

ISSN 0032-874X

ПРИРОДА

9-90



Биологические применения счетных трубок

Х. И. Борн, Н. В. Тимофеев-Ресовский и К. Г. Циммер

В ТЕЧЕНИЕ последнего десятилетия получила развитие одна из областей биологии, для которой очень важно измерять самые малые количества радиоактивных веществ или очень небольшие дозы излучения. Речь идет прежде всего об использовании индикаторного метода с радиоактивными изотопами (т. е. наблюдения за организмами после введения в них радиоактивных веществ), измерении естественных, а также введенных в организмы извне в токсических количествах радиоактивных веществ и измерении совсем незначительных доз излучений при защите от облучения. Развитие этой области биологии связано в первую очередь с созданием адекватных методов измерения, среди которых главным следует назвать метод Гейгера.

Измерения радиоактивных излучений претерпели значительное развитие с тех пор, как были изобретены и усовершенствованы методики счета отдельных частиц. Несмотря на обилие простейших инструментальных методов измерения, таких как сцинтилляционный, наиболее важные результаты получены при быстром внедрении электрического счета, который скоро оттеснил другие методы на задний план. Это не удивительно, поскольку электрические методы — не только объективны и наименее трудоемки, но также, благодаря автоматизации, чрезвычайно производительны и чувствительны (подсчет числа частиц в единицу времени). Поэтому не будет преувеличением сказать, что разработанные Гейгером (частично с соавторами) электрические методы легли в основу экспериментального решения многих проблем, в которых измерение излучений играет первостепенную роль. Это относится к обширным областям современной физики, в особенности к бурно развивающейся в настоящее время атомной физике; в равной степени это относится и к таким областям биологии, как физиология и экспериментальная медицина, в которых применение новых электрических методов счета уже дало мас-

су прекрасных результатов. Прежде чем перейти к изложению главного предмета нашей статьи, следует вкратце упомянуть биологические работы, в которых были использованы электрические методы счета.

Наиболее старому методу измерения, с помощью иглового счетчика, описанному Резерфордом и Гейгером в 1909 г.¹, здесь можно не уделять внимания, поскольку для решения биологических проблем он используется редко. Напротив, очень важную роль сыграли электронные счетные трубки, описанные Гейгером и Мюллером в 1928 г.², которые получили распространение в виде многочисленных модификаций. Для интересующих нас областей применения наиболее удобны трубки «классического» варианта подсчета отдельных столкновений с подходящим усилителем, облегчающим механическую регистрацию, а также использование технических новинок, при которых важен не столь подсчет отдельных столкновений, сколь измерение интегрального потока.

Оба варианта пригодны для решения технических вопросов измерения, особенно в случаях индикаторного метода с искусственными и естественными радиоактивными веществами. Они применимы также для решения совсем других проблем, например защиты от излучений или диагностики загрязнения радия — и в этих случаях счетные трубки дают превосходные результаты. Как показал Раевский³, подобные световые счетчики пригодны и для измерений ультрафиолетовых и видимых лучей.

Приведем примеры работ из различных областей, где счетные трубки служат измерительными приборами.

Использование счетных трубок лежит в основе биологического индикаторного метода с радиоактивными изотопами. Сущность метода в том, что наблюдаемое вещество «метят» очень небольшим количеством ра-

¹ Rutherford E., Geiger H. // *Physik. Z.* 1909. Bd. 10. S. 1.

² Geiger H., Müller V. // *Physik. Z.* 1928. Bd. 29. S. 839.

³ Rajewsky B. N. // *Strahlenther.* 1931. Bd. 39. S. 194; *Ann. Physik.* 1934. Bd. 20. S. 13.

диоактивного изотопа в виде простых веществ или соединений. Возможность регистрации отдельных частиц радиоактивного распада с помощью счетных трубок позволяет использовать незначительные количества веществ по сравнению с обычными концентрациями, применяемыми при химическом и даже микрохимическом количественном анализе.

Ранее в ряде биологических исследований уже применялся индикаторный метод с естественными радиоактивными атомами. С его помощью можно было, например, определять нахождение и распределение в теле тяжелых элементов, таких как свинец, радий и висмут. В таких опытах измерительным прибором часто был и электроскоп. Появление искусственных радиоактивных изотопов различных элементов значительно расширило возможности индикаторного метода. Несмотря на то, что большинство искусственных радиоактивных изотопов получают в настоящее время лишь в незначительных количествах, наличие их хорошо регистрируется чувствительными счетными трубками. В последние годы индикаторный метод с искусственными радиоактивными изотопами все чаще применяется в биологии, и, вероятно, область применения счетных трубок будет значительно расширяться. Нам хотелось бы на нескольких примерах обрисовать лишь многообразие этих областей, не претендуя на полноту и подробности при изложении различных возможностей применения метода.

Если растения выращивают на питательном растворе, содержащем фосфор, то фосфат можно пометить радиоактивным фосфором и путем определения активности следить за поглощением и распределением фосфора. Результаты одного из таких исследований показаны в табл. 1. Пример изучения распределения и интенсивности обмена фосфора в различных органах животного после инъекции приводится в табл. 2. Индикаторный метод особенно ценен при изучении распределения токсических веществ, действие которых ощутимо даже при крайне малых количествах, и поэтому обнаружить их особенно трудно. Для иллюстрации этого в табл. 3 и на рис. 1 приведены примеры исследования распределения мышьяка.

Наряду с такого рода задачами, в которых индикаторный метод облегчает аналитическое определение, возникают и другие возможности, например изучение диффузии веществ через клеточные и иные мембраны, а также обмена элементов между различными соединениями в организме, причем в данном случае возможна «метка» лишь

Таблица 1
Поглощение и распределение фосфора в растении табака*. [По: Born H. J., Lang A., Schramm G., Zimmer K. G. // Naturwiss. 1941. Bd. 29. S. 222]

Последовательность листьев снизу	Сухой вес, мг	Активность		
		частиц/мин	% от внесенной	на 100 мг сухого веса
15	17,8	226	4,71	1270
13	45,5	379	7,90	832
11	74,8	311	6,48	416
9	62,2	202	4,21	325
7	65,4	176	3,67	269
5	57,8	132	2,75	228
3	54,3	39,4	0,82	72,5
1	27,0	0	0	0

* Растения выращивали в фосфатном питательном растворе, содержащем радиоактивный фосфор. В конце опыта в питательном растворе определяли содержание радиофосфора.

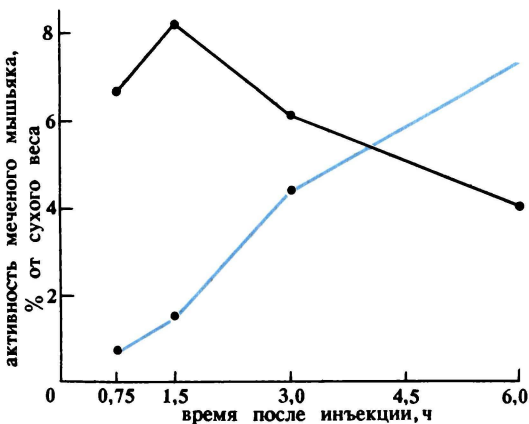
Таблица 2
Содержание фосфора и радиофосфора в различных органах крыс через 72 ч после внутривенного введения фосфата натрия, содержащего радиофосфор. [По: Born H. J. // Naturwiss. 1940. Bd. 28. S. 476]

Исследуемый материал	Фосфор, мг	Активность, частиц/мин	Активность/содержание фосфора
Череп	33	460	14
Зубы	11,1	132	11,9
Нижняя челюсть	11,5	184	16
Бедро, сустав	9,8	340	34,7
Бедро, метафиз	9,6	138	14,4
Почка	5	246	49
Печень	22,7	1650	73
Селезенка	4,5	326	73
Щитовидная железа	1,3	82	63
Желудок, кишки	37	1590	43
Половые органы	1,6	150	94
Мозг	4	76	19

отдельными группами атомов. Для иллюстрации можно привести примеры исследования обмена атомов хлора, фосфора и натрия между плазмой крови и форменными элементами. Эти результаты, представленные на рис. 2, свидетельствуют об исключительном больших различиях между этими тремя изотопами в физиологическом отношении. Вопросы, связанные с использованием индикаторного метода, не могут быть, однако, освещены во всей полноте.

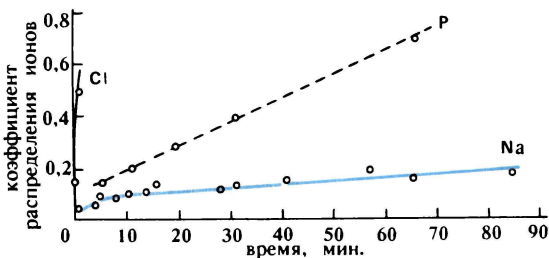
Таблица 3
Радиоактивность (на 100 мг биомассы, част./мин) мышьяка в органах мышей, погибших через разное время после инъекции. (По: Born H. J., Timoféeff-Ressovsky N. W., Zimmer K. G. // Umschan. 1941. Bd. 45. S. 83)

Орган	Время гибели, ч				
	1,5	3	6	18	22
Кровь	96,1	47,7	3,8	—	—
Печень	8,3	6,7	2,9	2,3	1,8
Почка	27,5	24,1	9,4	7,8	2,8
Селезенка	14,3	10,8	4,9	1,7	—
Гонады	1,4	2,8	10,8	1,3	—
Моча	469	858	313	47,6	—



Зависимость концентрации радиоактивного мышьяка от времени после инъекции в слюнную железу (цветная линия) и половую железу (черная линия) домовых мышей. В слюнной железе мышьяк обнаруживается очень быстро; в половой железе максимальное его количество наблюдается в первые 6 ч. (По Борну и Тимофееву-Ресовскому.)

Другая группа работ посвящена мечению элементарных биологических частиц, например вирусов и фагов, радиоактивными атомами для выяснения их строения и обмена веществ непосредственно в организме хозяина. В табл. 4 приведены результаты опытов по мечению вируса табачной мозаики; при этом удается встроить радиофосфор в молекулу вирусного белка. С этой целью растения табака выращивали на питательном растворе, содержащем радиоактивный фосфор, и через определенные промежутки времени инфицировали вирусом. Выделенный через несколько недель вирусный белок оказался радиоактивным. Поскольку для дальнейшего использования



Распределение меченых ионов между форменными элементами и плазмой крови при 37 °C. (По: Hallin O., Hevesy G. // Asta Physiol. scund. 1942. Vol. 3. P. 193.)

Таблица 4
Опыты по биологическому синтезу вируса табачной мозаики в присутствии радиоактивного фосфора*. (По: Born H. J., Lang A., Schramm G., Zimmer K. G. // Naturwiss. 1941. Bd. 29. S. 222)

Фракция	Содержание фосфора, мг	Активность	
		частиц/мин	на 1 мг фосфора
Остаток после отжима	3,2	6370	1990
Осажденные хлоропласты	0,58	2295	3960
Диализат	1,95	903	463
Растительный белок	0,158	163	1030
Вирусный белок	0,207	211	1015

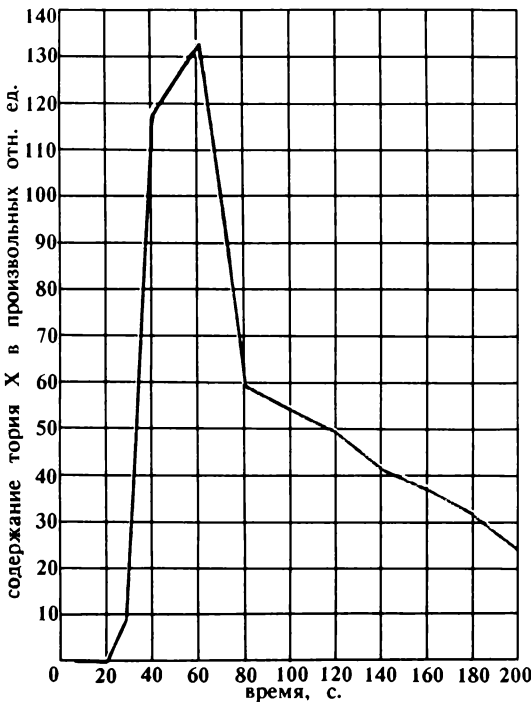
* Растения табака выращивали на питательном растворе, содержащем радиоактивный фосфор, инфицировали вирусом и после его размножения обрабатывали соответствующим образом.

меченых вирусных молекул очень важно прочное соединение радиофосфора в молекулах, необходимо было выяснить, обменивается ли встроенный радиофосфор с немеченым фосфором в растворимых фосфатах. Как видно из табл. 5, обмен не происходит. Путем инъекции радиоактивного изотопа в личинки двукрылых, выделения гигантских ядер слюнных желез и измерения активности можно определить проникновение определенных химических элементов в клеточные ядра, а при благоприятных условиях — исследовать таким образом хромосомы.

В качестве последнего примера хотелось бы привести еще одно возможное применение метода индикаторов. Чтобы определить скорость кровотока, можно также использовать радиоактивный изотоп в очень малом количестве. Так, если в вену одной из

Таблица 5
Распределение радиоактивного фосфора между
диализатом и вирусным белком. [По:
 Schramm G., Lang A., Born H. J. //
 Naturwiss. 1942. Bd. 30.]

№	Фракция	Количество белка, мг	Содержание фосфора, мг	Активность	
				част./ мин	на 1 мг фосфора
1.	Очищенный вирусный белок	58	0,23	115	500
2.	Очищенный вирусный белок, диализированный 3 дня	55	0,22	120	545
3.	Очищенный вирусный белок, диализированный 6 дней	58	0,23	109	474
4.	Диализат к 2	—	150	1	0,01
5.	Диализат к 3	—	150	1	0,01



Содержание тория-X (Ra^{226}) в крови, взятой из левой локтевой вены, после инъекции в правую локтевую вену. [По: Gerlach J., Wolf P. M., Born H. J. // Arch. experim. Pathol. 1942. Bd. 199. S. 83.]

конечностей ввести торий-X, то вскоре его можно обнаружить в небольшой пробе крови, взятой из одноименной вены другой конечности. Первоначальное появление и по-

следующее распределение тория-X в пробах крови позволяют сделать заключение о скорости циркуляции крови. Результаты одного из таких исследований на человеке показаны на рис. 3.

Помимо вышеупомянутых, наиболее значительных областей применения счетных трубок в биологии, объединенных под общим названием метода индикаторов, есть и другие, правда, не столь важные. Можно ожидать, особенно при дальнейшем усовершенствовании вспомогательных средств, что важные таких работ возрастут, поскольку определенные задачи можно решить только с помощью счетных трубок. В этой связи стоит упомянуть важную в здравоохранении проблему защиты от излучений, т. е. создания приборов, быстро регистрирующих самые малые по интенсивности излучения. Сходные проблемы возникают при диагностике заражения радиоактивными веществами. Здесь измерительные счетные трубки просто незаменимы. Дальнейшее развитие исследований, начатых Вернадским⁴, о видоспецифическом содержании и накоплении радиоактивных элементов в организмах также зависит от технического совершенства измерительных методов.

Еще одна, как представляется, важная, но до сих пор полностью не разработанная область применения счетных трубок лежит в сфере таких биологических работ, где необходимо регистрировать самые незначительные по интенсивности излучения в области видимого и ультрафиолетового света. При дальнейшем развитии этого метода здесь следует ожидать решающих результатов в решении вопроса о природе так называемого митогенетического излучения или относительно многочисленных утверждений о стимулирующем действии самых малых доз излучений на биологические объекты.

Все вышеупомянутые работы, как уже подчеркивалось вначале, — лишь примеры различных возможностей применения счетных трубок в биологии. Число и разнообразие таких работ значительно. С увеличением количества нейтронных генераторов и их усовершенствованием будут появляться все новые искусственные радиоактивные изотопы, доступные для биологических исследований. И вместе с тем для дальнейшего применения метода индикаторов — главной области использования счетных трубок в биологии — будут открываться все новые возможности и возникать все новые задачи.

© Перевод с немецкого Е. Н. Сокуровой.

⁴ Вернадский В. И. // Докл. АН СССР, А., 1929. № 2.