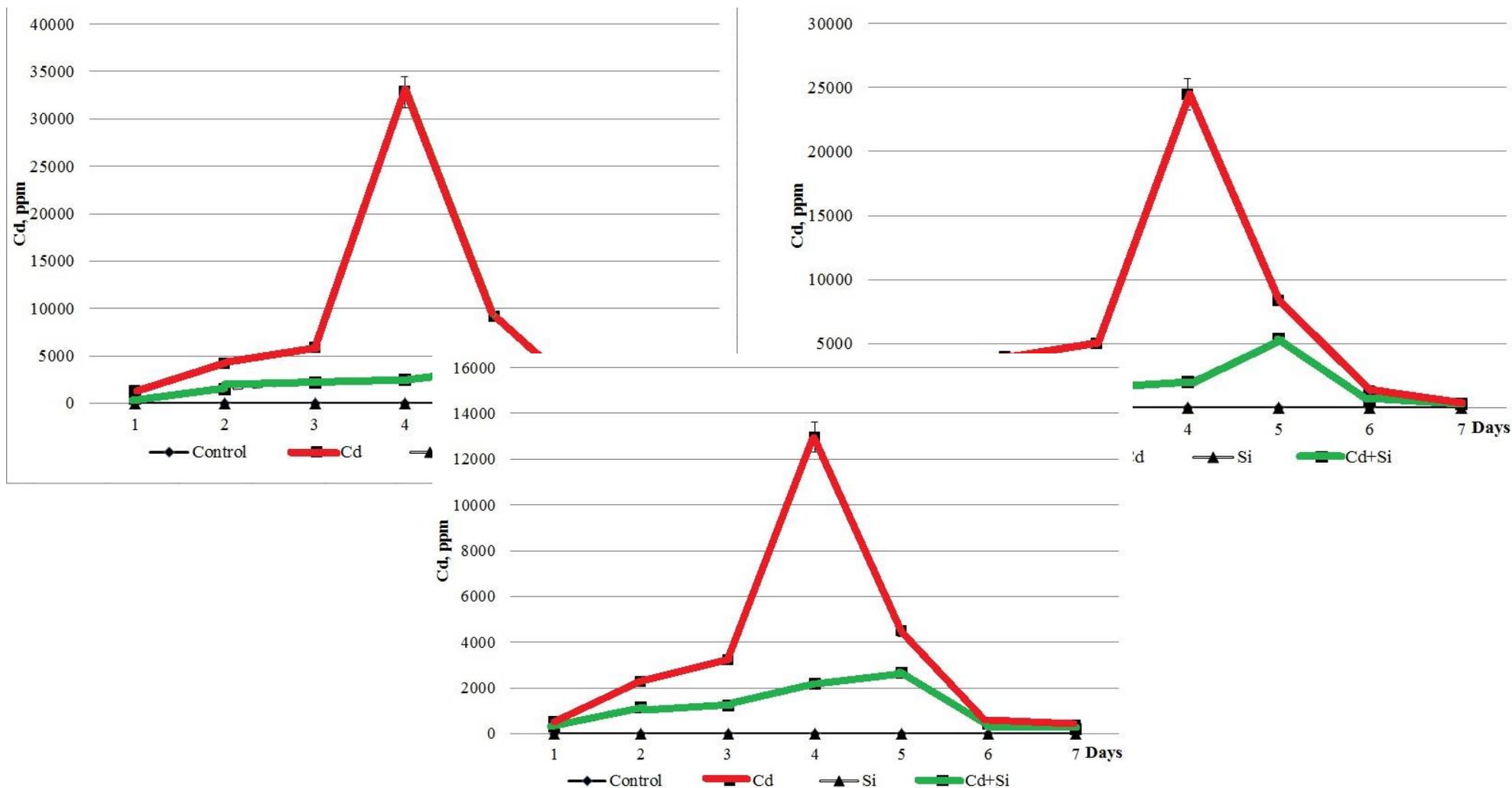


# Вегетационный эксперимент

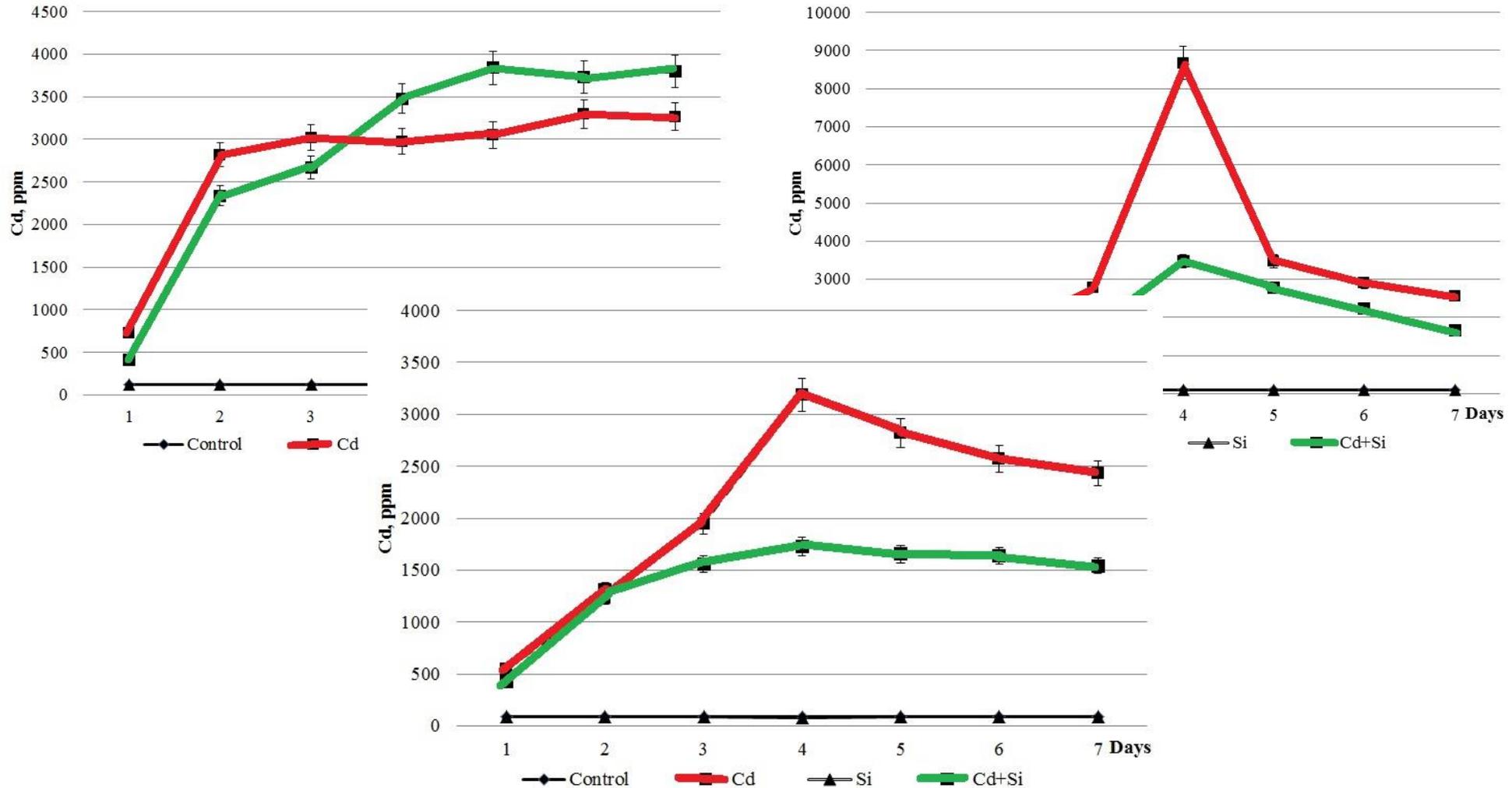




# Динамика Cd в апопласте



# Динамика Cd в Симпласте







## Выводы

---

- Кремний и его соединения играют важную роль в формировании почвенного плодородия, влияя как на химические, так и физические свойства почв.
- Разработана классификация почв по уровню дефицита активных форм кремния, которая может быть использована при использовании кремниевых удобрений и почвенных мелиорантов,
- Выявлено, что основной функцией кремния в жизни растений является обеспечение максимальной эффективности природной иммунной системы, которая обеспечивается несколькими механизмами,
- В настоящее время различают следующие типы кремниевых препаратов в сельском хозяйстве:
- Кремний содержащие почвенные мелиоранты (улучшение почвенного плодородия),
- Кремниевые удобрения (обеспечение кремниевого питания растений),
- Кремний-содержащие биостимуляторы (повышение устойчивости растений к стресс-факторам).
- Ежегодно в мире идет рост использования кремниевых препаратов на 10-20%



# Кремниевые препараты в России



Удобрение жидкое органическое.  
Универсал «EcoGrow»





---

**Спасибо за внимание!**