

## ИЗОТОПНЫЙ ОБМЕН СЕРЫ МЕЖДУ КОРНЯМИ РАСТЕНИЙ И ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДОЙ

Б. О. ОЙЕДЖОЛА, В. В. РАЧИНСКИЙ

(Кафедра прикладной атомной физики и радиохимии)

Ранее [2] были приведены результаты исследования изотопного обмена фосфора между корнями растений и питательной средой. По той же самой методике [1, 2] нами изучался изотопный обмен серы между корнями растений и питательной средой.

Томаты и салат от семени выращивали на питательной среде Кнопа, содержащей меченую серу ( $^{35}\text{S}$ ). Таким образом, получали растения, вся сера которых была тотально помечена изотопным индикатором. Далее растения переносили на такую же питательную среду, но содержащую уже немеченую серу. Радиометрически в течение 48 ч следили за кинетикой выделения меченой серы корнями растений. Для опыта брали растения различного возраста (от 1 до 6 недель). В конце его измеряли массу общей (немеченой и меченой) серы в питательном растворе. Обработка экспериментальных данных производилась так же, как и в опытах с меченым фосфором [2].

Кинетические кривые раскладывали на две экспоненциальные составляющие:

$$F_t = F_{1,\infty} (1 - e^{-r_1 t}) + F_{2,\infty} (1 - e^{-r_2 t}) \quad (1)$$

(обозначения см. в [1, 2]).

$F_{1,\infty}$  и  $F_{2,\infty}$  характеризуют относительную долю соответственно первого (с медленной кинетикой) и второго (с быстрой кинетикой) изотопнообменного фонда заданного элемента;  $r_1$  и  $r_2$  — соответствующие константы скорости кинетики выделения меченого элемента.

Рассчитывали также отношение массы выделенной в раствор меченой серы к массе поглощенной немеченой серы за 48 ч:

$$\alpha = \frac{M_{\infty}^*}{M_0 - M_{\infty}^1 + M_{\infty}^*}, \quad (2)$$

где  $M_0$  — исходная масса немеченой серы в питательном растворе ( $1/4$  нормы Кнопа),  $M_{\infty}^1$  — масса общей меченой и немеченой серы в растворе,  $M_{\infty}^*$  — масса выделенной меченой серы. Это отношение характеризует степень эквивалентности (или неэквивалентности) изотопного обмена серы между корнями растений и питательной средой.

Как и в опытах с меченым фосфором [2], значения  $F_{1,\infty}$ ,  $F_{2,\infty}$ ,  $r_1$  и  $r_2$  для растений различного возраста и вида оказались близкими, в пределах ошибок измерений, что и позволило нам усреднить эти величины по возрасту (табл. 1).

Совпадение значений параметров  $F_{1,\infty}$ ,  $F_{2,\infty}$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  в опытах с мечеными фосфором и серой может служить признаком общности компартиментов, местонахождения изотопнообменных фондов для этих двух важнейших биогенных элементов.

Из табл. 2 видно, что перенос растений на дистиллированную воду, как и в опытах с меченым фосфором, не изменяет кинетические параметры ( $F_{1,\infty}$ ,  $F_{2,\infty}$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ ) выделения меченой серы. Не изменяются эти параметры и при переносе растений на питательный раствор с добавкой ингибитора дыхания динитрофенола (табл. 3). Во всех случаях переменными являются только абсолютные значения, абсолютные масштабы

Таблица 1

Средние (по возрасту) значения параметров кинетики выделения меченой серы корнями томатов и салата при их переносе на питательный раствор смеси Кюпа

Серия опыта	1-я компонента		2-я компонента	
	$F_{1, \infty}$	$r_1$	$F_{2, \infty}$	$r_2$
Томаты				
I	0,39±0,01	0,093±0,001	0,61±0,01	1,42±0,04
II	0,38±0,01	0,091±0,001	0,62±0,01	1,67±0,12
Среднее	0,38±0,01	0,092±0,001	0,62±0,01	1,57±0,08
Салат				
I	0,40±0,01	0,093±0,004	0,60±0,01	1,58±0,06
II	0,37±0,01	0,092±0,001	0,63±0,01	1,40±0,09
Среднее	0,38±0,01	0,092±0,003	0,62±0,01	1,49±0,08
Среднее по видам растений	0,38±0,01	0,092±0,02	0,62±0,01	1,53±0,08
$T_{1/2}$		7,5 ч		0,45 ч

Таблица 2

Кинетика выделения меченой серы корнями растений в возрасте 6 недель при помещении их на дистиллированную воду

Номер серии	1-я компонента		2-я компонента	
	$F_{1, \infty}$	$r_1$	$F_{2, \infty}$	$r_2$
Томаты				
I	0,22	0,103	0,78	1,36
II	0,37	0,093	0,63	1,46
Среднее	0,30	0,098	0,70	1,41
Салат				
I	0,33	0,090	0,67	1,80
II	0,29	0,111	0,71	2,80
Среднее	0,31	0,100	0,69	2,30
Среднее по видам растений	0,30	0,099	0,70	1,85

Таблица 3

Кинетика выделения меченой серы корнями растений при помещении их на питательный раствор Кюпа с добавкой  $10^{-4}$  М динитрофенола (в среднем по 4, 5 и 6-недельному возрасту растений)

Номер серии	1-я компонента		2-я компонента	
	$F_{1, \infty}$	$r_1$	$F_{2, \infty}$	$r_2$
Томаты				
I	0,44±0,01	0,085±0,007	0,56±0,01	1,72±0,21
II	0,26±0,01	0,075±0,006	0,74±0,02	1,56±0,11
Среднее	0,35±0,02	0,080±0,007	0,65±0,02	1,64±0,16
Салат				
I	0,42±0,02	0,090±0,003	0,58±0,02	1,56±0,07
II	0,28±0,02	0,085±0,001	0,72±0,01	1,46±0,02
Среднее	0,35±0,02	0,088±0,002	0,65±0,02	1,50±0,05
Среднее по видам растений	0,35±0,02	0,084±0,005	0,65±0,02	1,57±0,10

Определение соотношения выделяемой меченой серы и поглощенной немеченой серы  
 $M_0=10,71$  мг на 0,5 л раствора 1/4 нормы Кнопа

Возраст растений, нед	$M_{\infty}^1$ , мг	$M_{\infty}^*$ , мг	$M_0 - M_{\infty}^1 + M_{\infty}^*$ , мг	$\alpha$	Среднее
Томаты					
I серия					
1	3,10	0,021	1,90	0,011	0,017±0,006 $w=39,6\%$
2	7,62	0,040	3,07	0,013	
3	7,45	0,043	3,21	0,014	
4	6,74	0,074	3,90	0,019	
5	6,63	0,091	3,99	0,023	
6	6,46	0,094	4,16	0,023	
II серия					
1	8,23	0,028	2,45	0,011	0,015±0,003 $w=23,9\%$
2	8,16	0,029	2,52	0,012	
3	8,01	0,037	2,66	0,014	
4	7,80	0,042	2,67	0,016	
5	7,60	0,056	3,05	0,018	
6	7,80	0,049	2,86	0,017	
Салат					
I серия					
1	8,01	0,026	2,67	0,010	0,017±0,007 $w=42,8\%$
2	7,71	0,036	2,96	0,012	
3	7,40	0,050	3,26	0,015	
4	7,00	0,067	3,64	0,018	
5	6,51	0,094	4,11	0,023	
6	6,49	0,095	4,13	0,023	
II серия					
1	8,30	0,026	2,38	0,011	0,013±0,003 $w=21,7\%$
2	8,16	0,027	2,52	0,011	
3	8,01	0,035	2,67	0,013	
4	7,90	0,041	2,77	0,015	
5	7,80	0,043	2,87	0,015	
6	7,70	0,046	2,96	0,016	
Среднее по видам растений и сериям					
—	—	—	—	—	0,015±0,005 $w=33,3\%$

изотопнообменных фондов меченого фосфора и меченой серы (табл. 4 и 5).

Постоянство констант кинетики выделения меченого фосфора независимо от возраста растений и от некоторых других условий (дистиллированная вода, раствор с ДНФ) мы объясняли диффузионным механизмом кинетики выделения меченого элемента [2]. По-видимому, тот же диффузионный механизм лежит в основе кинетики выделения меченой серы.

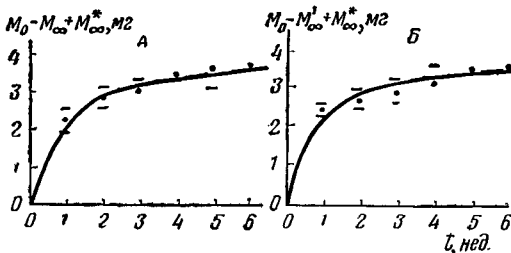


Рис. 1. Зависимость массы поглощенной немеченой серы корнями от возраста растений.

A — томаты; B — салат.

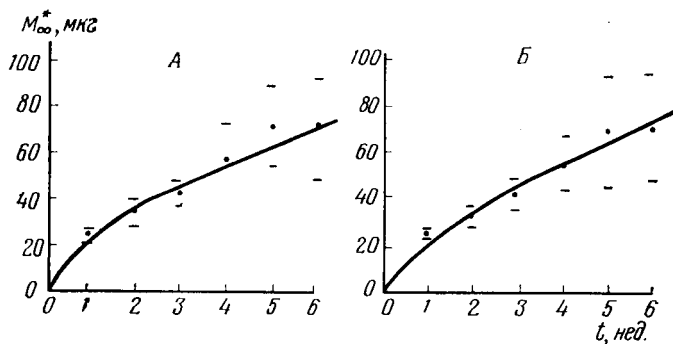


Рис. 2. Зависимость массы выделенной меченой серы корнями от возраста растений.  
А — томаты; Б — салат.

Расчеты отношения  $\alpha$  показали, что этот коэффициент практически не зависит от возраста (1—6 нед) и вида растений (томаты, салат). Для изотопного обмена серы он равен в среднем  $0,015 \pm 0,005$ , т. е. приблизительно 1,5 %. Для изотопного обмена фосфора данное отношение составляло около 5 % [2]. Это показывает, что изотопный обмен как фосфора, так и серы носит сугубо неэквивалентный характер. Отсюда следует также, что в балансовых расчетах изотопнообменным выделением поглощаемого растениями элемента практически можно пренебречь. Разумеется, этот вывод относится к растениям, интенсивно растущим и, следовательно, интенсивно ассимилирующим питательные элементы из среды. Кривые кинетики поглощения немеченой серы и выделения меченой серы корнями растений в онтогенезе показаны на рис. 1 и 2.

Таблица 5

Определение соотношения выделенной меченой и поглощенной немеченой серы в опыте с добавлением  $10^{-4}$  М ДНФ.  $M_0 = 10,71$  мг

Возраст растений, нед	$M_{\infty}^1$ , мг	$M_{\infty}^*$ , мг	$M_0 - M_{\infty}^1 + M_{\infty}^*$ , мг	$\alpha$	Среднее
Томаты					
I серия					
4	7,70	0,038	2,97	0,013	$0,015 \pm 0,001$ $\omega = 6,6\%$
5	7,39	0,053	3,27	0,016	
6	7,36	0,054	3,30	0,016	
II серия					
4	7,80	0,042	2,87	0,015	$0,012 \pm 0,001$ $\omega = 8,3\%$
5	8,00	0,031	2,68	0,012	
6	8,20	0,026	2,48	0,010	
Салат					
I серия					
4	7,71	0,038	2,96	0,013	$0,015 \pm 0,001$ $\omega = 6,6\%$
5	7,37	0,051	3,29	0,016	
6	7,49	0,053	3,17	0,017	
II серия					
4	8,20	0,028	2,48	0,011	$0,009 \pm 0,001$ $\omega = 11,1\%$
5	8,10	0,026	2,58	0,010	
6	8,42	0,016	2,29	0,007	
Среднее по видам растений и по сериям					$0,013 \pm 0,001$ $\omega = 7,7\%$

Добавление в питательный раствор ингибитора дыхания ДНФ практически не повлияло на значение  $\alpha$  (табл. 5).

Перенос на дистиллированную воду снижал выделение меченой серы примерно в 3 раза, перенос на среду с ДНФ — примерно в 2 раза (ср. табл. 4 и 5). Поглощение немеченой серы тормозилось ДНФ в меньшей степени, чем выделение меченой серы (на 10—20 %).

Заметное уменьшение выделения меченой серы корнями при переносе растений на дистиллированную воду свидетельствует, что этот процесс происходит по ионообменному и изотопнообменному механизмам, хотя кинетика его лимитируется временем молекулярной диффузии. Слабое влияние ДНФ на выделение и поглощение меченой серы может служить также признаком большей роли пассивного, диффузионного механизма изотопного обмена серы (ее поступления и выделения) между корнями и средой и незначительного влияния на этот процесс метаболических процессов.

### Выводы

1. Кинетика выделения меченой серы корнями растений оказалась такой же, как и кинетика выделения меченого фосфора [2]. Она описывается такими же кинетическими уравнениями и такими же по численному значению кинетическими параметрами.

2. Отношение массы выделенной меченой серы к массе поглощенной немеченой серы ( $\alpha$ ) при нормальных условиях питания, а также в среде с ДНФ практически не зависит от возраста (от 1 до 6 нед) и вида растений (томаты, салат) и составляет в среднем около 1,5 %.

3. Полученные данные свидетельствуют, что кинетика выделения меченой серы, подобно фосфору, лимитируется скоростью диффузии ионообменных и изотопнообменных форм этого элемента.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ойеджолла Б. О. Исследование изотопных эффектов и изотопного обмена при использовании меченого ( $^{32}\text{P}$ ) фосфора и меченой ( $^{35}\text{S}$ ) серы в опытах с растениями. Автореф. канд. дис. М., 1970. — 2. Р а ч и н -

ский В. В., Ойеджолла Б. О. Изотопный обмен фосфора между корнями растений и питательной средой. — Изв. ТСХА, 1979, вып. 4, с. 93—99.

*Статья поступила 9 января 1979 г.*

### SUMMARY

The process of sulphur isotope exchange in plant — nutrient medium system was investigated. Curves of kinetics of secretion of labelled sulphur by tomato and lettuce roots are obtained. The results of the experiments are in agreement with the results of analogous experiments with labelled phosphorus [2]. Kinetic curves of secretion of labelled sulphur are described by the same kinetics equations with the same numerical parameters as in isotope exchange of phosphorus. The ratio of the masses of secreted labelled and absorbed non-labelled sulphur makes about 1,5 %. Dinitrophenol slightly inhibits the secretion of labelled sulphur and the absorption of non-labelled one. The conclusion is made that kinetics of isotope exchange of phosphorus and sulphur is limited by the speed of the diffusion of ion-exchange and isotope-exchange forms of these elements.