

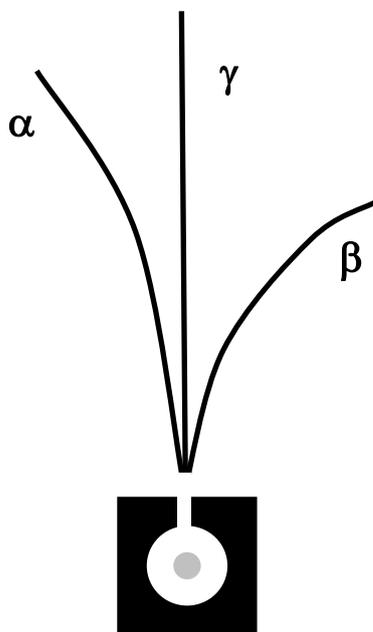


МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. Ломоносова  
ХИМИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА РАДИОХИМИИ

М.И. Афанасов, А.А. Абрамов, С.С. Бердоносков

# *Основы радиохимии и радиоэкологии*

СБОРНИК ЗАДАЧ



МОСКВА 2012

Сборник задач по курсу «Основы радиохимии и радиоэкологии»  
подготовили преподаватели кафедры радиохимии химического  
факультета Московского государственного университета имени  
М.В. Ломоносова

Афанасов Михаил Иванович, Абрамов Александр Афанасьевич,  
Бердоносков Сергей Серафимович

Утверждено учебно-методической комиссией  
химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова  
в качестве учебного пособия

Основы радиохимии и радиоэкологии. Сборник задач. Учебное пособие.  
М.: химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012

© Химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2012 г.

## Оглавление

	стр.
Раздел I. Радиоактивность. Ядерные реакции	5
Раздел II. Ослабление потоков ионизирующих излучений. Регистрация излучения	21
Раздел III. Радиационная безопасность и дозиметрия ионизирующих излучений	36
Раздел IV. Изотопный обмен	48
Раздел V. Межфазное распределение радионуклидов	56
Раздел VI. Применение радионуклидов в химических исследованиях	65
Ответы и решения	83
Литература	108
Приложения	109

Настоящий сборник представляет собой учебное пособие по курсу «Основы радиохимии и радиоэкологии». Необходимый для решения задач теоретический материал изложен в учебниках, написанных преподавателями кафедры радиохимии химического факультета МГУ [1-5].

Первые три раздела сборника соответствуют хронологическому изложению материала курса: радиоактивность, взаимодействие излучения с веществом, регистрация излучений, физические основы дозиметрии, нормативные документы по радиационной безопасности. Затем приводятся задачи по изотопному обмену, методам концентрирования и выделения радионуклидов и использованию радионуклидов в различных областях химии.

Задачи из последних разделов предполагают активное использование материалов курсов неорганической, аналитической и органической химия и служат хорошей основой будущего изучения физической химии.

Сборник составлен таким образом, что ряд задач каждого раздела подробно разбираются с привлечением теоретического материала из курса радиохимии и смежных дисциплин.

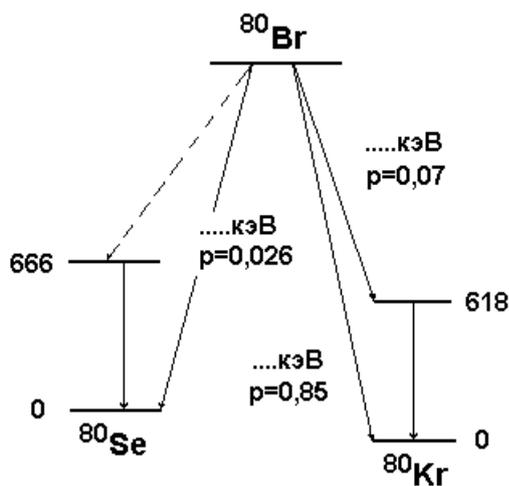
По нашему мнению умение решать расчетные задачи поможет не только глубже усвоить и осмыслить теоретический материал, но и связать его с обработкой и интерпретацией полученных на практике данных.

Авторы

## Раздел I. РАДИАКТИВНОСТЬ. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

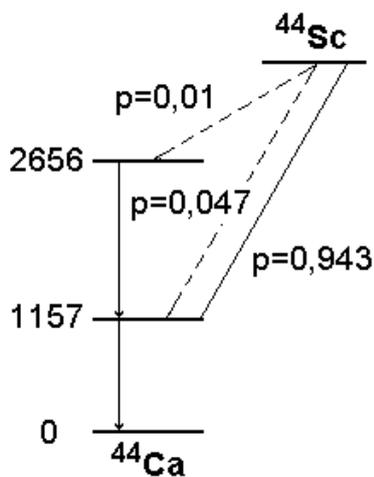
### Энергия радиоактивного распада. Схемы распадов.

1. Вычислите максимальную энергию частиц, испускаемых при распаде свободного нейтрона. Массы покоя нейтрона и протия  ${}^1\text{H}$  равны 1,008664967 и 1,007825036 а.е.м., соответственно. Энергетический эквивалент 1 а.е.м. принять равным 931501 кэВ.
2. Вычислите максимальную энергию спектра  $\beta^-$ -частиц трития. Разность масс покоя атомов  ${}^3\text{H}$  и  ${}^3\text{He}$  равна  $1,9989 \cdot 10^{-5}$  а.е.м.
3. Вычислите максимальную энергию спектра  $\beta^-$ -частиц, испускаемых при распаде  ${}^{137}\text{Cs}$ , если разность масс дочернего и материнского атомов составляет  $1,259257 \cdot 10^{-3}$  а.е.м.
4. Вычислите максимальную энергию спектра  $\beta^-$ -частиц, испускаемых при распаде  ${}^{15}\text{C}$ . Масса покоя атома  ${}^{15}\text{C}$  больше массы  ${}^{15}\text{N}$  на 0,0105207 а.е.м.
5. Вычислите максимальную кинетическую энергию позитронов, испускаемых при распаде  ${}^{23}\text{Mg}$ , если масса покоя материнского атома больше массы дочернего на  $4,35748 \cdot 10^{-3}$  а.е.м.
6. При распаде ядер  ${}^{44}\text{Sc} \rightarrow {}^{44}\text{Ca}$  испускаются позитроны (выход на распад  $p = 94,3\%$ ), моноэнергетические нейтрино ( $p = 5,7\%$ ),  $\gamma$ -кванты 1157 кэВ ( $p \sim 100\%$ ) и 1499 кэВ ( $p \sim 1\%$ ). Вычислите максимальную кинетическую энергию позитронов, если разность масс покоя атомов составляет  $3,92162757 \cdot 10^{-3}$  а.е.м.
7. Ядро  ${}^{222}\text{Rn}$ , испуская  $\alpha$ -частицу, переходит в основное (невозбужденное) состояние  ${}^{218}\text{Po}$ . Определите кинетическую энергию  $\alpha$ -частицы. Массы атомов  ${}^{222}\text{Rn}$ ,  ${}^{218}\text{Po}$  и  ${}^4\text{He}$  равны 222,01757379, 218,00896897 и 4,002603261 а.е.м., соответственно.
8. Определите максимальную кинетическую энергию частиц, испускаемых при распаде  ${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C}$  ( $T_{1/2} = 598$  с). Разность масс материнского и дочернего атомов составляет  $2,38389 \cdot 10^{-3}$  а.е.м.; распад не сопровождается испусканием  $\gamma$ -квантов.
9. Определите максимальную кинетическую энергию позитронов, покидающих ядро  ${}^{11}\text{C}$ . Разность масс материнского и дочернего ядер составляет 0,0015791687 а.е.м., масса покоя позитрона 0,00054858 а.е.м.



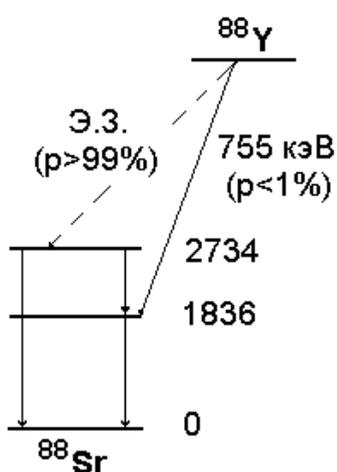
10. Определите максимальные энергии  $\beta^+$ - и  $\beta^-$ -частиц, испускаемых ядрами  $^{80}\text{Br}$ , и энергию моноэнергетических нейтрино, появляющихся при распаде ядер путем электронного захвата. Массы атомов  $^{80}\text{Br}$ ,  $^{80}\text{Se}$  и  $^{80}\text{Kr}$  равны 79,91852827, 79,91652043 и 79,91637475 а.е.м., соответственно.

11. Определите, используя схему распада, энергию моноэнергетических нейтрино, испускаемых после захвата электронов ядрами  $^{44}\text{Sc}$ , и максимальную энергию позитронов. Энергия ядерных уровней на схеме дана в кэВ. Разность масс материнского и дочернего атомов составляет 0,00392162757 а.е.м.



12. Ядерное превращение  $^{224}\text{Ra} \rightarrow ^{220}\text{Rn}$  ( $T_{1/2} = 88$  ч) сопровождается испусканием  $\gamma$ -кванта с энергией 240 кэВ. Энергия частиц: 5686 кэВ (94% на распад) и 5446 кэВ (6%). Постройте схему распада, определите энергию распада.

13. При распаде ядер  $^{30}\text{P}$  испускаются 2 группы позитронов и  $\gamma$ -кванты:  $E_{\beta+,1}$  (выход на распад  $p > 99\%$ ),  $E_{\beta+,2}$  и  $E_{\gamma} = 2230$  кэВ, ( $p < 1\%$ ). Определите максимальную кинетическую энергию позитронов и постройте схему распада  $^{30}\text{P}$ . Разность масс покоя материнского и дочернего атомов составляет 0,004538052 а.е.м.



14. Определите энергию  $\beta^+$ -распада, максимальную энергию позитронов и постройте приближенную (без учета конверсии  $\gamma$ -переходов) схему распада  $^{88}\text{Y}$ . Тип распада: электронный захват ( $p > 99\%$ ) и  $\beta^+$ -распад ( $p < 1\%$ ). Энергия  $\gamma$ -квантов (кэВ): 2734 ( $p < 1\%$ ), 1836 и 898. Массы атомов  $^{88}\text{Y}$  и  $^{88}\text{Sr}$  равны 87,90950305 и 87,90562436 а.е.м., соответственно; масса покоя электрона - 0,00054858 а.е.м.

15. Постройте схему распада ядер  $^{40}\text{K}$ . Тип распада: электронный захват (вероятность  $p_{\text{э.з.}} = 0,11$ ) или  $\beta^-$ -распад ( $p_{\beta} = 0,89$ ). Максимальная энергия  $\beta^-$ -частиц 1,3 МэВ, энергия  $\gamma$ -квантов 1,46 МэВ ( $p_{\gamma} = 0,11$ ).

16. Полная энергия ядерного превращения  $^{101}\text{Mo} \rightarrow ^{101}\text{Tc}$  равна 2,39 МэВ; максимальная энергия испускаемых частиц – 1,20 МэВ (выход на распад  $p = 0,7$ ) и 2,20 МэВ ( $p = 0,3$ ); энергия  $\gamma$ -квантов – 1,0 МэВ ( $p = 0,7$ ) и 0,19 МэВ ( $p = 1,0$ ). Постройте схему распада  $^{101}\text{Mo}$ .

17. При распаде  $^{56}\text{Mn}$  испускаются  $\beta^-$ -частицы с максимальной энергией: 2848 ( $p = 0,56$ ), 1037 ( $p = 0,29$ ) и 736 кэВ ( $p = 0,15$ ) и  $\gamma$ -кванты с энергией: 847 ( $p = 1,0$ ), 1811 ( $p = 0,29$ ) и 2112 кэВ ( $p = 0,15$ ). Масса атома  $^{56}\text{Fe}$  больше массы  $^{56}\text{Mn}$  на 0,003966716085 а.е.м. Постройте схему распада  $^{56}\text{Mn}$ .

18. Ядерное превращение  $^{219}\text{Rn} \rightarrow ^{215}\text{Po}$  сопровождается испусканием  $\alpha$ -частиц (энергия  $E_{\alpha} = 6,82, 6,56$  и  $6,43$  МэВ), а также  $\gamma$ -квантов ( $E_{\gamma} = 0,39, 0,32, 0,19, 0,13$  и  $0,07$  МэВ). Постройте схему распада  $^{219}\text{Rn}$ . Энергия  $\alpha$ -распада равна 6,95 МэВ

19. По приведенным в таблице П.1 данным постройте схему распада  $^{60}\text{Co}$ . Разность масс материнского и дочернего атомов составляет 0,00303123668 а.е.м. Энергетический эквивалент 1 а.е.м. принять равным 931501 кэВ.

20. По приведенным в таблице П.1 данным постройте схему распада  $^{24}\text{Na}$ . Полная энергия распада 5512 кэВ.

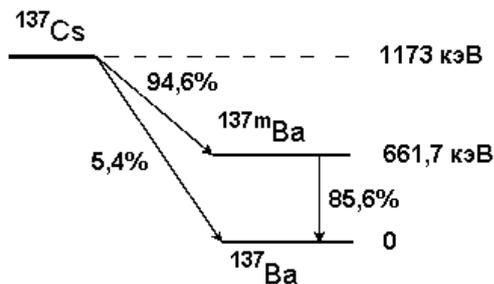
21. Постройте схему распада  $^{95}\text{Zr}$ , претерпевающего  $\beta^-$ -распад. Полная энергия распада 1123 кэВ. Максимальная энергия (кэВ)  $\beta^-$ -частиц: 399 (44% на распад), 366 (55%) и 890 (1%). Энергия  $\gamma$ -фотонов (кэВ): 724 (44%), 757 (55%) и 233 (1%).

22. По приведенным в табл. П.1 данным постройте схему распада  $^{22}\text{Na}$ . Определите полную энергию распада.

23. Вероятность позитронного распада радионуклида равна 90,6%, распада путем электронного захвата - 9,4%. Энергия испускаемых частиц и квантов:  $E_{\beta+,1} = 0,546$  МэВ ( $p=90\%$ ),  $E_{\beta+,2} = 1,82$  МэВ ( $p = 0,6\%$ ),  $E_{\gamma} = 1,274$  МэВ ( $p = 100\%$ ). Постройте схему распада и определите радионуклид.

24. При распаде радионуклида испускаются  $\beta^-$ -частицы с энергией 0,309 МэВ ( $p = 1$ ) и  $\gamma$ -кванты  $E_{\gamma 1} = 1,173$  ( $p = 1$ ) и  $E_{\gamma 2} = 1,333$  МэВ ( $p = 1$ ). Рассчитайте полную энергию распада, постройте схему распада и определите радионуклид.

25\*(дополнительная). Схема распада  $^{137}\text{Cs}$ , представленная на рисунке, дает

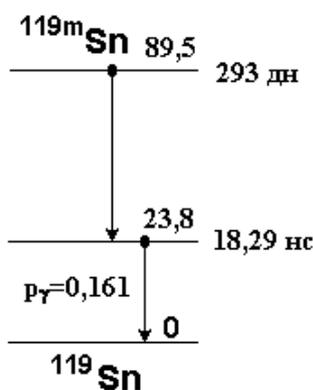


только общие представления о частицах и фотонах, появляющихся при ядерном превращении. В рассматриваемом случае изомерный переход из метастабильного ( $^{137m}\text{Ba}$ ) в основное состояние частично конвертирован: в ряде случаев энергия возбуждения ядра ( $E_{ex} = 661,7$  кэВ) передается электрону внутренней

оболочки, который покидает атом. Процесс перестройки электронных оболочек, вызванный появлением вакансии, сопровождается испусканием характеристического рентгеновского излучением и/или электронов Оже. Какие ионизирующие частицы и/или фотоны, кроме указанных в схеме, сопровождают ядерное превращение  $^{137}\text{Cs}$ ? Коэффициент конверсии  $\alpha=0,105$ ; энергия связи  $K$ -электрона  $E_K = 37442$  эВ,  $E_{L-I-III} = 5991, 5626$  и  $5249$  эВ (усредненная энергия связи  $L$ -электронов  $\sim 5620$  эВ),  $E_M \approx 1000$  эВ.

26. Постройте схему распада  $^{58}\text{Co}$ . Тип распада: электронный захват (вероятность  $p_{\text{э.з.}} = 0,85$ ) или  $\beta^+$ -распад ( $p_{\beta} = 0,15$ ). Максимальная энергия позитронов 475 кэВ ( $p_{\beta} = 0,15$ ), энергия  $\gamma$ -квантов 811 кэВ ( $p_{\gamma} = 0,99$ ). Распад сопровождается испусканием двух аннигиляционных фотонов (511 кэВ,  $p = 0,3$ ). Для изомерного перехода  $^{58m}\text{Fe} \rightarrow ^{58}\text{Fe}$  коэффициент конверсии 0,01. Определите энергию позитронного распада и энергию распада после захвата  $K$ -электрона

27. Тип распада  $^{52}\text{Mn}$ : электронный захват ( $p_{\text{э.з.}} = 0,66$ ) или  $\beta^+$ -распад ( $p_{\beta} = 0,34$ ). Максимальная энергия  $\beta^+$ -частиц равна 575 кэВ, энергия  $\gamma$ -квантов (кэВ): 1434 ( $p_{\gamma_1} = 1,0$ ), 935 ( $p_{\gamma_2} = 0,84$ ), 744 ( $p_{\gamma_3} = 0,82$ ). Постройте схему распада, определите энергию  $\beta^+$ -распада и коэффициент конверсии перехода  $E_{\gamma_2} = 935$  кэВ.

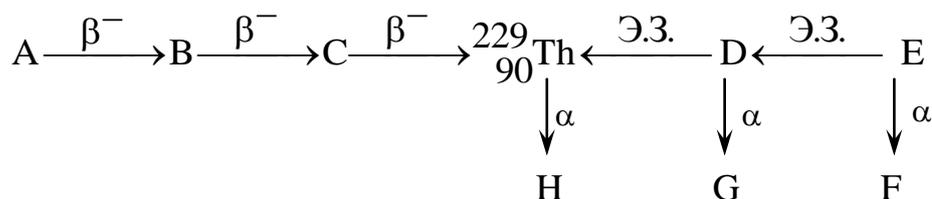


28\*(дополнительная). На рисунке изображена схема распада ядер  $^{119m}\text{Sn}$ . Изомерный переход метастабильного уровня с энергией 89,5 кэВ в первое возбужденное состояние  $^{119}\text{Sn}$  ( $E = 23,8$  кэВ,  $T_{1/2} = 18,29 \cdot 10^{-9}$  с) практически полностью конвертирован ( $\alpha = 366$ ). Переход  $E_{\gamma} = 23,8$  кэВ конвертирован частично ( $\alpha = 5,2$ ). Определите вероятность испускания  $\gamma$ -квантов, энергию характеристического рентгеновского излучения и электронов конверсии. Энергия связи  $K$ -электрона

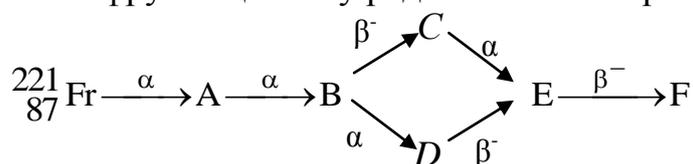
атома олова равна 29204 эВ, усредненная энергия связи  $L$ -электронов - примерно 4090 эВ.

29. Постройте приближенную (без учета конверсии  $\gamma$ -переходов) схему распада  $^{74}\text{As}$ ; оцените энергии  $\beta^+$ -распада и  $\beta^-$ -распада. Тип распада: Э.З. (39%),  $\beta^+$  (29%),  $\beta^-$  (32%). Энергия  $\beta^+$ -частиц (кэВ): 950 ( $p = 26\%$ ), 1540 ( $p = 3\%$ ). Энергия  $\beta^-$ -частиц (кэВ): 1353 ( $p = 16\%$ ), 718 ( $p = 16\%$ ). Энергия  $\gamma$ -квантов 590 и 635 кэВ.

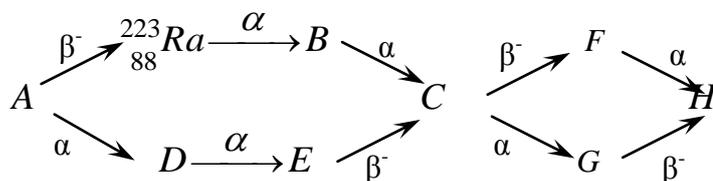
30. Расшифруйте цепочку радиоактивных превращений.



31. Расшифруйте цепочку радиоактивных превращений.



32. Расшифруйте цепочку радиоактивных превращений.



### Распад и накопление радионуклидов. Равновесия.

33. Определите время распада 90% ядер  $^{222}\text{Rn}$  ( $T_{1/2} = 3,82$  сут.).

34. Средняя продолжительность жизни свободного нейтрона 1065 с. Определите период полураспада нейтронов.

35. В природной смеси изотопов рубидия содержится 27,85% долгоживущего  $^{87}\text{Rb}$ . Определить период его полураспада, если установлено, что скорость счета навески  $\text{RbCl}$  массой 120 мг равна 447 имп/мин (коэффициент регистрации  $\phi = 0,1$ ).

36. Определить удельную активность (Бк/г)  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  (в природной смеси изотопов содержится 15,07%  $^{147}\text{Sm}$ ,  $T_{1/2} = 1,3 \cdot 10^{11}$  лет).

37. Определите абсолютную активность 1 кг хлорида калия (доля  $^{40}\text{K}$  в природной смеси изотопов равна 0,000118).
38. Определите радиоактивность 1 см<sup>3</sup> (при н.у.) трития.
39. Определите массу рубидия в образце, регистрируемая активность которого 430 имп/мин. Массовая доля  $^{87}\text{Rb}$  в природной смеси изотопов  $\omega = 27,8\%$ , период полураспада  $T_{1/2} = 4,8 \cdot 10^{10}$  лет, коэффициент регистрации используемой установки  $\phi = 0,1$ .
40. Абсолютная удельная активность  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  равна 7,8 Бк/кг. Определите содержание  $^{144}\text{Nd}$  ( $T_{1/2} = 2,4 \cdot 10^{15}$  лет) в природной смеси изотопов.
41. Рассчитайте мольную долю  $^{14}\text{C}$  в образце  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  с удельной активностью 11,2 МБк/мг.
42. Рассчитайте молярную концентрацию  $\text{K}_3^{32}\text{PO}_4$  в растворе с объемной активностью 5 МБк/мл.
43. Определите массу самария в образце, регистрируемая активность которого 314 имп/мин. Массовая доля  $^{147}\text{Sm}$  в природной смеси изотопов  $\omega = 15\%$ , период полураспада  $T_{1/2} = 1,06 \cdot 10^{11}$  лет, коэффициент регистрации используемой установки  $\phi = 0,1$ .
44. Определите активность 2 г  $\text{Lu}_2\text{O}_3$ . Период полураспада  $^{176}\text{Lu}$  равен  $3,6 \cdot 10^{10}$  лет, его массовая доля в природной смеси изотопов 2,59 %.
45. Определите активность 1 г сульфата калия. Массовая доля  $^{40}\text{K}$  в природной смеси изотопов 0,0118 %.
46. Определите объемную активность 1 моль/л раствора гидроксида калия.
47. Рассчитайте объемную активность (Бк/мл) 10 моль/л раствора КОН.
48. Рассчитайте молярную концентрацию раствора  $\text{K}^{131}\text{I}$  с объемной активностью 10 МБк/мл.
49. Измерение скорости счета радионуклида  $^{144}\text{Pr}$  начали спустя 7 мин после выделения из мишени и проводили в течение 10 мин. За это время было зарегистрировано 18342 имп. Определите скорость счета (имп/мин)  $^{144}\text{Pr}$  в момент выделения.
50. Скорость счета препарата, содержащего радионуклид \*X, начали измерять спустя 5 минут после его приготовления. За 10 минут было зарегистрировано 60000 имп. Определите скорость счета (имп/мин)

препарата в момент приготовления, если известно, что период полураспада  $X^*$  равен 30 мин.

51. Препарат радиоактивной серы содержит 50 МБк  $^{35}\text{S}$  и примесь  $^{32}\text{P}$  (4 МБк). Какое минимальное время следует хранить препарат, чтобы активность примеси не превышала 1% общей активности препарата.

52. В препарате радиоактивной серы через 30 дней после приготовления активность основного компонента ( $^{35}\text{S}$ ) в 49 раз превышала активность примеси ( $^{32}\text{P}$ ). Рассчитайте отношение активностей  $^{35}\text{S}$  и  $^{32}\text{P}$  в момент приготовления препарата.

53. Для выделения дочернего радионуклида  $^{68}\text{Ga}$  ( $T_{1/2} = 68$  мин) из колонки изотопного генератора использовали 10 мл элюента. Объемная активность раствора, измеренная через 17 мин после извлечения  $^{68}\text{Ga}$ , оказалась равной 5 МБк/мл. Рассчитайте активность материнского нуклида  $^{68}\text{Ge}$  ( $T_{1/2} = 280$  сут.), предполагая, что было выделено 60% равновесного количества  $^{68}\text{Ga}$ .

54. Для выделения дочернего радионуклида  $^{113\text{m}}\text{In}$  ( $T_{1/2} = 99$  мин) через колонку изотопного генератора пропустили 10 мл 0,05 моль/л раствора  $\text{HCl}$ . Объемная активность элюата, измеренная спустя 33 мин после выделения, оказалась равной 20 МБк/мл. Рассчитайте активность материнского  $^{113}\text{Sn}$  ( $T_{1/2} = 115$  суток), предполагая, что было выделено 72% равновесного количества  $^{113\text{m}}\text{In}$ .

55. Хроматографическую колонку заполнили сорбентом, на котором было адсорбировано 100 МБк материнского радионуклида  $^{140}\text{Ba}$ . Спустя 360 ч, для выделения дочернего  $^{140}\text{La}$ , через колонку пропустили 20 мл элюента. Определите активность (кБк/мл) элюата через 24 ч после извлечения  $^{140}\text{La}$ , предполагая, что он не содержит радиоактивных примесей, а используемая методика позволяет выделить 80% накопившегося лантана.

56. Полоний-218 ( $T_{1/2} = 3,7$  мин) распадается с образованием свинца-214 ( $T_{1/2} = 26,8$  мин). Через какое время активность  $^{218}\text{Po}$ , предварительно очищенного от продуктов распада, станет равной активности  $^{214}\text{Pb}$ ?

57. Определите время накопления максимального количества  $^{112}\text{Ag}$  ( $T_{1/2} = 3,4$  ч), образующегося при распаде  $^{112}\text{Pd}$  ( $T_{1/2} = 21$  ч).

58. Определите активность дочернего  $^{225}\text{Ac}$  ( $T_{1/2} = 10$  сут.), накапливающегося при  $\beta^-$ -распаде  $^{225}\text{Ra}$  ( $T_{1/2} = 14,8$  сут.), через 10 суток после выделения материнского нуклида, активность которого в начальный момент составляла 25 кБк.

59. Какова абсолютная активность  $^{220}\text{Rn}$ , находящегося в вековом равновесии с 1 г  $^{232}\text{Th}$  ( $T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{10}$  лет)?

60. Сколько атомов гелия образуется в течение 1 года из 1 г  $^{232}\text{Th}$ , находящегося в равновесии с продуктами распада?

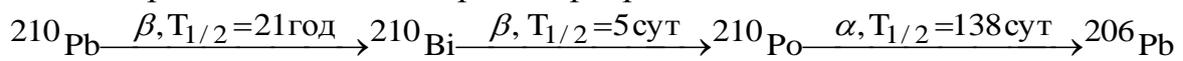
61. Сколько  $\alpha$ -частиц в секунду испускает 1,138 г  $^{232}\text{ThO}_2$ , если  $^{232}\text{Th}$  находится в равновесии с продуктами распада?

62. Определите количество вещества атомов  $^{213}\text{Bi}$ , находящегося в равновесии с 1015 мг  $^{229}\text{Th}$ .

63. В герметичный сосуд объемом 22,4 см<sup>3</sup> помещен 0,1 г  $^{226}\text{Ra}$  ( $T_{1/2} = 1620$  лет). Определите давление  $^{222}\text{Rn}$  ( $T_{1/2} = 3,82$  сут) при 0°C через 2 месяца.

64. В цепочке радиоактивных превращений  $*X \rightarrow *Y \rightarrow Z_{\text{стаб.}}$  возможно установление векового равновесия. В начальный момент материнский радионуклид  $*Y$  очищен от дочернего. Какая доля от равновесного количества ядер  $*Y$  накопится за время, равное трем периодам его полураспада?

65. Ниже приведена схема ядерных превращений  $^{210}\text{Pb}$ .



Активность  $^{210}\text{Po}$ , находящегося в равновесии с  $^{210}\text{Pb}$ , равна 120 Бк. Чему равна активность  $^{210}\text{Bi}$  и через какое время она уменьшится в 5 раз?

66. Имеется цепочка превращений  $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th} \rightarrow ^{234}\text{Pa} \rightarrow \dots$ . Периоды полураспада  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{Th}$  и  $^{234}\text{Pa}$  равны, соответственно,  $4,5 \cdot 10^9$  лет, 578 ч и 1,18 мин. При  $t = 0$  число ядер  $^{238}\text{U}$   $N_{\text{U},0} = 10^{19}$ , а число ядер  $^{234}\text{Th}$   $N_{\text{Th},0} = 0$ . Чему будет равно число ядер тория-234 через: а) 578 ч, б)  $4,5 \cdot 10^9$  лет?

67. Имеется цепочка радиоактивных превращений  $*X \rightarrow *Y \rightarrow Z_{\text{стаб.}}$ . При  $t = 0$  число ядер материнского нуклида  $N_{*X,0} = 6 \cdot 10^{18}$ , а число ядер дочернего  $N_{*Y,0} = 0$ . Чему будет равно число ядер  $N_{*X}$  и  $N_{*Y}$  при  $t = 2 T_{1/2(*Y)}$ , если известно, что  $T_{1/2(*Y)} \gg T_{1/2(*X)}$ .

68. Имеется цепочка радиоактивных превращений  $*X \rightarrow *Y \rightarrow Z_{\text{стаб.}}$ . При  $t = 0$  число ядер материнского нуклида  $N_{*X,0} = 6 \cdot 10^{18}$ , а число ядер дочернего  $N_{*Y,0} = 0$ . Определить число ядер  $N_{*X}$  и  $N_{*Y}$  при  $t = 2 T_{1/2(*Y)}$ , если известно, что  $T_{1/2(*Y)} = 30 T_{1/2(*X)}$ .

69. Имеется цепочка радиоактивных превращений  $*A \rightarrow *B \rightarrow D_{\text{стаб.}}$ . При  $t = 0$  число ядер  $N_{*A,0} = N_{*B,0} = 4 \cdot 10^{19}$ . Чему будет равно число ядер  $N_{*A}$  и  $N_{*B}$  при  $t = 2 T_{1/2(*A)}$ , если известно, что  $T_{1/2(*A)} \ll T_{1/2(*B)}$ .

70. Имеется цепочка превращений  $^{95}\text{Zr} \rightarrow ^{95}\text{Nb} \rightarrow ^{95}\text{Mo}_{\text{стаб.}}$ . В начальный момент активность  $^{95}\text{Zr}$  равнялась 10 МБк. Определите активность  $^{95}\text{Nb}$ : 1) через 64 сут., 2) через год, 3) максимальную активность.

71. Ниже приведена схема ядерных превращений  $^{210}\text{Bi}$ .



Определите активность  $^{210}\text{Po}$  в предварительно очищенном препарате  $^{210}\text{Bi}$  через 50 суток после выделения 1 МБк материнского нуклида.

72. Определите массу образца тория-232 активностью 1 ГБк.  $^{232}\text{Th}$  находится в равновесии со всеми продуктами его распада.

73. Определите массу препарата оксида стронция-90 активностью 1 Ки.  $^{90}\text{Sr}$  находится в равновесии с  $^{90}\text{Y}$ .

74. Во сколько раз масса  $^{137}\text{CsNO}_3$  больше массы  $\text{Na}^{131}\text{I}$ , если активности обоих препаратов равны 1 ГБк.

75. Препарат молибдена-99 очищен от продуктов распада. Через какое время активность препарата достигнет своего максимального значения? (периоды полураспада:  $^{99}\text{Mo}$  – 2,8 сут.,  $^{99m}\text{Tc}$  – 6,6 ч,  $^{99}\text{Tc}$  –  $2,1 \cdot 10^5$  лет)

76. В запаянной ампуле в начальный момент находилось 2,1 мкг  $^{210}\text{Po}$ . Определите количество вещества атомов гелия, накопившегося в ампуле за 276 дней.

77. В начальный момент активности препаратов  $^{90}\text{YCl}_3$  и  $\text{Na}^{131}\text{I}$  равны 128 МБк и 2 МБк, соответственно. Через какое время активности препаратов станут одинаковыми?

78. Имеется цепочка превращений:  $A \rightarrow B \rightarrow C_{\text{стаб.}}$ ;  $T_{1/2}(A) = 6000$  лет,  $T_{1/2}(B) = 20$  сут. Материнский нуклид был предварительно очищен от дочернего. Определите отношение: а) активностей материнского и дочернего радионуклидов через 110 дней, б) активности дочернего нуклида к равновесной через 70 дней.

79. Активность препарата  $^{90}\text{Sr}$ , предварительно очищенного от дочернего радионуклида, в начальный момент составляла  $A_0$ . Через какое время активность дочернего радионуклида станет равна  $0,75 \cdot A_0$ , а затем уменьшится до  $0,5 \cdot A_0$ ?

80. Имеется цепочка превращений  $^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{210}\text{Bi} \rightarrow ^{210}\text{Po} \rightarrow ^{206}\text{Pb}_{\text{стаб.}}$ . В начальный момент активность очищенного препарата  $^{210}\text{Pb}$  ( $T_{1/2} \approx 23$  года) составляла 1 МБк. Оцените активность препарата через: а) 5 дней, б) 276 дней, в) 23 года.

81. Имеется цепочка радиоактивных превращений  $A \rightarrow B \rightarrow C_{\text{стаб.}}$ .  
 $T_{1/2(A)} \ll T_{1/2(B)}$ . При  $t = 0$  число ядер  $N_A = N_{A(0)}$  и  $N_B = 2N_{A(0)}$ . Оцените значения  $N_A$  и  $N_B$  в момент  $t = T_{1/2(B)}$ .

82. Имеется цепочка радиоактивных превращений:  $A \rightarrow B \rightarrow C_{\text{стаб.}}$ .  
 $T_{1/2(A)} \gg T_{1/2(B)}$ . При  $t = 0$  число ядер  $N_A = N_{A(0)}$  и  $N_B = 3N_{A(0)}$ . Оцените значения  $N_A$  и  $N_B$  в момент  $t = 2T_{1/2(B)}$ .

83. Очищенный от продуктов распада препарат  $^{90}\text{Sr}$  имеет активность 1МБк. Какую активность будет иметь препарат через: а) 320 ч, б) 128 ч, в) 28,7 лет?

84. В ряду  $^{232}\text{Th}$  находится  $^{212}\text{Pb}$ , который был предварительно отделен от всех материнских и дочерних нуклидов и имел активность 1кБк. Оцените (с погрешностью до 10%) активность образца через: а) 10,6 ч, б) 31,8 ч?

85. Препарат  $^{106}\text{Ru}$  активностью 1МБк не содержал в начальный момент дочернего радионуклида  $^{106}\text{Rh}$ . Определите соотношение числа атомов материнского и дочернего нуклидов через 1 мин после приготовления препарата.

86. Активность препарата органического вещества, меченного по  $^{32}\text{P}$  и  $^{35}\text{S}$ , в начальный момент составляла 1 МБк; при этом активности радионуклидов были равны друг другу. Определите активность препарата и соотношение активностей  $^{32}\text{P}$  и  $^{35}\text{S}$  через: а) 14,4 суток, б) 87 суток.

### Энергетические эффекты ядерных реакций. Накопление радионуклидов.

87. Какую минимальную кинетическую энергию должен иметь нейтрон для возбуждения реакции  $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$ ? Массы ядер  $^{32}\text{S}$ ,  $^{32}\text{P}$ , нейтрона и позитрона принять равными 31,9632957, 31,9656783, 1,00866497 и 1,007276457 а.е.м., соответственно. Энергетический эквивалент 1 а.е.м. равен 931501 кэВ.

88. При помощи  $\alpha$ -частиц  $^{214}\text{Po}$  ( $E_\alpha = 7,7$  МэВ) Резерфорд осуществил первое искусственное превращение ядер:  $^{14}\text{N}(\alpha,p)^{17}\text{O}$ . Оцените пороговую кинетическую энергию  $\alpha$ -частиц (без учета высоты кулоновского барьера), если изменение масс ядер и частиц составляет  $\Delta m = -0,00129$  а.е.м.

89. Определите энергетический порог реакции  $^{120}\text{Sn}(n,2n)^{119}\text{Sn}$ , если известно, что разность масс нуклидов олова составляет 0,9988888 а.е.м., масса нейтрона 1,00866497 а.е.м.

90. Определите энергетический порог реакции  $^{88}\text{Sr}(n,2n)^{87}\text{Sr}$ ; массы атомов  $^{88}\text{Sr}$  и  $^{87}\text{Sr}$  равны 87,905610 и 86,908890 а.е.м., соответственно.

91. Рассчитайте энергетический порог реакции  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$  если известно, что разность масс ядер и частиц составляет 0,0033700447 а.е.м.
92. Энергетический эффект реакции  $^{139}\text{La}(n,2n)^{138}\text{La}$  равен  $-8,778$  МэВ. Рассчитайте разность масс нуклидов лантана (масса покоя нейтрона 1,00866497 а.е.м.).
93. Определите кинетическую энергию нейтронов, появляющихся при реакции  $^9\text{Be}(\gamma,n)^8\text{Be}$ , возбуждаемой  $\gamma$ -квантами  $^{24}\text{Na}$ . Массы атомов  $^9\text{Be}$ ,  $^8\text{Be}$  и нейтрона равны 9,0121825, 8,0053052 и 1,00866497 а.е.м., соответственно.
94. Энергетический эффект реакции  $^{41}\text{K}(n,\gamma)^{42}\text{K}$ , вызываемой поглощением тепловых нейтронов, равен 7,535 МэВ. Вычислите энергию отдачи, передаваемую составному ядру.
95. При поглощении тепловых нейтронов протекает реакция  $^{44}\text{Ca}(n,\gamma)^{45}\text{Ca}$ . Энергия испускаемых компаунд-ядром фотонов, с учетом потерь на отдачу, равна 7414 кэВ. Определите энергетический эффект реакции.
96. Энергетический эффект инициированной тепловыми нейтронами реакции  $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$  равен 615 кэВ. Определите кинетическую энергию протонов и ядер  $^{35}\text{S}$ .
97. Определите энергетический порог реакции  $^{31}\text{P}(\gamma,n)^{30}\text{P}$ . Массы  $^{31}\text{P}$ ,  $^{30}\text{P}$  и  $^1_0\text{n}$  равны, соответственно: 30,97376331, 29,97830974 и 1,008664972 а.е.м.
98. Энергетический порог реакции  $^{197}\text{Au}(\gamma,n)^{196}\text{Au}$  равен 8,06 МэВ, энергия фотона 14 МэВ. Определите кинетическую энергию испущенного нейтрона.
99. Определите энергетический порог реакции  $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$ . Массы участвующих в реакции атомов и частиц равны: 55,9349393, 55,93890635, 1,008664972 и 1,007825005 а.е.м.
100. Энергетический порог реакции  $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$  равен 2965 кэВ. Определите суммарную кинетическую энергию продуктов реакции при облучении железной пластинки нейтронами с энергией 14 МэВ.
101. Установлено, что при облучении натрия фотонами с энергией 20 МэВ возбужденные ядра  $^{23}\text{Na}$  испускают нейтроны с энергией 7,6 МэВ. Оцените энергетический эффект этой фотонейтронной реакции.
- 102.\* Энергетический порог реакции  $^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$  равен 2965 кэВ. Определите максимальную кинетическую энергию протонов, испускаемых при облучении железной пластинки нейтронами с энергией 14 МэВ.

103.\* Энергетический эффект ядерного превращения  $^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$  равен  $-4,732$  МэВ. Определите энергетический порог реакции. Рассчитайте максимальную энергию протонов, испускаемых при облучении магния потоком быстрых нейтронов  $14,5$  МэВ.

104. Ядерная реакция  $^{31}\text{P}(n,\gamma)^{32}\text{P}$  инициируется тепловыми нейтронами ( $E_{\text{кин},n} \approx 0,025$  эВ). Оцените энергию  $\gamma$ -квантов, испускаемых компаунд-ядром. Разность масс атомов фосфора равна  $1,00014472$  а.е.м.

105. Для определения содержания примесных  $3d$ -металлов в образце хрома было проведено нейтронное облучение (плотность потока  $10^7$  см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ ) пластинки массой  $208$  мг в течение  $12$  ч. Регистрируемая активность образца, измеренная через  $5$  мин,  $1$  ч и  $36$  ч после окончания облучения, составила  $4566$ ,  $3498$  и  $1236$  имп/мин, соответственно. Примесь каких элементов и в каком количестве была обнаружена, если мольная доля примеси не должна превышать, ориентировочно,  $0,2\%$ , и установка позволяет надежно регистрировать активность более  $1$  Бк? Содержание в природной смеси активируемых изотопов ( $\omega$ ), сечения поглощения тепловых нейтронов ( $\sigma$ ) и периоды полураспада продуктов ( $n,\gamma$ )-реакций приведены в таблице.

ядро	$\omega$ , %	$\sigma \cdot 10^{-24}$ , см $^2$	ядро	$T_{1/2}$
$^{50}\text{Cr}$	4,35	15,9	$^{51}\text{Cr}$	27,7 сут.
$^{64}\text{Ni}$	0,91	1,52	$^{65}\text{Ni}$	2,52 ч
$^{59}\text{Co}$	100	37,2	$^{60}\text{Co}$	5,27 лет
$^{58}\text{Fe}$	0,28	1,28	$^{59}\text{Fe}$	44,5 сут.
$^{54}\text{Fe}$	5,8	2,25	$^{55}\text{Fe}$	2,7 лет
$^{55}\text{Mn}$	100	13,3	$^{56}\text{Mn}$	2,58 ч
$^{51}\text{V}$	99,8	4,9	$^{52}\text{V}$	255 с
$^{50}\text{Ti}$	5,2	0,18	$^{51}\text{Ti}$	345 с

106. Сплав состава  $\text{Cr}_{95-x}\text{Ni}_5\text{M}_x$  может содержать, предположительно, до  $0,5\%$  примеси некоторых элементов ( $M = \text{Fe}, \text{V}, \text{Co}, \text{Ti}$ ). Для определения содержания примеси образец сплава массой  $105$  мг облучался нейтронами (плотность потока  $10^8$  см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ ) в течение  $12$  ч. Активность образца, измеренная через  $5$  мин,  $1$  ч и  $36$  ч после окончания облучения, составила  $2094$ ,  $1034$  и  $937$  Бк, соответственно. Примесь какого элемента и в каком количестве была обнаружена?

Содержание активируемых изотопов ( $\omega$ ), сечения поглощения тепловых нейтронов ( $\sigma$ ) и периоды полураспада продуктов ( $n,\gamma$ )-реакций см. в условиях задачи 105. Используемая установка позволяла надежно регистрировать активность не менее  $3$  Бк.

107. Сплав состава  $\text{Cr}_{85-x}\text{Co}_{15}\text{M}_x$  может содержать, предположительно, до  $0,5\%$  примеси нескольких элементов ( $M = \text{Fe}, \text{V}, \text{Mn}, \text{Ti}$ ). Для определения содержания примеси образец сплава массой  $106$  мг облучался нейтронами

(плотность потока  $10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) в течение 12 ч. Скорость счета образца, измеренная через 5 мин, 1 ч и 36 ч после окончания облучения, составила 12111, 8289 и 2904 имп/мин, соответственно. Активность 118 мг чистого кобальта (содержание примесей менее 0,001%) после облучения в тех же условиях составила 2421 имп/мин. Используемая установка ( $\phi=0,05$ ) позволяла надежно регистрировать скорость более 10 имп/мин. Чему равна мольная доля обнаруженных примесных элементов?

Необходимые для расчета характеристики стабильных и радиоактивных нуклидов приведены в условиях задачи 105.

108. Для определения содержания примеси некоторых  $3d$ -металлов (Fe, V, Cr, Ti, Co) в никеле было проведено нейтронное облучение (плотность потока  $10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) образца массой 58,7 мг в течение 1 ч. Активность образца, измеренная через 5 мин и 2 ч и после окончания облучения, составила 2913 и 1182 Бк, соответственно. Примесь какого элемента и в каком количестве была обнаружена, если мольная доля примеси предположительно не превышает 0,1%? Необходимые для расчета характеристики стабильных и радиоактивных нуклидов приведены в условиях задачи 105.

109. Рассчитайте массу мышьяка в образце, облученной до насыщения в потоке  $2 \cdot 10^{12}$  нейтрон/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ). Мышьяк мононуклидный элемент, активность  $^{76}\text{As}$  в образце после облучения равна 5 Бк.

110. При поглощении тепловых нейтронов в медной мишени образуются  $^{64}\text{Cu}$  (сечение  $(n,\gamma)$ -реакции 4,5 барн,  $T_{1/2}=12,7$  ч) и  $^{66}\text{Cu}$  (сечение реакции 2,17 барн,  $T_{1/2}=5,1$  мин). Рассчитайте активность мишени массой 640 мг, измеренной через 10 мин после окончания облучения, которое проводилось в течение суток в потоке  $10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . В природной смеси изотопов меди содержится 69%  $^{63}\text{Cu}$  и 31%  $^{65}\text{Cu}$ .

111. В природной смеси изотопов лютеция содержится 97,4% стабильного  $^{175}\text{Lu}$  и 2,6%  $^{176}\text{Lu}$  ( $T_{1/2}=3,6 \cdot 10^{10}$  лет). Сечения поглощения тепловых нейтронов ядрами  $^{175}\text{Lu}$  и  $^{176}\text{Lu}$  равны 23,4 и 2100 барн, соответственно. Рассчитать активность тонкой пластинки лютеция массой 1 г, выдержанной в нейтронном потоке с плотностью  $10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в течение 10 суток, на момент окончания облучения. Период полураспада  $^{177}\text{Lu}$  равен 6,71 сут.

112. Два образца, содержащие разное количество анализируемого элемента X, облучались в идентичных условиях. Первый из них облучался в течение периода полураспада образующегося радионуклида X\*, второй - в 2,5 раза дольше. Отношение регистрируемых активностей X\* в этих образцах, измеренных в одинаковых условиях, оказалось равным 5. Во сколько раз количество вещества элемента X в первом образце больше, чем во втором?

113. Рассчитайте минимально необходимое время облучения навески  $\text{As}_2\text{O}_3$  массой 0,1 г потоком нейтронов (плотность  $10^{12} \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ) для получения препарата  $^{76}\text{As}_2\text{O}_3$  с удельной активностью 400 МБк/г. Единственный стабильный нуклид -  $^{75}\text{As}$ , эффективное сечение  $(n,\gamma)$ -реакции равно  $4,3\cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ , период полураспада  $^{76}\text{As}$  - 26,3 ч.

114. Рассчитайте минимально необходимое время облучения навески  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  массой 138 мг потоком нейтронов (плотность  $10^{11} \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ) для получения образца с удельной активностью 400 МБк/г. Скандий – мононуклидный элемент, сечение поглощения тепловых нейтронов  $^{45}\text{Sc}$  равно  $27,2\cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ , период полураспада  $^{46}\text{Sc}$  - 83,8 сут.

115. Рассчитайте минимально необходимое время облучения образца  $^{118}\text{Sn}$  массой 100 мг в нейтронном потоке с плотностью  $10^{14} \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  для получения образца с удельной активностью 37 ГБк/г. Сечение реакции  $^{118}\text{Sn}(n,\gamma)^{119\text{m}}\text{Sn}$  равно 0,22 барн, период полураспада  $^{119\text{m}}\text{Sn}$  - 290 сут.

116. Для получения  $^{32}\text{P}$  ( $T_{1/2} = 14,5$  сут.) заполненную сероуглеродом круглодонную тонкостенную колбочку (диаметр 2 см), расположенную в 15 см от точечного источника быстрых нейтронов с выходом  $10^{10} \text{ с}^{-1}$ , облучали в течение 16 суток. Рассчитайте удельную активность (Бк/мл) полученного препарата, считая, что условия облучения соответствуют случаю тонкой мишени. Содержание  $^{32}\text{S}$  в природной смеси изотопов - 95%; сечение соответствующей  $(n,p)$  реакции - 0,154 барн; плотность сероуглерода –  $1,27 \text{ г/см}^3$ . Поглощением нейтронов стенками колбы пренебречь.

117. Образец серы массой 320 мг с площадью поперечного сечения  $3 \text{ см}^2$  находился в 10 см от точечного источника быстрых нейтронов (энергия  $\sim 3$  МэВ, поток  $10^8 \text{ с}^{-1}$ ) в течение 14,5 суток. Оцените активность образца на момент окончания облучения, полагая, что в данных условиях в тонкой мишени может быть активирована только одна реакция -  $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$ . Природная сера содержит 95%  $^{32}\text{S}$ , при  $E_n \approx 3$  МэВ сечение реакции равно  $\sim 0,15\cdot 10^{-28} \text{ м}^2$ ,  $T_{1/2}(^{32}\text{P}) = 14,5$  сут.

118. В природной смеси изотопов сурьмы содержится 43%  $^{123}\text{Sb}$  и 57%  $^{121}\text{Sb}$ . При облучении навески массой 1 г нейтронным потоком (плотность  $10^{12} \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ) в течение суток в мишени образуется  $^{124}\text{Sb}$  ( $T_{1/2} = 60$  сут) и короткоживущий  $^{122}\text{Sb}$ . Удельная активность мишени, измеренная сразу после окончания облучения, составила 2886 кБк/мг. Определить период полураспада  $^{122}\text{Sb}$ , считая, что условия облучения соответствуют случаю тонкой мишени, сечение обеих  $(n,\gamma)$ -реакций примерно одинаковы и равны  $4,4\cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ .

119. При облучении мишени образуется радионуклид  $Z$  с периодом полураспада 3 ч и короткоживущий примесный  $X$  ( $T_{1/2} = 15$  мин). Мишень облучали в течение 9 ч. Ее активность спустя 15 мин после окончания облучения составила 280 кБк, а спустя 3 ч – 90 кБк. Определите а) отношение активности радионуклида  $Z$  в момент второго измерения к максимально возможной при данных условиях облучения, б) отношение активностей нуклидов  $Z$  и  $X$  в момент окончания облучения.

120. Для определения содержания примеси марганца в алюминии фольгу массой 100 мг облучали медленными нейтронами (плотность потока  $10^{13}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>) в течение 10 ч. Активность  $^{56}\text{Mn}$  ( $T_{1/2} = 2,58$  ч) на момент окончания облучения составила 8200 Бк. Определите отношение количеств атомов  $\text{Al}$  и  $\text{Mn}$  в фольге. Природный марганец на 100% состоит из  $^{55}\text{Mn}$ , эффективное сечение ( $n,\gamma$ )-реакции равно 13,3 барн.

121. Для определения содержания серебра в старинной монете ее облучали тепловыми нейтронами в течение 10 мин. Было установлено, что возбужденная активность принадлежит радионуклиду  $^{108}\text{Ag}$  ( $T_{1/2} = 2,3$  мин). Измерение начали через 3 мин после окончания облучения, продолжительность измерения составила 5 мин; за это время было зарегистрировано 4560 импульсов (за вычетом фона). В тех же условиях был облучен образцовый препарат с содержанием серебра 12,4 %. Измерение было начато через 3 мин после окончания облучения и продолжалось 4 мин; за вычетом фона было зарегистрировано 2370 имп. Определите содержание серебра в монете.

122. Облучение пластинки  $^{193}\text{Ir}$  (толщина 0,1 мм, площадь 50 мм<sup>2</sup>,  $\rho_{\text{Ir}} = 22,4$  г/см<sup>3</sup>) медленными нейтронами (плотность потока  $10^{10}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>) проводилось в течение 1 ч. Определите сечение реакции  $^{193}\text{Ir} (n,\gamma)^{194}\text{Ir}$ , если активность мишени, измеренная сразу после облучения, составила 13,66 МБк, а спустя 8 ч – 10,266 МБк.

123. Рассчитайте массу меди в образце, облученного до насыщения в потоке  $2 \cdot 10^{13}$  нейтрон/(см<sup>2</sup>·с). Активность образца после облучения составила 16,9 Бк. Массовая доля активируемого изотопа ( $^{63}\text{Cu}$ ) в природной смеси 69%.

124. При поглощении быстрых нейтронов ядрами  $^{24}\text{Mg}$  могут активироваться реакции ( $n,2n$ )-, ( $n,p$ )- и ( $n,\alpha$ )-типа, энергетические эффекты которых равны -16,5, -4,73 и -2,5 МэВ, соответственно. Для оценки сечения одной из этих реакций пластинку магния-24 площадью 2,5 см<sup>2</sup> и толщиной 0,1 мм выдержали в потоке нейтронов с энергией 14 МэВ и плотностью  $10^9$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup> в течение 1 ч. Активность пластинки, измеренная сразу после окончания облучения, составила 12230 Бк. Какие ядерные реакции протекают в данных условиях? Оцените сечение одной из них. Неон-21 –

стабильный нуклид; периоды полураспада радионуклидов: 11,3 с ( $^{23}\text{Mg}$ ) и 15 ч ( $^{24}\text{Na}$ ); плотность магния  $1,74 \text{ г/см}^3$ .

125. При облучении серы быстрыми нейтронами могут протекать реакции  $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$ ,  $^{32}\text{S}(n,\alpha)^{29}\text{Si}$ ,  $^{32}\text{S}(n,2n)^{31}\text{S}$  и  $^{34}\text{S}(n,\alpha)^{31}\text{Si}$ , энергетические эффекты (МэВ) которых равны  $-0,928$ ,  $1,526$ ,  $-15,08$  и  $-0,192$ , соответственно. Для оценки сечения одной из этих реакций образец серы массой 320 мг с площадью поперечного сечения  $1 \text{ см}^2$  выдержали в течение 10 суток в потоке нейтронов с энергией 14 МэВ и плотностью  $10^9 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ . Активность мишени, измеренная через 48 ч после окончания облучения, составила 45860 Бк. Какие ядерные реакции протекают в данных условиях? Оцените сечение одной из них, учитывая тот факт, что сечения реакций на быстрых нейтронах для подавляющего большинства нуклидов меньше  $10^{-28} \text{ м}^2$ .  
Периоды полураспада радионуклидов: 14,3 сут. ( $^{32}\text{P}$ ), 2,6 с ( $^{31}\text{S}$ ) и 157 мин ( $^{31}\text{Si}$ ). В природной смеси изотопов содержится 95%  $^{32}\text{S}$  и 4,2%  $^{34}\text{S}$ .

126. При облучении ниобия быстрыми нейтронами могут протекать реакции  $^{93}\text{Nb}(n,p)^{93}\text{Zr}$ ,  $^{93}\text{Nb}(n,\alpha)^{90}\text{Y}$ ,  $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$ , энергетические эффекты которых равны, соответственно,  $0,719$ ,  $4,915$  и  $-8,83$  МэВ. Пластинку ниобия площадью  $3 \text{ см}^2$  и толщиной 0,5 мм выдержали в потоке нейтронов с энергией 8 МэВ и плотностью  $10^9 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  в течение 36 ч. Активность мишени, измеренная через 10 мин после окончания облучения, составила 24136 Бк. Какие ядерные реакции протекают в данных условиях? Оцените сечение одной из них, учитывая тот факт, что сечения реакций на быстрых нейтронах для подавляющего большинства ядер меньше  $10^{-28} \text{ м}^2$ .  
Ниобий – мононуклидный элемент, его плотность  $8,57 \text{ г/см}^3$ . Периоды полураспада радионуклидов:  $1,5\cdot 10^6$  лет ( $^{93}\text{Zr}$ ), 64 ч ( $^{90}\text{Y}$ ), 10 сут. ( $^{92m}\text{Nb}$ ).

127. Облучение фосфора быстрыми нейтронами может вызывать ядерные превращения  $^{31}\text{P}$  ( $n,p$ )-, ( $n,\alpha$ )- и ( $n,2n$ )-типа, энергетические эффекты которых равны:  $-0,709$ ,  $-1,944$  и  $-12,3$  МэВ, соответственно. Сечение реакций на быстрых нейтронах для элементов середины Периодической таблицы, как правило, заметно меньше  $10^{-28} \text{ м}^2$ . Для оценки сечения одной из таких реакций образец красного фосфора массой 0,31 г и площадью поперечного сечения  $1,8 \text{ см}^2$  выдержали в потоке нейтронов с энергией 12 МэВ и плотностью  $10^9 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$  в течение 48 ч. Активность мишени, измеренная через 1 ч после окончания облучения, составила 369650 Бк. Оцените сечение одной из реакций.  
Периоды полураспада радионуклидов: 2,62 ч ( $^{31}\text{Si}$ ), 2,24 мин ( $^{28}\text{Al}$ ) и 2,5 мин ( $^{30}\text{P}$ ). В природной смеси изотопов 100%  $^{31}\text{P}$ .

## Раздел II. ОСЛАБЛЕНИЕ ПОТОКОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ. РЕГИСТРАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ.

1. Параллельные потоки моноэнергетических электронов,  $\beta^-$ -частиц и  $\alpha$ -частиц проходят через алюминиевые экраны, толщина которых равна 0,25 максимального пробега  $\beta^-$ -частиц. Энергия электронов,  $\alpha$ -частиц и максимальная энергия  $\beta^-$ -спектра равны 0,7 МэВ. Какая доля электронов,  $\beta^-$ - и  $\alpha$ -частиц задерживается экранами?
2. Параллельные потоки моноэнергетических электронов,  $\beta^-$ -частиц и  $\alpha$ -частиц проходят через алюминиевые экраны толщиной 1 мм. Энергия частиц каждого типа равна 1,0 МэВ, плотность их потоков  $1000 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Оцените плотности потоков частиц за экраном.
3. Какая доля  $\beta^-$ - и  $\gamma$ -излучения  $^{40}\text{K}$  пройдет через пластинку алюминия (плотность  $2,7 \text{ г/см}^3$ ), толщина которой равна 6 слоям половинного ослабления  $\beta^-$ -излучения этого радионуклида.
4. Определите максимальный пробег (в см)  $\beta^-$ -частиц  $^{32}\text{P}$  в воздухе при н.у.
5. Рассчитайте минимальную толщину экрана из органического стекла ( $\rho = 1,07 \text{ г/см}^3$ ), полностью задерживающего поток  $\beta^-$ -частиц  $^{89}\text{Sr}$ .
6. Какая доля  $\beta^-$ -частиц  $^{36}\text{Cl}$  ( $E_{\beta, \text{max.}} = 0,71 \text{ МэВ}$ ) поглотится медной фольгой толщиной 0,15 мм ( $\rho_{\text{Cu}} = 8,96 \text{ г/см}^3$ )?
7. Определите ослабление потоков  $\beta^-$ -частиц и  $\gamma$ -квантов, испускаемых  $^{40}\text{K}$ , пластинками алюминия толщиной 270 и 810  $\text{мг/см}^2$  ( $\rho_{\text{Al}} = 2,7 \text{ г/см}^3$ ).
8. Параллельные потоки моноэнергетических электронов,  $\beta^-$ -частиц и  $\alpha$ -частиц проходят через экраны, толщина которых равна 0,6 пробега каждого типа излучения. Какая доля электронов,  $\beta^-$ - и  $\alpha$ -частиц задерживается экранами?
9. Массовые коэффициенты ослабления  $\beta^-$ -излучения ( $E_{\beta, \text{max.}} = 1,9 \text{ МэВ}$ ) и  $\gamma$ -излучения ( $E_{\gamma} = 0,1 \text{ МэВ}$ ) примерно одинаковы и равны  $5,3 \text{ см}^2/\text{г}$ . Какая доля частиц и фотонов пройдет через поглотитель толщиной  $445 \text{ мг/см}^2$ ?
10. Препарат, содержащий равновесную смесь  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Y}$ , покрыли слоем алюминия, достаточным для полного поглощения излучения  $^{90}\text{Sr}$ . Какая доля  $\beta^-$ -частиц  $^{90}\text{Y}$  будет задержана этим слоем?

11. Массовые коэффициенты ослабления  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения одинаковы и равны  $4 \text{ см}^2/\text{г}$ . Какая доля частиц и квантов пройдет через слой поглотителя толщиной  $347 \text{ мг}/\text{см}^2$ ?
12. Максимальный пробег  $\beta$ -излучения в магнии равен  $720 \text{ мг}/\text{см}^2$ . При какой толщине поглотителя параллельный поток частиц будет ослаблен в 4 раза?
13. Энергия  $\gamma$ -излучения и максимальная энергия  $\beta$ -частиц одинаковы и равны  $300 \text{ кэВ}$ . Какая доля  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения задержится алюминиевым экраном, толщина которого равна 3 слоям половинного ослабления  $\beta$ -излучения.
14. Максимальный пробег  $\beta$ -излучения равен  $0,5 \text{ г}/\text{см}^2$ . При какой толщине поглотителя параллельный поток частиц будет ослаблен в 50 раз?
15. Максимальный пробег  $\beta$ -частиц с энергией  $50 \text{ кэВ}$  (линейный коэффициент ослабления  $900 \text{ см}^{-1}$ ) и пробег  $\alpha$ -частиц с энергией  $5 \text{ МэВ}$  приблизительно одинаковы и равны  $50 \text{ мкм}$ . Какая доля частиц указанных энергий пройдет через слой воды толщиной  $0,1 \text{ мкм}$ ?
16. Какая часть узкого потока  $\gamma$ -квантов  $^{141}\text{Ce}$  не пройдет через свинцовый экран толщиной  $1,05 \text{ г}/\text{см}^2$ ? Плотность свинца  $11,3 \text{ г}/\text{см}^3$ .
17. Массовые коэффициенты ослабления фотонного и  $\beta$ -излучения одинаковы и равны  $10 \text{ см}^2/\text{г}$ . Какая доля частиц и квантов пройдет через экран из алюминия, толщина которого равна максимальному пробегу  $\beta$ -частиц?
18. Установлено, что слой полуослабления  $\beta$ -излучения радионуклида \*X равен  $93,6 \text{ мг}/\text{см}^2$ . Оцените массовый коэффициент  $\mu$  ( $\text{см}^2/\text{г}$ ) и максимальный пробег частиц.
19. Массовые коэффициенты ослабления рентгеновского и  $\beta$ -излучения одинаковы и равны  $10 \text{ см}^2/\text{г}$ . Какая доля частиц и квантов пройдет через слой поглотителя толщиной  $400 \text{ мг}/\text{см}^2$ .
20. Альфа-частица с начальной энергией  $10 \text{ МэВ}$  создает на начальном участке пробега в воздухе  $\sim 2,2$  пары ионов на  $1 \text{ мкм}$  пробега. Оцените плотность потока частиц и плотность потока энергии в воздухе на расстоянии  $6 \text{ см}$  от точечного источника активностью  $9,05 \text{ МБк}$ , если на образование пары ионов расходуется в среднем  $34 \text{ эВ}$ .

21. Слой полуослабления  $\gamma$ -излучения  $^{137}\text{Cs}$  в NaI равен  $\sim 2,5$  см. Какая доля потока квантов будет задерживаться монокристаллом NaI размером  $40 \times 40 \times 40$  мм?
22. Сцинтилляционный кристалл NaI(Tl) представляет собой цилиндр, высота и диаметр основания которого равны по 30 мм. Такой кристалл задерживает примерно половину потока  $\gamma$ -квантов  $^{88}\text{Y}$  ( $E_\gamma = 898$  кэВ). Оцените массовый коэффициент ослабления  $\gamma$ -квантов  $^{88}\text{Y}$  в материале сцинтиллятора. Плотность кристалла  $3,67$  г/см<sup>3</sup>.
23. Сцинтилляционный кристалл NaI(Tl) толщиной 25 мм ослабляет поток  $\gamma$ -квантов  $^{137}\text{Cs}$  ( $E_\gamma = 662$  кэВ) примерно в 2 раза. Оцените массовый коэффициент ослабления  $\gamma$ -квантов в материале сцинтиллятора. Плотность кристалла  $3,67$  г/см<sup>3</sup>.
24. Толщина кристалла NaI(Tl) сцинтилляционного детектора равна 2 см. Оцените эффективность детектора к  $\gamma$ -излучению  $^{95}\text{Nb}$ , если линейный коэффициент ослабления  $\gamma$ -излучения этого радионуклида в веществе кристалла равен  $0,253$  см<sup>-1</sup>.
25. Определите коэффициент самоослабления излучения  $^{35}\text{S}$  в препарате толщиной  $8$  мг/см<sup>2</sup>.
26. Определите коэффициент самоослабления излучения  $^{32}\text{P}$  в слое воды толщиной 1 мм.
27. Определите коэффициент самоослабления излучения  $^{204}\text{Tl}$  в препарате толщиной  $70$  мг/см<sup>2</sup>.
28. Энергия  $\gamma$ -излучения и максимальная энергия  $\beta$ -частиц одинаковы и равны 662 кэВ. Какая доля  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения задержится алюминиевым экраном, толщина которого равна 2 слоям половинного ослабления  $\gamma$ -излучения?
29. Оцените коэффициент ослабления излучения  $^{14}\text{C}$  алюминиевой фольгой толщиной  $15$  мг/см<sup>2</sup>.
30. Оцените коэффициент ослабления излучения  $^{14}\text{C}$  слоем воздуха 8 см.
31. Определите коэффициент поглощения излучения  $^{204}\text{Tl}$ , если измеряемый препарат находится в 2 см от счетчика с толщиной алюминиевых стенок 0,2 мм. Плотность алюминия  $2,7$  г/см<sup>3</sup>.

32. Определите долю поглощенного излучения препарата  $^{90}\text{Sr}$ , находящегося в равновесии с дочерним радионуклидом, в стенках стального цилиндрического счетчика толщиной 0,1 мм. Плотность стали  $\sim 7,9 \text{ г/см}^3$ .
33. Определите коэффициент регистрации излучения препарата  $^{210}\text{Bi}$ , помещенного на подложке из органического стекла в свинцовый домик, экранированный плексигласом. Толщина препарата  $30 \text{ мг/см}^2$ . Препарат находится на расстоянии 2 см от детектора, толщина окна которого равна  $0,003 \text{ г/см}^2$ . Геометрический коэффициент  $\eta = 0,3$ , эффективность  $\varepsilon = 1$ .
34. Препарат  $^{204}\text{Tl}$  имеет толщину  $10 \text{ мг/см}^2$ , окно детектора -  $6 \text{ мг/см}^2$ . Препарат находится на расстоянии 3 см от окна. Оцените геометрический коэффициент, если коэффициент регистрации равен 0,0625. Поправочные коэффициенты  $\varepsilon$  и  $q$  считать равными 1.
35. Для измерения активности  $^{185}\text{W}$  в вольфрамовой фольге использовали торцовый счетчик Гейгера-Мюллера (толщина окна  $5 \text{ мг/см}^2$ ). Площадь образца фольги  $2 \text{ см}^2$ , толщина 0,1 мм. Регистрируемая скорость счета образца составила 2085 имп/мин, скорость счета фона 35 имп/мин. Определить удельную активность  $^{185}\text{W}$ . Плотность вольфрама  $19,1 \text{ г/см}^3$ . Геометрический коэффициент  $\eta = 0,5$ , эффективность счетчика  $\varepsilon = 1$ , коэффициент обратного рассеяния  $q = 1$ .
36. Измеренная скорость счета препарата, содержащего радионуклид  $^{32}\text{P}$ , составила 800 имп/с. Вычислить коэффициент регистрации и определить активность радионуклида, если: 1) разрешающее время счетчика  $\tau = 3 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ , 2) скорость счета фона 0,6 имп/с, 3) толщина препарата  $80 \text{ мг/см}^2$ , 4) толщина окна счетчика  $60 \text{ мг/см}^2$ , 5) геометрический коэффициент 0,1. Остальные поправочные коэффициенты принять равными 1. Ослаблением излучения в воздухе пренебречь.
37. Препарат  $^{32}\text{P}$  толщиной  $100 \text{ мг/см}^2$ , нанесенный на подложку из оргстекла, поднесли вплотную к окну торцового детектора. Толщина окна детектора  $10 \text{ мг/см}^2$ , его площадь больше площади препарата. Скорость счета препарата за вычетом фона составила 9200 имп/мин. Определите активность  $^{32}\text{P}$ .
38. Точечный источник  $^{90}\text{Sr}$  (в равновесии с  $^{90}\text{Y}$ ) находится на расстоянии 10 см от окна торцового детектора, имеющего диаметр 2 см и толщину  $5 \text{ мг/см}^2$ . Скорость счета источника (без фона) оказалась равной 600 имп/мин. Оцените активность  $^{90}\text{Sr}$  в источнике. Коэффициент обратного рассеяния считать равным 1, самоослаблением излучения пренебречь. Плотность воздуха  $1,29 \text{ мг/см}^3$ .

39. Точечный источник  $^{32}\text{P}$  находится на расстоянии 30 см от окна детектора площадью  $10\text{ см}^2$  и толщиной  $10\text{ мг/см}^2$ . Скорость счета источника (без фона) оказалась равной 435 имп/мин. Оцените активность  $^{32}\text{P}$ . Коэффициент обратного рассеяния считать равным 1, самоослаблением излучения в источнике пренебречь. Плотность воздуха  $1,29\text{ мг/см}^3$ .

40. Измеренная скорость счета препарата, содержащего равновесную смесь  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Y}$ , составила 100 имп/с. Вычислить коэффициент регистрации и определить активность радионуклида  $^{90}\text{Y}$ , если: 1) разрешающее время счетчика  $\tau = 3 \cdot 10^{-4}\text{ с}$ , 2) скорость счета фона 30 имп/мин, 3) расстояние до окна счетчика 2 см, 4) толщина окна счетчика  $6\text{ мг/см}^2$ , 5) геометрический коэффициент 0,08. Остальные поправочные коэффициенты принять равными 1.

41. Измеренная скорость счета препарата, содержащего  $^{204}\text{Tl}$ , составила 80 имп/с. Вычислить коэффициент регистрации и определить активность радионуклида, если: 1) разрешающее время счетчика  $\tau = 3 \cdot 10^{-4}\text{ с}$ , 2) скорость счета фона 30 имп/мин, 3) расстояние до окна счетчика 2 см, 4) толщина окна счетчика  $4\text{ мг/см}^2$ , 5) толщина препарата  $40\text{ мг/см}^2$ , 6) геометрический коэффициент 0,06. Остальные поправочные коэффициенты принять равными 1.

42. Измеренная скорость счета препарата площадью  $1\text{ см}^2$ , содержащего  $^{204}\text{Tl}$ , составила 450 имп/мин. Определить удельную активность препарата, если: 1) разрешающее время счетчика  $\tau = 10^{-4}\text{ с}$ , 2) скорость счета фона 30 имп/мин, 3) расстояние до окна счетчика 4 см, 4) толщина окна счетчика  $5\text{ мг/см}^2$ , 5) толщина препарата  $320\text{ мг/см}^2$ , 6) геометрический коэффициент 0,06, 7) поправка на схему распада 0,98, 8) коэффициент обратного рассеяния 1,1. Эффективность принять равной 1.

43. Препараты, меченные тритием и углеродом-14, помещены в домик, экранированный легким органическим материалом, на расстоянии 2 см от детектора. Определите коэффициенты регистрации, если геометрический коэффициент равен 0,4, а толщина стенок детектора -  $3\text{ мг/см}^2$ . Поправочные коэффициенты эффективности и самоослабления считать равными 1.

44. Два препарата фосфата стронция, один из которых имеет метку  $^{90}\text{Sr}$  и был приготовлен за 30 дней до регистрации, а второй, меченный  $^{32}\text{P}$ , - непосредственно перед регистрацией, имеют одинаковую активность, геометрию и толщину ( $0,01\text{ г/см}^2$ ). Толщина стенок счетчика  $6\text{ мг/см}^2$ , расстояние до детектора 2 см, коэффициент обратного рассеяния  $q = 1$ . Эффективность детектора к регистрации  $\beta$ -излучения принять равной 1, поправкой на разрешающее время пренебречь. Определите отношение регистрируемых активностей препаратов.

45. Регистрируемую активность тонкого препарата  $^{35}\text{S}$ , содержащего примесь  $^{36}\text{Cl}$ , измерили дважды. При первом измерении она составила 2700 имп/мин, а через 30 дней – 2275 имп/мин. Измерения проводили на установке с торцовым детектором с толщиной окна  $3 \text{ мг/см}^2$ ; разрешающее время установки  $\tau = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ . Препарат находился на расстоянии 23 мм от детектора. Оцените отношение абсолютных активностей  $A(^{35}\text{S})/A(^{36}\text{Cl})$  в момент первого измерения. Принять, что эффективность детектора  $\epsilon$  и коэффициент обратного рассеяния  $q$  для излучения  $^{35}\text{S}$  равны соответствующим поправочным коэффициентам для  $^{36}\text{Cl}$ .

46. Регистрируемая активность тонкого препарата  $^{90}\text{Sr}$ , очищенного от дочернего радионуклида, определялась с помощью торцового детектора с толщиной окна  $3 \text{ мг/см}^2$ . Препарат находился в 2 см от окна детектора. Оцените скорости счета препарата через 64 и 128 ч, если в начальный момент она составляла (за вычетом фона) 3600 имп/мин. Поправкой на разрешающее время детектора пренебречь.

47. Установлено, что в препарате  $^{35}\text{S}$ , содержащим примесь  $^{36}\text{Cl}$ , отношение абсолютных активностей  $A(^{35}\text{S})/A(^{36}\text{Cl}) = 9$ . Регистрируемая активность препарата, измеренная с помощью торцового детектора, составляла 5500 имп/мин. Разрешающее время счетчика  $\tau = 10^{-4} \text{ с}$ . Толщина окна детектора  $3 \text{ мг/см}^2$ , препарат находился в 1 см от окна. Оцените регистрируемую активность примесного радионуклида. Принять, что эффективность детектора  $\epsilon$  и коэффициент обратного рассеяния  $q$  для излучения  $^{35}\text{S}$  равны соответствующим поправочным коэффициентам для  $^{36}\text{Cl}$ .

48. Гамма-спектр препарата, содержащего  $^{51}\text{Cr}$ , набирался в течение 1 мин. Общая площадь пика полного поглощения энергии  $E_\gamma = 320 \text{ кэВ}$  составила 2500 имп. Установлено, что пьедестал пика ППЭ, обусловленный регистрацией фонового излучения и комптоновских электронов, равен 600 имп. Оцените время набора спектра, необходимое для определения площади пика ППЭ с относительной погрешностью не более 2% (при уровне значимости 0,05).

49. Предварительное измерение показало, что регистрируемая активность препарата  $^{131}\text{I}$  с фоном  $I_c = 840 \text{ имп/мин}$ . Рассчитайте минимальное время отдельного измерения, необходимое для определения  $I_c$  с относительной погрешностью 3% (при уровне значимости 0,05), если скорость счета фона составляет 220 имп/мин. Разрешающее время детектора  $\sim 10^{-7} \text{ с}$ .

50. В амплитудном спектре препарата  $^{57}\text{Co}$ , полученного с помощью сцинтилляционного детектора с тонким кристаллом  $\text{NaI(Tl)}$ , интенсивность  $S_1$  пика полного поглощения энергии квантов  $E_\gamma = 14,4 \text{ кэВ}$  оказалась равной интенсивности  $S_2$  пика ППЭ рентгеновских квантов  $E_x = 6,4 \text{ кэВ}$ . Экранируя

детектор алюминиевой фольгой, можно изменить соотношение интенсивностей в пользу линии 14,4 кэВ. Определите примерную толщину фольги, позволяющей получить соотношение  $S_1/S_2 = 3$ . Массовые коэффициенты ослабления фотонного излучения в алюминии:  $\mu_1 = 8,6 \text{ см}^2/\text{г}$  и  $\mu_2 = 98 \text{ см}^2/\text{г}$ .

51. Для определения методом «фиксированного телесного угла» активности синтезированного препарата  $^{32}\text{P}$  использовали эталонный тонкий источник  $^{204}\text{Tl}$ , активность которого на момент измерения составляла  $820 \pm 60$  Бк. Толщина стенки счетчика, используемого для измерения скорости счета источников,  $50 \text{ мг}/\text{см}^2$ , расстояние до источников 4 см. Результаты измерения скорости счета эталонного источника: 632, 618, 646 имп/мин; скорости счета препарата: 1066, 1084, 1060 имп/мин. Скорость счета фона  $34 \pm 2$  имп/мин. Рассчитайте активность препарата  $^{32}\text{P}$ . Коэффициенты обратного рассеяния принять равными 1,1; самоослаблением излучения в материале источников пренебречь.

52. По приведенным в задаче 47 данным определите относительную погрешность величины  $A(^{32}\text{P})$ , соответствующей 95% доверительной вероятности. Считать, что относительные погрешности определения коэффициентов ослабления  $k$  равны 10%.

53. Вычислите процентное содержание урана в пробе, если при измерении  $\beta$ -насыщенных слоев образцового и анализируемого веществ были зарегистрированы скорости счета (без фона) 980 и 1250 имп/мин, соответственно. Содержание урана в образцовом веществе составляет 8%.

54. С использованием торцового счетчика Гейгера-Мюллера проведены измерения радиоактивности двух оксидных препаратов близкой плотности, содержащих  $^{185}\text{W}$ . Площади поверхности обоих препаратов одинаковы. Толщина первого препарата 8 мм, а второго – 12 мм. Скорости счета (без фона) препаратов оказались равны 850 и 1700 имп/мин. Каковы отношения удельных и общих активностей этих препаратов?

55. Проведены измерения активности двух препаратов карбоната кальция, меченных  $^{14}\text{C}$ . Препараты помещали в идентичные по размерам кюветы. В обоих случаях расстояние поверхности препарата от детектора излучений было одно и то же. Толщина первого препарата  $200 \text{ мг}/\text{см}^2$ , второго  $480 \text{ мг}/\text{см}^2$ . Скорости счета препаратов оказались равны, соответственно, 2000 имп/мин и 900 имп/мин. Каковы отношения удельных и общих активностей этих препаратов?

56. Определение калия по  $\beta$ -излучению  $^{40}\text{K}$  в порошковых пробах хлоридов проводили методом относительных измерений. Скорости счета (без фона)

трех образцовых препаратов, содержащих 1,0, 1,5 и 2,0 % калия, оказались равны, соответственно, 240, 340 и 436 имп/мин. Измеренные в тех же условиях скорости счета трех препаратов, которые были приготовлены из анализируемой пробы, за вычетом фона составили 333, 362 и 345 имп/мин. Толщина всех измеренных препаратов была больше слоя насыщения для  $\beta$ -излучения  $^{40}\text{K}$ . Каково содержание калия в анализируемой пробе? Укажите погрешность определения процентного содержания калия.

57. Для определения содержания тория в руде использовали относительные измерения по  $\gamma$ -излучению. Скорость счета препарата, приготовленного из 12,5 г образцового вещества с содержанием тория 0,8%, оказалась равна 1200 имп/мин, а скорость счета препарата, приготовленного из 7,8 г анализируемого вещества, составила 4850 имп/мин. Фон 70 имп/мин. Каково процентное содержание тория в анализируемой пробе?

58. Для количественного определения тория в растворе использован метод относительных измерений по короткоживущему продукту распада  $^{232}\text{Th}$  – радионуклиду  $^{220}\text{Rn}$ . С этой целью через барботеры, в одном из которых находился образцовый раствор, содержащий 0,027 г тория (раствор 1), а в другом – анализируемый раствор тория (раствор 2), продували воздух. Воздух далее пропускали через фильтр, улавливающий продукты распада  $^{220}\text{Rn}$  (соответственно фильтры 1 и 2). Регистрируемая активность фильтра 1 оказалась равна 676 имп/мин, фильтра 2 - 1245 имп/мин (приведены результаты измерения скорости счета за вычетом фона). Каково содержание тория в анализируемом растворе?

59. При измерениях в идентичных условиях двух препаратов равной площади толщиной  $700 \text{ мг/см}^2$ , содержащих калий, получены следующие результаты:  $150 \pm 25$  имп/мин и  $270 \pm 27$  имп/мин. Содержание калия в первом препарате 5 масс. %. Каково содержание калия во втором препарате?

60. Найдите массу калия в препарате по естественной радиоактивности, если скорость счета (за вычетом фона) составляет 45 имп/мин, а коэффициент регистрации 0,3.

61. Максимумы пиков полного поглощения энергии  $\gamma$ -квантов идентифицируемого радионуклида соответствуют 341 и 849 номерам каналов гамма-спектрометра. Определите радионуклид, используя результаты предварительной градуировки спектрометра и табл. П.1.

Радионуклид	$^{203}\text{Hg}$	$^{113}\text{Sn}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{24}\text{Na}$
Энергия фотонов, используемая для калибровки; кэВ	279	392	662	1368
Номера каналов	186	261	441	912

62. Максимумы пиков полного поглощения энергии  $\gamma$ -квантов идентифицируемых радионуклидов соответствуют 213 и 511 номерам каналов гамма-спектрометра. Определите радионуклиды, используя результаты предварительной градуировки спектрометра и табл. П.1.

Радионуклид	$^{203}\text{Hg}$	$^{113}\text{Sn}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{60}\text{Co}$
Энергия фотонов, используемая для калибровки; кэВ	279	392	662	1173; 1333
Номера каналов	186	261	441	782; 887

63. Максимумы пиков полного поглощения энергии  $\gamma$ -квантов идентифицируемого радионуклида соответствуют 341 и 541 номерам каналов гамма-спектрометра. Определите радионуклид, используя результаты предварительной градуировки спектрометра и табл. П.1.

Радионуклид	$^{203}\text{Hg}$	$^{113}\text{Sn}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{60}\text{Co}$
Энергия фотонов, используемая для калибровки; кэВ	279	392	662	1173; 1333
Номера каналов	186	261	441	782; 887

64. Максимумы пиков полного поглощения энергии  $\gamma$ -квантов идентифицируемых радионуклидов соответствуют 213 и 599 номерам каналов гамма-спектрометра. Определите радионуклиды, используя результаты предварительной градуировки спектрометра и табл. П.1.

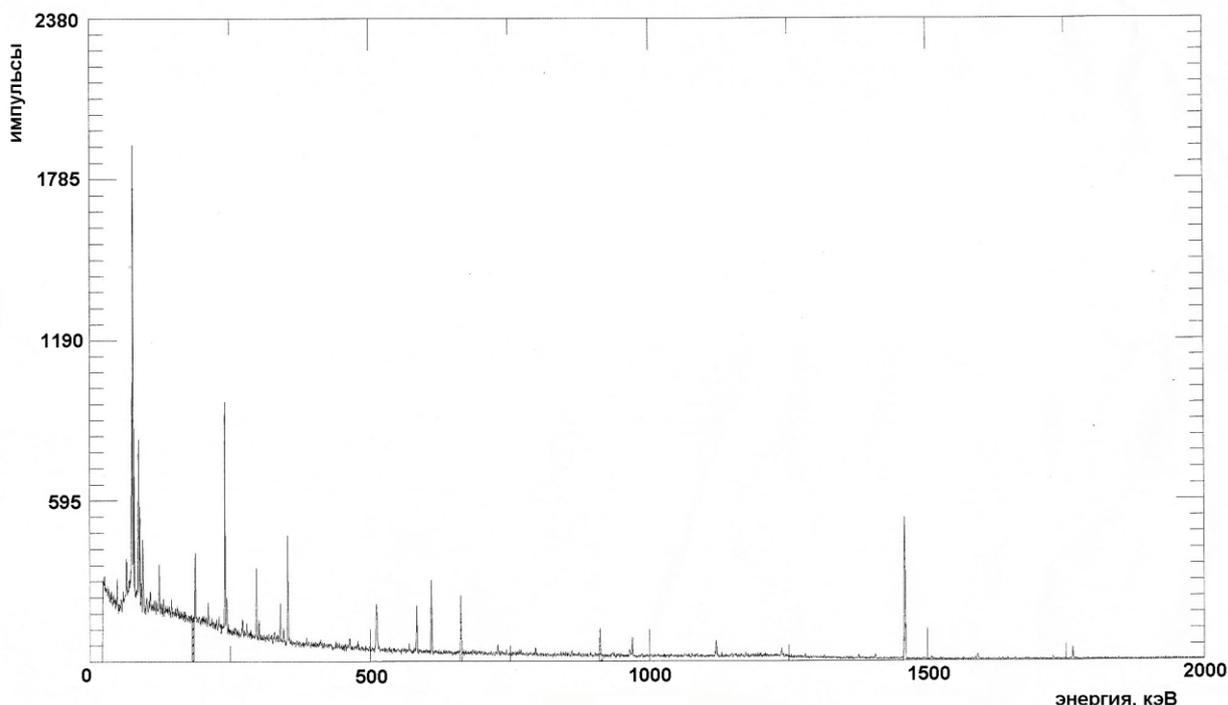
Радионуклид	$^{203}\text{Hg}$	$^{113}\text{Sn}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{24}\text{Na}$
Энергия фотонов, используемая для калибровки; кэВ	279	392	662	1368
Номера каналов	186	261	441	912

65-85. Одним из этапов радиоэкологической экспертизы участков застройки является определение удельной активности естественных радионуклидов ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ), а также техногенного  $^{137}\text{Cs}$  в образцах грунтов и естественных строительных материалов.

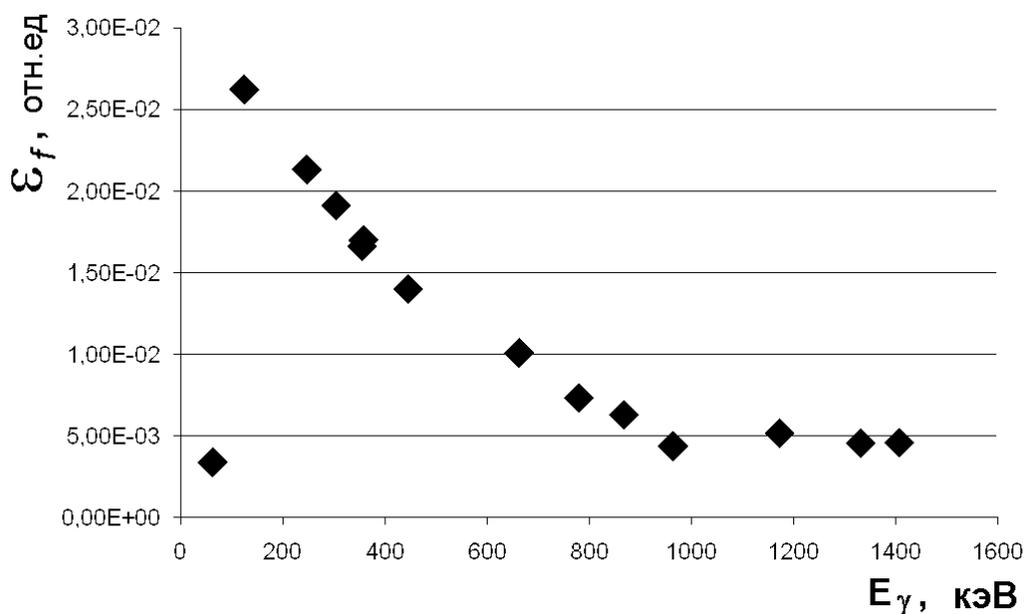
Радионуклиды и их удельные активности определяют, используя метод гамма-спектрометрии, по положению и интенсивности (площади) пиков полного поглощения энергии (ППЭ)  $\gamma$ -квантов, характерных для самого нуклида ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ( $^{137\text{m}}\text{Ba}$ )) или его дочерних продуктов. Удельную активность  $^{232}\text{Th}$  рассчитывают по спектру дочернего  $^{228}\text{Ac}$  ( $E_\gamma = 911$  кэВ,  $p = 0,266$ ), а  $^{226}\text{Ra}$  - по площади пиков ППЭ  $\gamma$ -излучения самого радия и его дочерних продуктов ( $E_\gamma = 186$  кэВ,  $p = 0,057$ ).

Измерения исследуемых образцов грунта проводили на гамма-спектрометре фирмы «Ortex» с полупроводниковым германиевым детектором. Типичный спектр представлен на рисунке. График зависимости эффективности регистрации фотонов по пику ППЭ ( $\epsilon_f$ ) от энергии  $E_\gamma$ , учитывающий геометрию препарат-детектор и эффективность регистрации детектором  $\gamma$ -квантов различной энергии, получен с помощью этого же

спектрометра. Измерения исследуемых и эталонных образцов проводили в одинаковых условиях, соблюдая постоянство геометрического



коэффициента  $\eta$  и используя близкие по форме, составу и плотности образцы.



В приведенных ниже таблицах представлены результаты компьютерной обработки гамма-спектров образцов грунта реальных земельных участков, отведенных в Москве под строительство жилых и административных зданий. Указаны: время набора спектра ( $t$ , с), масса образцов ( $m$ , кг), площадь пика ППЭ ( $N$ , имп.) на определенном участке спектра за вычетом

вклада фона и комптоновского континуума («пьедестала»), абсолютная погрешность ( $\pm \Delta N$ , имп.) определения  $N$ , энергия, соответствующая пикам ППЭ  $\gamma$ -квантов перечисленных выше нуклидов.

Идентифицируйте радионуклид и рассчитайте, используя справочные данные и калибровочную зависимость  $\varepsilon_f$  от  $E_\gamma$ , удельную активность ( $A_{уд.}$ , Бк/кг)  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{226}\text{Ra}$ . Затем определите эффективную активность ( $A_{эф.}$ , Бк/кг) пробы грунта, оцените погрешность определения  $A_{эф}$  и дайте заключение о возможном использовании данного земельного участка для тех или иных городских нужд.

Согласно нормативным документам (НРБ-99/2009), величину  $A_{эф}$  определяют как:

$$A_{эф} = A_{уд}^{226\text{Ra}} + 1,3A_{уд}^{232\text{Th}} + 0,09A_{уд}^{40\text{K}}$$

Для участков жилой застройки  $A_{эф}$  не должна превышать 370 Бк/кг, для транспортных коммуникаций - 740 Бк/кг. Если значение  $A_{эф}$  больше 740 Бк/кг, то участок земли нуждается в рекультивации или дезактивации. Для  $^{137}\text{Cs}$  нормы не детализированы, но, как правило, в Московском регионе его удельная активность редко превышает 15-20 Бк/кг. В том случае, если удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  больше 40 Бк/кг, выясняют причины аномально высокого загрязнения почвы, принимают решение о возможной рекультивации или дезактивации участка в зависимости от планов его дальнейшего использования.

#### 65. Образец № 433-14

$t = 49617$  с;  $m = 0,12$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{пд}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm \Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	519	31	24	185.37
2	659.41	663.49	391	191	26	662.11
3	908.63	913.52	264	147	22	910.85
4	1454.94	1461.87	990	961	33	1459.03

#### 66. Образец № 433-16

$t = 6001$  с;  $m = 0,142$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{пд}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm \Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	65	17	8	185.44
2	659.41	663.49	48	16	9	661.68
3	908.63	913.52	33	25	7	910.46
4	1454.94	1461.87	158	146	14	1459.14

67. Образец № 433-12

$t = 9078$  с;  $m = 0,13$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{\text{пд}}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm\Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	88	10	10	184.93
2	659.41	663.49	63	28	10	662.03
3	908.63	913.52	43	35	7	910.89
4	1454.94	1461.87	212	194	16	1459.24

68. Образец № 432-5

$t = 47798$  с;  $m = 0,138$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{\text{пд}}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm\Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	536	25	24	185.22
2	659.41	663.49	393	127	28	662.09
3	908.63	913.52	319	165	25	910.91
4	1454.94	1461.87	1256	1163	40	1459.27

69. Образец №432-2

$t = 6501$  с;  $m = 0,145$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{\text{пд}}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm\Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	103	23	10	184.83
2	659.41	663.49	88	42	12	662.30
3	908.63	913.52	52	27	10	911.20
4	1454.94	1461.87	214	208	15	1459.10

70. Образец № 431-6

$t = 7001$  с;  $m = 0,125$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{\text{пд}}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm\Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	60	8	8	185.44
2	659.41	663.49	59	24	10	661.86
3	908.63	913.52	50	29	9	910.71
4	1454.94	1461.87	127	121	12	1459.29

71. Образец № 431-4

$t = 7200$  с;  $m = 0,129$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{\text{пд}}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm\Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	77	5	9	185.44
2	659.41	663.49	70	38	10	662.19
3	908.63	913.52	49	28	9	910.46
4	1454.94	1461.87	201	172	17	1459.31

## 72. Образец № 431-3

 $t = 7215$  с;  $m = 0,134$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{\text{пд}}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm\Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	83	7	9	184.80
2	659.41	663.49	63	28	10	662.14
3	908.63	913.52	50	12	11	911.31
4	1454.94	1461.87	206	188	16	1459.10

## 73. Образец № 430-4

 $t = 6200$  с;  $m = 0,137$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{\text{пд}}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm\Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	98	5	10	185.23
2	659.41	663.49	59	31	10	662.51
3	908.63	913.52	79	66	10	911.38
4	1454.94	1461.87	203	203	14	1459.37

## 74. Образец № 430-3

 $t = 8998$  с;  $m = 0,132$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{\text{пд}}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm\Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	125	8	12	185.23
2	659.41	663.49	73	34	11	662.59
3	908.63	913.52	93	55	13	911.04
4	1454.94	1461.87	253	230	18	1459.32

## 75. Образец № 433-15

 $t = 5380$  с;  $m = 0,138$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{\text{пд}}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm\Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	58	4	8	184.83
2	659.41	663.49	45	13	9	662.23
3	908.63	913.52	44	36	7	910.55
4	1454.94	1461.87	144	138	12	1458.63

## 76. Образец № 432-7

 $t = 7002$  с;  $m = 0,148$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{\text{пд}}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm\Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	64	5	8	184.83
2	659.41	663.49	58	33	9	661.53
3	908.63	913.52	43	35	7	910.52
4	1454.94	1461.87	209	203	15	1459.02

## 77. Образец № 432-6

 $t = 8785$  с;  $m = 0,169$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{\text{пд}}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm\Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	113	5	11	185.74
2	659.41	663.49	79	40	11	662.15
3	908.63	913.52	66	33	11	911.73
4	1454.94	1461.87	263	257	16	1458.96

## 78. Образец № 431-2

 $t = 8003$  с;  $m = 0,130$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{\text{пд}}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm\Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	102	2	10	184.83
2	659.41	663.49	59	45	8	662.71
3	908.63	913.52	54	37	9	910.97
4	1454.94	1461.87	205	205	14	1458.70

## 79. Образец № 432-3

 $t = 6100$  с;  $m = 0,154$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{\text{пд}}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm\Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	74	10	9	184.83
2	659.41	663.49	68	15	12	662.25
3	908.63	913.52	46	33	8	911.38
4	1454.94	1461.87	164	158	13	1459.55

## 80. Образец № 432-4

 $t = 5203$  с;  $m = 0,119$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{\text{пд}}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm\Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	50	10	7	184.62
2	659.41	663.49	55	9	11	662.24
3	908.63	913.52	19	15	5	910.26
4	1454.94	1461.87	124	112	12	1459.60

## 81. Образец № 433-8

 $t = 8001$  с;  $m = 0,153$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{\text{пд}}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm\Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	82	10	9	184.62
2	659.41	663.49	64	43	9	661.75
3	908.63	913.52	62	41	10	911.50
4	1454.94	1461.87	308	296	18	1459.43

## 82. Образец № 433-7

 $t = 6700$  с;  $m = 0,154$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{\text{пд}}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm\Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	76	10	9	185.82
2	659.41	663.49	58	33	9	661.63
3	908.63	913.52	61	32	11	911.13
4	1454.94	1461.87	206	188	16	1459.29

## 83. Образец № 433-13

 $t = 12400$  с;  $m = 0,12$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{\text{пд}}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm\Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	143	33	13	185.85
2	659.41	663.49	87	52	11	661.74
3	908.63	913.52	76	30	13	910.82
4	1454.94	1461.87	306	288	19	1459.00

## 84. Образец № 432-1

 $t = 7218$  с;  $m = 0,164$  кг

n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{\text{пд}}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm\Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	93	15	10	185.85
2	659.41	663.49	85	43	12	662.31
3	908.63	913.52	80	47	12	911.15
4	1454.94	1461.87	247	224	18	1459.38

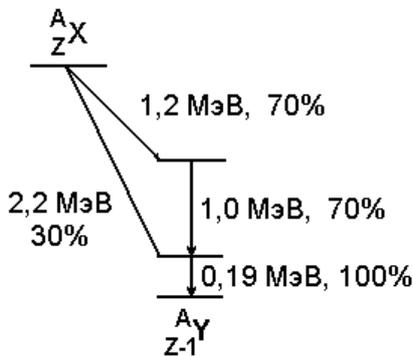
## 85. Образец 430-1

 $t = 5500$  с;  $m = 0,152$  кг

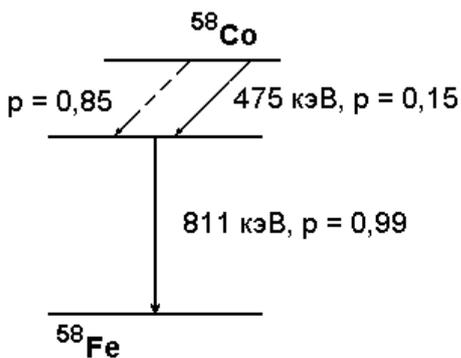
n/n	диапазон (кэВ)		$N+N_{\text{пд}}$ , имп.	$N$ , имп.	$\pm\Delta N$ , имп.	Центр пика ППЭ, кэВ
1	184.01	186.46	84	9	9	185.85
2	659.41	663.49	50	18	9	662.47
3	908.63	913.52	52	31	9	910.90
4	1454.94	1461.87	187	181	14	1459.30

### Раздел III. РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ и ДОЗИМЕТРИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

1. Определите плотность потока частиц в воздухе на расстоянии 50 см от точечного изотропного источника  $^{204}\text{Tl}$  активностью 2,4 МБк. Чему равен флюенс частиц за 1 ч? Плотность воздуха  $0,00129 \text{ г/см}^3$ .



2. На рисунке приведена схема распада  $^A_Z X$ . Сравните плотности потоков энергии  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений в воздухе на расстоянии 50 см от источника. Плотность воздуха  $0,00129 \text{ г/см}^3$ . Линейные коэффициенты ослабления в воздухе ( $\mu'$ ,  $\text{см}^{-1}$ ) для  $\gamma$ -квантов с энергией 0,19 и 1,0 МэВ равны  $0,161 \cdot 10^{-3}$  и  $0,0822 \cdot 10^{-3}$ , соответственно.



3. На рисунке приведена схема распада  $^{58}\text{Co}$ . Вычислите керма-постоянную радионуклида, предполагая, что позитроны полностью аннигилируют в материале источника.

4. Рассчитайте мощность поглощенной дозы в воздухе от  $\beta$ -излучения  $^{89}\text{Sr}$  на расстоянии 60 см, если измеренная радиометром (площадь окна  $2 \text{ см}^2$ ) скорость счета над фоном составила 2500 имп/с, а коэффициент регистрации  $\phi = 0,01$ .

5. Рассчитайте отношение мощностей поглощенных доз в воздухе, создаваемых  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучением точечного изотропного источника  $^{60}\text{Co}$  на расстоянии 10 см от источника.

6. Определите дозу, получаемую участком кожи при облучении в течение 10 мин точечным источником  $^{204}\text{Tl}$  активностью 40 МБк, расположенном на расстоянии 5 см.

7. Измеренная на рабочем месте мощность дозы от  $\gamma$ -излучения  $^{60}\text{Co}$  составила  $0,5 \text{ мкГр/с}$ . Обеспечит ли свинцовый экран толщиной 7 см снижение мощности дозы до предельно допустимого уровня?

8. Требуется ли установка защитного экрана, если на рабочем месте мощность эквивалентной дозы от источников ионизирующих излучений

составляет 2,3 нЗв/с? Доза облучения распределяется по году равномерно. Работа проводится 1700 ч в году. Ответ подтвердите расчетами.

9. В лаборатории ежедневно в течение 2 ч проводится работа с точечным источником  $^{137}\text{Cs}$  ( $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ) активностью 394 МБк на расстоянии 30 см. При этом в другое время источники ионизирующего излучения не эксплуатируются. Определите: а) дневную дозу, которую может получить экспериментатор, при отсутствии защиты; б) минимальную толщину защитного экрана из свинца, обеспечивающего безопасные условия работы.

10. Радиометром с блоком для измерения  $\beta$ -излучения (площадь детектора  $150\text{ см}^2$ , толщина стенок счетчиков  $60\text{ мг/см}^2$ , геометрический коэффициент  $\eta = 0,2$ ) при проверке чистоты поверхности стола, на котором проводилась работа с радионуклидом  $^{32}\text{P}$ , была зарегистрирована скорость счета 1000 имп/мин (за вычетом фона). Определите, превышает ли загрязнение допустимый уровень.

11. Определите мощность поглощенной дозы от  $\alpha$ -излучения точечного изотропного источника радионуклида  $^*\text{Y}$  ( $A = 10\text{ кБк}$ ,  $E_\alpha = 6\text{ МэВ}$ ,  $p = 100\%$ ), находящегося в биологической ткани, в её элементарном объеме. Плотность ткани принять равной  $1\text{ г/см}^3$ , пробег  $\alpha$ -частиц -  $0,0056\text{ г/см}^2$ .

12. Рассчитайте мощность поглощенной дозы, создаваемой в слое воды плоскопараллельным потоком  $\alpha$ -частиц  $^{210}\text{Po}$ , если их пробег в воде равен 46 мкм. Плотность потока  $F_\alpha = 4 \cdot 10^5\text{ частиц/(с}\cdot\text{см}^2)$ .

13. По приведенным в табл. П1 данным рассчитайте керма-постоянную радионуклида  $^{111}\text{Ag}$ .

14. Определите дозу, которую получают руки экспериментатора при работе в течение 1 ч на расстоянии 20 см от точечного изотропного источника, содержащего 400 МБк  $^{90}\text{Sr}$  (в равновесии с  $^{90}\text{Y}$ ).

15. Определите мощность эквивалентной дозы (мкЗв/ч), создаваемой точечным изотропным источником  $^{60}\text{Co}$  активностью 370 МБк в биологической ткани на расстоянии 50 см от источника.

16. Рассчитайте мощности дозы, создаваемые источником  $^{32}\text{P}$  активностью 10 МБк: а) на руки при работе с пинцетом (расстояние 10 см); б) на все тело (расстояние 50 см). Превышают ли эти значения предельно допустимые для профессионалов?

17. Толщина защитного свинцового экрана равна 10 см. Проверьте, обеспечит ли такая защита безопасные условия работы в течение 6-ти

часового рабочего дня на расстоянии 25 см от источника  $^{59}\text{Fe}$  активностью 0,5 ГБк.

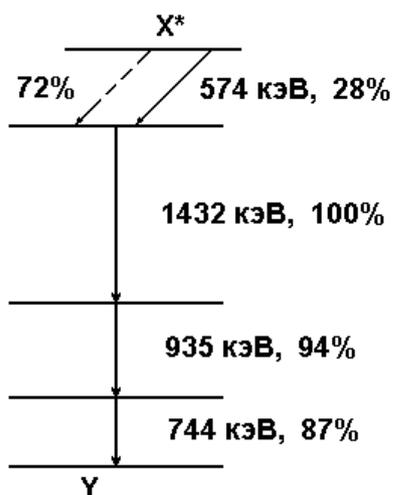
18. Рассчитайте толщину свинцового экрана, обеспечивающего ослабление плотности потока энергии  $\gamma$ -излучения точечного изотропного источника  $^{65}\text{Zn}$  в 5000 раз.

19. Рассчитать минимальную толщину свинцового экрана, обеспечивающего безопасные условия работы с источником  $^{134}\text{Cs}$  активностью 4 ГБк на расстоянии 50 см от источника.

20. На карман халата площадью около  $120\text{ см}^2$  попало 0,5 мл раствора, содержащего равновесную смесь  $^{90}\text{Sr}$ ( $^{90}\text{Y}$ ), с удельной активностью 18500 Бк/мл. Загрязненность измерялась радиометром с площадью детектора  $300\text{ см}^2$  и толщиной окна  $0,01\text{ г/см}^2$ . Определить, во сколько раз загрязненность халата превышает допустимый уровень; рассчитать показания радиометра (имп/с). Геометрический коэффициент  $\eta = 0,4$ .

21. В воздухе на высоте уровня моря за счет космического излучения за 1 ч в среднем образуется 7560 пар ионов в  $1\text{ см}^3$ . Определите поглощенную дозу в воздухе за год, если на образование одной пары ионов затрачивается энергия 33,9 эВ.

22. В 1 л воздуха (н.у.) под действием фотонного излучения образовалось  $8,3 \cdot 10^{12}$  пар ионов. Определите керму. Потерей энергии на тормозное излучение пренебречь.



23. На рисунке приведена схема распада радионуклида  $X^*$ . Определите его керма-постоянную, считая, что позитроны полностью аннигилируют в материале источника. Вкладом характеристического рентгеновского излучения пренебречь.

24. На лабораторном столе находится 5 мл раствора  $^{141}\text{Ce}:\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$  с удельной активностью 6000 Бк/мл. Оцените эквивалентную дозу при работе с раствором в течение 1 ч на расстоянии 50 см. Ослаблением  $\gamma$ -излучения в воде и в стенках коблы пренебречь.

25. Оцените эквивалентную дозу, полученную экспериментатором при работе с препаратом  $^{24}\text{Na}$ , активность которого на момент приготовления

составляла 1 МБк, на расстоянии 30 см в течение 6 ч. Считать препарат точечным изотропным источником.

26. Рассчитайте предельно допустимую плотность потока  $\beta$ -частиц  $^{32}\text{P}$  на поверхности биологической ткани, принимая, что их максимальный пробег в биологической ткани равен  $780 \text{ мг/см}^2$ .

27. Точечный изотропный источник  $^{95}\text{Nb}$ , активность которого равна 370 МБк, расположен в 50 см от бетонной стены толщиной 41 см. Оцените мощность эквивалентной дозы  $\gamma$ -излучения на внешней (по отношению к источнику) поверхности стены. Коэффициент ослабления  $\gamma$ -излучения  $^{95}\text{Nb}$  в бетоне  $\mu = 0,170 \text{ см}^{-1}$ , дозовый фактор накопления  $B_D = 17$ .

28. В лаборатории ведется постоянная работа с точечным источником, содержащим  $^{137}\text{Cs}$  активностью 7 ГБк, в течение 2 часов в день. Расстояние до источника 40 см. При этом в остальные часы сотрудники не работают с источниками ионизирующего излучения. Рассчитайте: 1) мощность дозы и дозу от  $\gamma$ -излучения, которую мог бы получать ежедневно экспериментатор при отсутствии защиты, 2) в случае необходимости минимальную толщину защитного экрана из свинца, обеспечивающего безопасные условия работы.

29. Рассчитайте толщину свинцового экрана, который необходим для снижения мощности дозы от  $\gamma$ -излучения  $^{131}\text{I}$  в 10000 раз.

30. Вам необходимо отобрать пробу раствора, содержащего  $^{32}\text{P}$ . Какие защитные приспособления и оборудование необходимо использовать?

31. Определите поглощенную дозу, создаваемую  $\alpha$ -излучением точечного источника  $^{210}\text{Po}$  ( $A = 10^4 \text{ Бк}$ ) в элементарном объеме воды за 1 ч. Пробег  $\alpha$ -частиц полония-210 в воде составляет 0,0046 см.

32. Определите мощность эквивалентной дозы  $\alpha$ -излучения радионуклида \*X ( $A = 1000 \text{ Бк}$ ,  $E_\alpha = 7 \text{ МэВ}$ ,  $p = 100\%$ ), равномерно распределенного в объеме биологической ткани массой 2 г. Пробег частиц принять равным 0,007 см, плотность ткани –  $1 \text{ г/см}^3$ .

33. Рассчитайте керма-постоянную радионуклида \*B, испускающего  $\beta^+$ -частицы (выход на распад 100%), предполагая, что все позитроны полностью аннигилировали в материале источника.

34. Рассчитайте отношение мощностей поглощенных доз в воздухе, создаваемых  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучением точечного изотропного источника  $^{137}\text{Cs}$ , на расстоянии 20 см.

35. Определите эквивалентную дозу, полученную экспериментатором при работе с препаратом  $^{38}\text{S}$  в течение 3 ч на расстоянии 50 см. Активность препарата в начальный момент составляла  $10^5$  Бк. При распаде ядра  $^{38}\text{S}$  испускаются  $\beta^-$ -частицы с максимальной энергией  $E_{\beta 1} = 3$  МэВ ( $p = 0,05$ ) и  $E_{\beta 2} = 1,1$  МэВ ( $p = 0,95$ ), а также  $\gamma$ -кванты  $E_{\gamma} = 1,9$  МэВ ( $p = 0,95$ ). Период полураспада  $^{38}\text{S}$  равен 170 мин.

36. Рассчитайте предельно допустимую плотность потока  $\alpha$ -частиц с энергией 10 МэВ на ладони, если пробег таких частиц в биологической ткани равен  $0,013$  г/см<sup>2</sup>. Плотность ткани принять равной  $1$  г/см<sup>3</sup>.

37. На расстоянии 1,44 м от точечного изотропного источника  $^{137}\text{Cs}$ , активность которого равна 170 ГБк, расположен свинцовый экран толщиной 6 см. Оцените мощность эквивалентной дозы от  $\gamma$ -излучения  $^{137}\text{Cs}$  на внешней (по отношению к источнику) поверхности экрана.

38. В лаборатории ведется постоянная работа с точечным источником, содержащим радионуклид  $^{95}\text{Nb}$  активностью 420 МБк, в течение 15 минут в день. Расстояние до источника равно 20 см. Рассчитайте: 1) дозу от  $\gamma$ -излучения, которую может получать ежедневно экспериментатор при отсутствии защиты, 2) толщину защитного экрана из свинца, обеспечивающего безопасные условия работы (в предположении равномерного распределения дозы по году).

39. В лаборатории ведется постоянная работа с точечным источником, содержащим радионуклид  $^{141}\text{Ce}$  активностью 655 МБк, в течение 4 ч в день на расстоянии 20 см от источника. Предполагая равномерность распределения дозы по году, рассчитайте: 1) мощность дозы и дозу от  $\gamma$ -излучения, которую может получать ежедневно экспериментатор при отсутствии защиты; 2) в случае необходимости минимальную толщину защитного экрана из свинца, обеспечивающего безопасные условия работы.

40. Рука оказалась случайно загрязненной радионуклидом  $^{204}\text{Tl}$  ( $T_{1/2}=3,78$  лет,  $E_{\beta, \text{max}} = 760$  кэВ). Какие еще необходимы данные, чтобы рассчитать поглощенную биологической тканью дозу?

41. Определите плотность потока  $\gamma$ -квантов источника  $^{51}\text{Cr}$ , который создает в биологической ткани мощность дозы  $0,01$  Зв/ч.

42. Определите плотность потока  $\gamma$ -квантов точечного источника  $^{60}\text{Co}$ , который создает в воздухе мощность кермы  $1 \cdot 10^{-3}$  Гр/с.

43. Рассчитайте керма-постоянную радионуклида  $^{22}\text{Na}$ , предполагая, что все позитроны полностью аннигилировали в материале источника. Массовые

коэффициенты истинного поглощения энергии фотонов в воздухе принять равными:  $0,00297$  ( $E = 511$  кэВ) и  $0,00260$  м<sup>2</sup>/кг ( $E_\gamma = 1274$  кэВ).

44. Определите эквивалентную дозу, полученную при работе с образцом  $^{113m}\text{In}$  ( $T_{1/2} = 99$  мин) активностью 5 МБк в течение 90 мин на расстоянии 50 см. Керма-постоянная радионуклида  $\Gamma_B = 11,8$  аГр·м<sup>2</sup>/(с·Бк).

45. Активность препарата радионуклида \*В в момент получения составляла 15 МБк. Оцените эквивалентную дозу, полученную экспериментатором при работе с препаратом в течение 2 ч на расстоянии 50 см. Период полураспада \*В равен 90 мин, керма-постоянная  $\Gamma_B = 12$  аГр·м<sup>2</sup>/(с·Бк).

46. Определите наименьшее расстояние от источника  $^{65}\text{Zn}$  активностью 0,37 ГБк, на котором можно находиться без защитного экрана в течение 1 ч, если величина полученной дозы не должна превышать 12 мкЗв.

47. Во сколько раз необходимо ослабить фотонное излучение источника  $^{58}\text{Co}$  активностью 370 ГБк для постоянной работы с ним на расстоянии 0,5 м полный рабочий день? Считать, что испускаемые ядром позитроны полностью аннигилировали в материале источника.

48. В лаборатории ежедневно в течение 30 мин проводится работа с точечным источником  $^{60}\text{Co}$  активностью 37 ГБк. Определите дозу от  $\gamma$ -излучения, которую может получить экспериментатор на расстоянии 26 см при отсутствии защиты. Рассчитайте минимальную толщину защитного экрана из свинца, обеспечивающего безопасные условия работы.

49. Рассчитайте толщину экрана из свинца, снижающего дозу, создаваемую источником  $^{124}\text{Sb}$  активностью 370 МБк в течение 6-часового рабочего дня на расстоянии 0,5 м, до уровня 72 мкЗв/день.

50. С помощью прибора с блоком для измерения  $\beta$ -излучения (площадь окна  $3$  см<sup>2</sup>) была зарегистрирована загрязненность кожи руки радионуклидом  $^{89}\text{Sr}$  на площади  $1$  см<sup>2</sup>. Скорость счета (над фоном) составила 2700 имп/мин. Коэффициент регистрации  $\phi = 0,3$ . Рассчитайте дозу, поглощенную тканью за 20 мин.

51. Рассчитайте поглощенную дозу  $\gamma$ -излучения в воздухе, если ионизировано 5% всех молекул.

52. Определите плотность потока и плотность потока энергии бета- и гамма-излучения в воздухе на расстоянии 40 см от точечного источника  $^{86}\text{Rb}$  активностью 10 МБк. Плотность воздуха  $0,00129$  г/см<sup>3</sup>.

53. Рассчитайте керма-постоянную радионуклида  $^{89}\text{Zr}$ . Тип распада: электронный захват (вероятность  $p_{\text{э.з.}} = 78\%$ ) или  $\beta^+$ -распад ( $p_{\beta} = 22\%$ ). Максимальная энергия позитронов 0,9 МэВ, энергия  $\gamma$ -квантов 0,91 МэВ ( $p_{\gamma} = 100\%$ ). Считать, что все позитроны полностью аннигилировали в материале источника.
54. Рассчитайте поглощенные дозы, создаваемые в воздухе  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучениями радионуклида  $^{203}\text{Hg}$  на расстоянии 10 см от источника активностью 10 МБк в течение 2 ч. Доза от какого излучения больше?
55. С помощью счетчика Гейгера-Мюллера с рабочей поверхностью  $100\text{ см}^2$  обнаружили, что регистрируемая активность на расстоянии в 1 м от препарата, содержащего радионуклид  $^{144}\text{Ce}$ , равна 500 имп/с. Рассчитайте мощность дозы в окрестности детектора, если эффективность используемого счетчика к регистрируемому излучению составляет 0,05%.
56. Следует перенести источник  $^{60}\text{Co}$  активностью 20 ГБк из одного контейнера в другой с помощью манипулятора длиной 50 см. В течение какого времени следует выполнить эту операцию, если в этот день другие работы с источниками не проводятся?
57. Источник  $^{59}\text{Fe}$  активностью 3,7 ГБк находится за защитным экраном из свинца толщиной 10 см. Определите мощность дозы (мкГр/ч), создаваемую на расстоянии 25 см от источника.
58. Необходимо ослабить плотность потока энергии  $\gamma$ -излучения источника  $^{60}\text{Co}$  в 200 раз. Определите необходимую толщину экрана из свинца.
59. При перевозке источника  $^{60}\text{Co}$  активностью 100 ГБк обслуживающий персонал должен находиться в течение 3 суток на расстоянии 2 м от свинцового контейнера. Оцените необходимую толщину стенок свинцового контейнера. Мощность дозы на поверхности контейнера не должна превышать 6 мкЗв/ч (при 1700 рабочих часах и равномерном распределении дозы по году).
60. С помощью прибора с блоком для измерения  $\beta$ -излучения (площадь окна  $3\text{ см}^2$ ) была зарегистрирована загрязненность перчаток радионуклидом  $^{35}\text{S}$  на площади  $0,5\text{ см}^2$ . Скорость счета пятна (за вычетом фона) составляла 40 имп/с, коэффициент регистрации 0,2. Во сколько раз загрязнение превышает предельно допустимое?
61. В начальный момент активность точечного источника  $^{90}\text{Sr}$ , очищенного от продуктов распада, составляла 1 МБк. Чему будут равны плотность

потока частиц и плотность потока энергии на расстоянии 5 см от этого источника  $^{90}\text{Sr}$ ( $^{90}\text{Y}$ ) через 30 дней?

62. Чему равны плотность потока и плотность потока энергии  $\beta^-$ -частиц на коже руки, загрязненной радионуклидом  $^{170}\text{Tm}$ . Площадь пятна 2 см<sup>2</sup>, активность 10 кБк.

63. Рассчитайте керма-постоянную радионуклида  $^{65}\text{Zn}$ , предполагая, что все позитроны полностью аннигилировали в материале источника. При расчетах массовые коэффициенты истинного поглощения для фотонов  $E_\gamma = 1116$  кэВ и  $E = 511$  кэВ в воздухе принять равными 0,00273 и 0,00297 м<sup>2</sup>/кг, соответственно.

64. Скорость счета  $\gamma$ -излучения препарата  $^{141}\text{Ce}$ , измеренная на расстоянии 2 м с помощью сцинтилляционного детектора, имеющего рабочую поверхность 10 см<sup>2</sup>, оказалась равна 124 имп/с. Рассчитайте мощность дозы в окрестности детектора, если его эффективность к  $\gamma$ -излучению составляет 0,6, а скорость счета фона - 240 имп/мин.

65. Рассчитайте отношение мощностей поглощенных доз в воздухе, создаваемых  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучениями точечного изотропного источника  $^{59}\text{Fe}$  на расстоянии 10 см.

66. По сколько минут в неделю можно работать без защиты на расстоянии 40 см от источника  $\gamma$ -излучения активностью 200 МБк, если работа проводится в течение года регулярно (1700 рабочих часов)? Керма-постоянная источника равна 70 аГр·м<sup>2</sup>/(с·Бк).

67. Какова энергия  $\gamma$ -излучения, широкий пучок которого ослабляется в 100 раз слоем свинца 39 мм?

68. В лаборатории проводится постоянная работа с точечным источником, содержащим радионуклид  $^{86}\text{Rb}$  активностью 440 ГБк, в течение 2 ч в день на расстоянии 25 см от источника. Предполагая равномерность распределения дозы по году, рассчитайте: 1) мощность дозы и дозу от  $\gamma$ -излучения, которую может получить сотрудник при отсутствии защиты, 2) в случае необходимости минимальную толщину защитного экрана из свинца, обеспечивающего безопасные условия работы.

69. На рабочем столе находится источник  $^{133}\text{Ba}$ . Измеренная мощность дозы составила 14 мГр/ч. Рассчитайте толщину свинцового экрана, обеспечивающего снижение мощности дозы до 70 мкГр/ч.

70. Ладонь руки оказалась загрязненной радионуклидом, испускающим (с одинаковым выходом на распад)  $\beta$ -частицы и  $\gamma$ -кванты с энергией  $E_{\beta, \max} = E_{\gamma} = 500$  кэВ. От какого типа излучения доза на руку будет больше и во сколько раз? Коэффициент истинного поглощения  $\gamma$ -излучения для биологической ткани принять равным  $0,033$  см<sup>2</sup>/г.

71. Мощность поглощенной дозы при работе с  $\beta$ -источником составляет  $0,5$  мкГр/ч, а время ежедневной работы  $3$  ч. Чему равна эквивалентная доза за неделю? Доза облучения распределяется по году равномерно.

72. Три исследователя получили в течение часа одинаковую дозу  $100$  мкГр. Первый из них работал только с источником позитронов, второй – с источником рентгеновского излучения, третий – с источником быстрых нейтронов. Какой из исследователей и почему подвергся большему воздействию ионизирующего излучения?

73. На рабочем столе находится  $5$  мл раствора  $^{59}\text{Fe}:\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  с удельной активностью  $2000$  Бк/мл. Оцените мощность кермы в воздухе на расстоянии  $100$  см. Ослаблением потока фотонов в стенках колбы пренебречь. Считать, что вклад в мощность дозы от тормозного излучения пренебрежимо мал.

74. С помощью сцинтилляционного детектора, имеющего рабочую поверхность  $10$  см<sup>2</sup>, была измерена скорость счета препарата  $^{203}\text{Hg}$  на расстоянии  $50$  см от источника. За вычетом фона скорость счета оказалась равной  $180$  имп/с. Рассчитайте мощность дозы в окрестности детектора, если его эффективность к  $\gamma$ -излучению  $^{203}\text{Hg}$  составляет  $60\%$ .

75. Зафиксированная радиометром скорость счета точечного источника  $^{204}\text{Tl}$  составила  $3000$  имп/с (коэффициент регистрации  $\phi = 0,02$ ). Рассчитайте дозу, полученную сотрудником, который находился в течение  $1$  ч на расстоянии  $50$  см от источника. Превышает ли полученная доза предельно допустимую?

76. Необходимо перенести источник  $^{137}\text{Cs}$  активностью  $18500$  МБк из защитного контейнера в сейф. Какой длины должен быть манипулятор, чтобы полученная при этом доза не превышала  $1/6$  предельно допустимого дневного значения? Перемещение источника длится  $1$  мин.

77. Оцените активность точечного источника  $^{137}\text{Cs}$ , находящегося в свинцовом контейнере с толщиной стенок  $42$  мм, если максимальная мощность дозы на поверхности контейнера составляет  $10$  нГр/с.

78. Рассчитайте толщину слоя свинца, обеспечивающего снижение мощности дозы от  $\gamma$ -излучения  $^{131}\text{I}$  в  $1000$  раз.

79. Рассчитайте эквивалентную дозу при работе с точечным источником  $^{22}\text{Na}$  ( $A = 60$  МБк) на расстоянии 50 см в течение 5 ч. Выберите материал защиты, определите толщину защитного экрана, обеспечивающего безопасные условия работы. Считать, что испускаемые ядром позитроны аннигилируют в материале источника.

80. Ладонь оказалась загрязненной радионуклидом  $^{35}\text{S}$ . Установлено, что удельная скорость счета пятна 150 имп/(с·см<sup>2</sup>). Условия измерения: счетчик Гейгера-Мюллера ( $d_{\text{окна}} = 5$  мг/см<sup>2</sup>), слой воздуха 5 мм, геометрический коэффициент  $\eta = 0,5$ . Оцените энергию частиц, поглощенную в течение 1 ч в 1 г биологической ткани.

81. На каком расстоянии от точечного источника  $^{32}\text{P}$  активностью 0,5 МБк можно находиться сотрудникам (6-часовой рабочий день, равномерное распределение дозы по году)? Рассчитайте плотность потока  $\beta$ -частиц на этом расстоянии от источника. Поглощением излучения в материале источника и в воздухе пренебречь.

82. Мощность поглощенной дозы при работе с источником  $\beta$ -частиц составила 0,5 мкГр/ч, а время ежедневной работы 20 мин. Доза облучения распределяется по году равномерно. Чему равна эквивалентная доза, полученная за 6 рабочих дней?

83. Плотность потока энергии в широком пучке моноэнергетического мононаправленного фотонного излучения с энергией 1 МэВ в воздухе равна 2000 МэВ/(см<sup>2</sup>·с). Определите соответствующую мощность воздушной кермы.

84. С помощью сцинтилляционного детектора, имеющего рабочую поверхность 15 см<sup>2</sup>, была измерена скорость счета фотонного излучения на некотором расстоянии от препарата  $^{86}\text{Rb}$ . За вычетом фона скорость счета оказалась равной  $3,6 \cdot 10^5$  имп/мин. Рассчитайте мощность дозы в окрестности детектора, если его эффективность к  $\gamma$ -излучению  $^{86}\text{Rb}$  составляет 20%.

85. Рассчитайте отношение мощностей поглощенных доз в воздухе, создаваемых  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучением точечного изотропного источника  $^{95}\text{Nb}$  на расстоянии 5 см.

86. Для градуировки дозиметрических приборов используется точечный изотропный источник  $^{60}\text{Co}$  активностью 8 ГБк. Сколько минут в день можно работать с источником без защиты, если расстояние от источника до рабочего места равно 3 м и доза равномерно распределяется по году?

87. Определите мощность эквивалентной дозы  $\gamma$ -излучения на расстоянии 3 м от источника  $^{137}\text{Cs}$  ( $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ) активностью 40 МБк. Массовый коэффициент поглощения энергии фотонов в воздухе принять равным  $0,00293 \text{ см}^2/\text{г}$ .

88. В организме условного человека (масса 70 кг) содержится  $\sim 140$  г калия. Оцените эквивалентную дозу от  $\beta$ -излучения  $^{40}\text{K}$  в течение года, предполагая равномерное распределение элемента в организме.

89. Участок тела облучается источником  $^{32}\text{P}$  активностью 4 МБк, площадь которого равна  $2 \text{ см}^2$ . Определить необходимое время контакта источника с тканью для того, чтобы поглощенная доза составила  $0,06 \text{ Дж/кг}$ .

90. Рука оказалась загрязненной радионуклидом, испускающим  $\beta$ -частицы и  $\gamma$ -кванты с энергией  $E_{\beta, \text{max}} = E_{\gamma} = 500 \text{ кэВ}$  (выход на распад  $p_{\beta}=0,3$  и  $p_{\gamma}=0,9$ ). От какого типа излучения доза на руку будет больше и во сколько раз? Массовый коэффициент истинного поглощения фотонов принять равным  $0,033 \text{ см}^2/\text{г}$ .

91. Мощность поглощенной дозы фотонного излучения с энергией 2 МэВ в воздухе (условия электронного равновесия) равняется  $15 \text{ мкГр/ч}$ . Определите мощность эквивалентной дозы.

92. Установлено, что поглощенные дозы, полученные исследователем в течение года, составляют: 1)  $10 \text{ мкГр}$  от внешних  $\gamma$ -источников, 2)  $0,003 \text{ Гр}$  от внешних источников  $\beta$ -излучения, 3)  $0,002 \text{ Гр}$  от внутреннего  $\beta$ -излучения ( $\text{T}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{204}\text{Tl}$ ). Превышает ли доза предельно допустимую величину?

93. Имеется два источника:  $^{22}\text{Na}$  (активность  $1 \text{ ГБк}$ ) и  $^{203}\text{Hg}$  (активность  $8 \text{ ГБк}$ ). Какой из них при одинаковых условиях измерения создает большую мощность воздушной кермы? Ответ подтвердите расчетами.

94. С помощью сцинтилляционного детектора, имеющего рабочую поверхность  $5 \text{ см}^2$ , была измерена скорость счета фотонного излучения на некотором расстоянии от препарата, содержащего  $^{170}\text{Tm}$ . За вычетом фона скорость счета оказалась равной  $54000 \text{ имп/мин}$ . Рассчитайте мощность дозы в окрестности детектора, если его эффективность к  $\gamma$ -излучению  $^{170}\text{Tm}$  составляет  $90\%$ .

95. Рассчитайте мощность поглощенной дозы в воздухе на расстоянии 50 см от точечного изотропного источника  $^{65}\text{Zn}$  активностью 300 МБк. Считать, что испускаемые при распаде ядра позитроны аннигилируют в материале источника.

96. На расстоянии 50 см от точечного изотропного источника  $^{60}\text{Co}$  мощность поглощенной дозы в воздухе, обусловленная  $\gamma$ -излучением, равняется  $3,6 \cdot 10^{-8}$  Гр/с. На каком расстоянии от источника можно работать, чтобы доза облучения персонала не превышала предельно допустимой величины при условии равномерного распределения дозы по году?
97. Определите активность точечного изотропного источника  $^{57}\text{Co}$ , создающего на расстоянии 10 см в биологической ткани мощность дозы 12 мкЗв/ч.
98. Определите наименьшее расстояние от источника  $^{51}\text{Cr}$  активностью 400 МБк, на котором можно находиться без защитного экрана в течение 1 ч, если величина полученной дозы не должна превышать 12 мкЗв.
99. На рабочем месте (кювета площадью  $3000 \text{ см}^2$ ) разлит содержащий  $^{204}\text{Tl}$  раствор. Для определения нефиксируемой загрязненности взяты 5 «мазков», каждый с площади  $100 \text{ см}^2$ . Было проведено несколько измерений каждой пробы и получены следующие значения скорости счета (в имп/с; за вычетом фона):  $\bar{I}_1=1200$ ,  $\bar{I}_2=1500$ ,  $\bar{I}_3=950$ ,  $\bar{I}_4=1400$ ,  $\bar{I}_5=1050$ . Толщина окна радиометра равна  $20 \text{ мг/см}^2$ , геометрический коэффициент  $\eta = 0,4$ . Оцените нефиксированную активность  $^{204}\text{Tl}$  на рабочем месте.
100. Халат был загрязнен радионуклидом  $^{131}\text{I}$  на площади  $3 \text{ см}^2$ . Скорость счета пятна (за вычетом фона), зарегистрированная радиометром - детектором  $\beta$ -частиц, составила 160 имп/с. Коэффициент регистрации радиометра 0,2. Превышает ли загрязнение предельно допустимое? Ответ подтвердите расчетами.
101. С помощью прибора с блоком для измерения  $\beta$ -излучения площадью  $150 \text{ см}^2$  была зарегистрирована скорость счета кюветы, равномерно загрязненной  $^{89}\text{Sr}$ , равная 45000 имп/мин. Коэффициент регистрации прибора  $\phi = 0,3$ . Превышает ли загрязнение предельно допустимую величину? Ответ подтвердите расчетами.
102. Установлено, что активность капли раствора  $^{90}\text{Sr}(^{90}\text{Y})$ , попавшей на кожу, составляет 10 Бк, площадь загрязнения  $2 \text{ см}^2$ . Во сколько раз загрязнение превышает предельно допустимое?

#### Раздел IV. ИЗОТОПНЫЙ ОБМЕН

1. Смешали содержащие  $^{203}\text{Hg}$  спиртовые растворы  $\text{C}_2\text{H}_5\text{HgBr}$  (50 мл, концентрация 0,01 моль/л) и  $\text{HgBr}_2$  (50 мл,  $C = 0,02$  моль/л). Исходные объемные активности растворов равны 200 и 400 Бк/мл, соответственно. Определите отношение активностей  $\text{C}_2\text{H}_5\text{HgBr}$  и  $\text{HgBr}_2$  при достижении равнораспределения  $^{203}\text{Hg}$ .
2. К 20 мл 0,02 моль/л раствора  $\text{Tl}_2(\text{SO}_4)_3$  в 2 моль/л  $\text{HClO}_4$  прилили 20 мл 0,1 моль/л раствора  $\text{TlClO}_4$ , содержащего  $^{204}\text{Tl}$ , в 2 моль/л  $\text{HClO}_4$  с удельной активностью 7 кБк/мл. Определите объемную активность  $\text{Tl}^+$  и  $\text{Tl}^{3+}$  при равнораспределении  $^{204}\text{Tl}$  в полученном растворе.
3. В делительной воронке перемешивают 50 мл 0,03 моль/л раствора 1,3-диодпропана в бензоле и 50 мл 0,04 моль/л раствора  $\text{Na}^{131}\text{I}$  в воде с объемной активностью 500 Бк/мл. Через 2 часа объемная активность  $\text{C}_3\text{H}_6\text{I}_2$  стала равна 150 Бк/мл. Определите степень изотопного обмена.
4. При перемешивании водного раствора  $\text{Sr}^{82}\text{Br}_2$  (без носителя) и 0,1 моль/л раствора  $\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$  в бензоле в течение 9 ч активность водной фазы уменьшилась с 3000 до 500 Бк. Найдите степень изотопного обмена. Период полураспада  $^{82}\text{Br}$  равен 36 ч.
5. Реактор объемом 50 мл, в котором хранился карбонат бария, меченный  $^{14}\text{C}$ , массой 296 мг, заполнили углекислым газом ( $24^\circ\text{C}$ , 99 кПа), герметично закрыли и выдержали несколько часов при  $100^\circ\text{C}$ . Определите степень изотопного обмена, если установлено, что за время нагревания удельная активность  $\text{Ba}^{14}\text{CO}_3$  уменьшилась в 1,25 раза.
6. В 25 мл 0,05 моль/л раствора  $\text{SrCl}_2$  внесли 5 мл раствора  $^{89}\text{SrCl}_2$  (без носителя) с удельной активностью  $10^5$  Бк/мл и 880 мг  $\text{SrC}_2\text{O}_4$ . Осадок, после длительного перемешивания суспензии, отделили. Удельная активность раствора оказалась равной 4680 Бк/мл. Определите степень изотопного обмена.
7. В делительной воронке перемешивают 25 мл 0,01 моль/л раствора 1,3-дибромпропана в бензоле и 25 мл 0,02 моль/л раствора  $\text{Na}^{82}\text{Br}$  в воде с объемной активностью 500 Бк/мл. Через 1 ч объемная радиоактивность органической фазы достигла значения 75 Бк/мл. Определите степень изотопного обмена. Распадом  $^{82}\text{Br}$  за время проведения эксперимента пренебречь.
8. В 10 мл 0,01 моль/л сернокислого раствора сульфата таллия(I) внесли 10 мл 0,01 моль/л раствора сульфата таллия(III), содержащего 20 кБк  $^{204}\text{Tl}^{3+}$ .

Через 4 ч провели осаждение  $Tl^+$  в виде  $Tl_2CrO_4$ . Рассчитайте активность полученного осадка, предполагая, что за это время степень изотопного обмена достигла значения 0,98.

9. Какой минимальный объем раствора  $Na^{131}I$  (без носителя) с удельной активностью 800 Бк/мл необходимо взять, чтобы с помощью изотопного обмена получить 0,1 моль меченого иодом-131 алкилиодида с удельной активностью 4 кБк/моль?

10. Для введения метки в 2-иодбутан используется изотопный обмен  $^{131}I$  между  $C_4H_9I$  и  $Na^{131}I$ . С какой максимальной удельной активностью (МБк/моль) можно получить 2-иодбутан, если взять для его получения 1 мл 0,01 моль/л спиртового раствора  $C_4H_9I$  и а) 1 мл спиртового раствора  $Na^{131}I$  (без носителя) активностью 1 МБк/мл, б) 1 мл 0,01 моль/л спиртового раствора  $Na^{131}I$  активностью 1 МБк/мл?

11. Используя изотопный обмен, необходимо получить 12 мл  $C_2H_5I$ , меченого  $^{131}I$ , с удельной активностью 10 кБк/мл. Какой минимальный объем водного 0,1 моль/л раствора  $Na^{131}I$  ( $A_{уд} = 10$  кБк/мл) необходимо взять для получения  $C_2H_5I(^{131}I)$ ? Плотность иодэтана равна 1,94 г/мл.

12. Какой минимальный объем раствора  $Ca^{131}I_2$  (без носителя, удельная активность 200 Бк/мл) необходимо взять, чтобы, используя изотопный обмен, получить 0,1 моль  $C_2H_5I$ , меченого  $^{131}I$ , с удельной активностью 5000 Бк/моль?

13. Какой минимальный объем раствора  $Na^{131}I$  (без носителя) с объемной активностью 1 кБк/мл необходимо взять, чтобы, используя изотопный обмен, получить 0,015 моль иодпропана с удельной активностью 60 кБк/моль?

14. Какой объем 0,01 моль/л раствора  $Na^{131}I$  с удельной активностью  $10^5$  Бк/моль необходимо взять, чтобы при достижении степени изотопного обмена  $F = 0,9$  получить 0,01 моль  $C_2H_5I$  с удельной активностью 6000 Бк/моль.

15. Для изучения изотопного обмена иода между 1-иодпропаном и иодидом натрия смешали по 25 мл 0,2 моль/л спиртовых растворов  $C_3H_7I$  и  $NaI$ , содержащего  $^{131}I$ . Начальная объемная активность раствора соли составляла 14,8 кБк/мл. Через определенные промежутки времени  $t$  из раствора смеси веществ, находящегося в термостате при  $40^\circ C$ , отбирали пробы объемом 1 мл, из которых экстрагировали меченный  $^{131}I$  иодалкан в 5 мл бензола. Затем определяли активность ( $A_{экс}$ ) 1 мл экстракта. Эксперимент повторили дважды, используя в качестве исходных 0,05 и 0,1 моль/л растворы  $C_3H_7I$  и

NaI(<sup>131</sup>I). По приведенным в таблице результатам измерений  $A_{\text{экс}}$ , которые проводились в идентичных условиях, определите период полураспада и константу скорости реакции изотопного обмена.

n	t, мин.	$A_{\text{экс.}}, \text{Бк}$		
		$a + v = 0,2$ моль/л	$a + v = 0,1$ моль/л	$a + v = 0,05$ моль/л
1	30	160	88	44
2	50	249	135	70
3	70	325	186	101
4	90	384	225	124
5	120	463	287	162
6	140	505	331	182
7	160	538	356	207
8	180	572	388	230

$a$  и  $v$  – молярные концентрации  $\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$  и  $\text{NaI}^{(131)\text{I}}$ , соответственно

16. Для получения препарата  $\text{R}^{82}\text{Br}$  использовали 10 мл 0,1 моль/л раствора  $\text{R}^{82}\text{Br}$  и 10 мл 0,05 моль/л раствора бромида натрия, меченного бромом-82, с объемной активностью 1 МБк/мл. Определите удельную активность (МБк/моль) препарата  $\text{R}^{82}\text{Br}$  через 5 ч после начала изотопного обмена, если константа скорости этой реакции в условиях проведения эксперимента равна  $6,82 \cdot 10^{-4} \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . Постоянная распада  $^{82}\text{Br}$   $\lambda = 5,304 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ .

17. В 40 мл 0,1 моль/л раствора  $\text{CH}_3\text{I}$  в метаноле внесли 10 мл 0,2 моль/л раствора  $\text{NaI}^{(131)\text{I}}$  с удельной активностью 1 кБк/мл. Через какое время удельная активность  $\text{CH}_3\text{I}$  достигнет значения 1,25 МБк/моль, если известно, что константа скорости реакции изотопного обмена в данном случае равна  $8,02 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ .

18. Для изучения изотопного обмена  $^{131}\text{I}$  смешали 2 мл 2 моль/л раствора  $\text{NaI}$  в спирте, содержащего  $^{131}\text{I}$ , с удельной скоростью счета 1100 имп/(мин·мл) и 30 мл 0,2 моль/л спиртового раствора иодэтана. Установлено, что через 3 ч после начала обмена скорость счета  $\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$  составила 600 имп/мин. Через какое время скорость счета иодэтана достигнет значения 900 имп/мин?

19. Определите константу скорости реакции изотопного обмена  $^{131}\text{I}$  между  $\text{C}_2\text{H}_5\text{I}$  и  $\text{NaI}^{(131)\text{I}}$  в спирте при 26°C, если скорость счета раствора соли в начальный момент равнялась 3400 имп/(мин·мл), а через 5 ч уменьшилась до 2550 имп/(мин·мл). Концентрации веществ одинаковы и равны 0,1 моль/л. Кинетическое уравнение реакции имеет второй порядок.

20. К 20 мл 0,04 моль/л спиртового раствора  $\text{C}_2\text{H}_5\text{HgBr}$  добавили равный объем 0,02 моль/л раствора  $\text{BaBr}_2$ , содержащего  $^{82}\text{Br}$ , с начальной удельной

активностью 1 кБк/мл. Полученный раствор выдержали при 60С° в течение 40 мин. Определить активность бромида этилртути, если известно, константа скорости этой реакции при 60С° равна  $4,6 \cdot 10^{-3}$  л·моль<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>. Распадом <sup>82</sup>Вг за время эксперимента пренебречь.

21. В делительной воронке перемешивают 200 мл 0,2 моль/л раствора 1,2-дибромэтана в бензоле и 200 мл 0,1 моль/л водного раствора КВг, меченного <sup>82</sup>Вг, с объемной активностью 1 кБк/мл. Определите объемную активность раствора алкилбромида через 6 ч после начала обмена. Константа скорости изотопного обмена в данных условиях равна  $3 \cdot 10^{-4}$  л·моль<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>. Период полураспада <sup>82</sup>Вг составляет 36 ч.

22. Определите константу скорости реакции изотопного обмена <sup>131</sup>И между С<sub>2</sub>Н<sub>5</sub>И и СаИ<sub>2</sub> в этаноле при 35°С, если скорость счета иодида кальция в начальный момент равнялась 1200 имп/(мин·мл), через 2 ч она уменьшилась до 1060 имп/(мин·мл), еще через 2 ч – до 970 имп/(мин·мл). Концентрации обменивающихся веществ одинаковы и равны 0,05 моль/л; кинетическое уравнение реакции имеет второй порядок.

23. Для определения кинетических характеристик реакции изотопного обмена <sup>131</sup>И между 1-йодпропаном и йодидом натрия к 40 мл 0,2 моль/л холодного спиртового раствора С<sub>3</sub>Н<sub>7</sub>И добавили 10 мл 0,2 моль/л радиоактивного раствора NaI, скорость счета которого составляла 45000 имп/(мин·мл). Затем быстро внесли по 5 мл приготовленного раствора в 6 пробирок, находящихся в термостате при 30°С. Через 30 мин в первую из них добавили 10 мл бензола и 10 мл воды, органический слой отделили и измерили скорость счета 1 мл экстракта ( $I_{уд.,орг}$ ), содержащего С<sub>3</sub>Н<sub>7</sub><sup>131</sup>И. Экстракция С<sub>3</sub>Н<sub>7</sub>И и измерение скорости счета 1 мл экстракта в пробирках 2-6 были проведены через 60, 120, 150, 210 и 240 мин после начала опыта, соответственно. По приведенным в табл. результатам измерений  $I_{уд.,орг}$  определите константу скорости этой реакции 2-ого порядка.

$t$ , мин	30	60	120	150	210	240
$I_{уд. орг}$ , имп/(мин·мл)	314	600	1100	1320	1690	1870

24. Эксперименты, описанные в задаче 23, повторили при температурах 40 и 50°С. Были получены следующие значения удельной скорости счета органической фазы:

$t$ , мин	30	60	120	150	210
$I_{уд. орг}$ , имп/(мин·мл)	303 К	314	600	1100	1690
	313 К	781	1390	2248	2950
	323 К	1680	2580	3310	3440

Определите энергию активации реакции изотопного обмена  $^{131}\text{I}$  между 1-йодпропаном и иодидом натрия.

25. В трех пробирках смешали равные объемы 0,3 моль/л раствора AX и 0,1 моль/л раствора BX(X\*). В начальный момент радионуклид X\* находился в растворе BX, скорость счета которого в каждой пробирке составляла по 2000 имп/мин. Пробирки выдержали в термостате при 55°C в течение 1, 2 и 3 ч. За это время скорость счета BX\* уменьшилась в пробирках 1, 2 и 3 до 1130, 770 и 620 имп/мин, соответственно. Определить константу скорости реакции гомогенного изотопного обмена, предполагая, что её кинетическое уравнение имеет второй порядок.

26. В растворах происходит быстрый изотопный обмен  $^{59}\text{Fe}$  между ионами  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  за счет переноса электронов:  $^{59}\text{FeCl}_2 + \text{FeCl}_3 \leftrightarrow \text{FeCl}_2 + ^{59}\text{FeCl}_3$ . Для определения некоторых кинетических характеристик этого процесса было проведено три эксперимента. К 20 мл солянокислого 0,0001 моль/л раствора  $\text{FeCl}_2$ , содержащего  $^{59}\text{Fe}$  общей активностью 10 кБк, прилили 10 мл 0,0002 моль/л раствора  $\text{FeCl}_3$ . Спустя 3 мин в первой пробирке провели разделение участвующих в обмене соединений путем экстрагирования хлорида железа(III) в 5 мл изопропанола и измерили удельную активность ( $A_{\text{уд}}$ ) органической фазы. Аналогичные измерения удельной активности экстрагента во второй и третьей пробирках провели через 10 и 15 мин (таблица). Определите период полуобмена реакции изотопного обмена.

$t$ , мин	3	10	15
$A_{\text{уд}}$ , Бк/мл	410	818	926

27. Период полуобмена реакции  $\text{XA} + \text{YA}^* \leftrightarrow \text{XA}^* + \text{YA}$  при 293, 310 и 323 К составляет 490, 115 и 42 мин, соответственно. Определите энергию активации процесса изотопного обмена в указанном диапазоне температур.

28. К 40 мл 0,04 моль/л раствора  $\text{SnCl}_4$  в 10 моль/л соляной кислоте, находящегося в термостате при 20°C, добавили 10 мл 0,09 моль/л солянокислого раствора  $\text{SnCl}_2$ , содержащего радионуклид  $^{113}\text{Sn}$ , с удельной скоростью счета 15000 имп/(мин·мл). Спустя некоторое время  $t$  отбирали по 5 мл раствора смеси веществ, разделяли участвующие в обмене соединения и определяли удельную скорость счета хлорида олова(IV) в анализируемой пробе  $I_{t,\text{Sn(IV)}}$ . Опыт повторили при 35°C. По приведенным в таблице данным определите периоды полуобмена реакции изотопного обмена и оцените её энергию активации.

$t$ , мин		3	6	12	15
$I_{t,\text{Sn(IV)}}$ , имп/(мин·мл)	20°C	269	490	864	1005
	35°C	580	982	1458	1609

29. К 50 мл 0,05 моль/л раствора сульфата хрома(II), находящегося в термостате при 22°C, прибавили равный объем 0,05 моль/л раствора перхлората хрома(III) в хлорной кислоте, содержащий  $^{51}\text{Cr}$ . Через 0, 1, 3, 6 и 10 ч отбирали по 5 мл раствора смеси веществ, экстрагировали соединение хрома(III) и определяли его удельную регистрируемую активность (таблица). Определить период полуобмена реакции. Результаты измерения  $I_{t,\text{Cr(III)}}$  приведены к одному времени.

$t, \text{ч}$	0	1	3	6	10
$I_{t,\text{Cr(III)}}, \text{имп/мин}\cdot\text{мл}$	2000	1953	1831	1718	1550

30. Период полуобмена  $^{131}\text{I}$  между 2-йодбутаном и йодидом калия в спиртовом растворе при 298 К равен 770 мин. Определите период полуобмена этой реакции при 330 К, если известно, что энергия активация данной реакции 2-ого порядка в указанном температурном интервале составляет 80 кДж/моль и значение предэкспоненциального множителя в уравнении Аррениуса не меняется.

31. Константа скорости реакции обмена  $^{82}\text{Br}$  между бромэтаном и бромидом натрия в спиртовом растворе при 30°C равна  $2,4 \cdot 10^{-4} \text{ л}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ . Определите константу скорости реакции при 55°C, если известно, что энергия активация данной реакции в указанном температурном интервале составляет 75 кДж/моль и значение предэкспоненциального множителя в уравнении Аррениуса не меняется.

32. Проведено изучение изотопного обмена  $^{131}\text{I}$  между изо- $\text{C}_3\text{H}_7\text{I}$  и  $\text{Na}^{131}\text{I}$  в 90%-ном этанольном растворе при концентрации каждого вещества 0,1 моль/л и при температурах 40, 60 и 80°C. Периоды полуобмена  $\tau_{1/2}$  оказались равны  $6,27 \cdot 10^4$ ,  $6,88 \cdot 10^3$  и  $1,67 \cdot 10^3$  с, соответственно. Вычислите энергию активации процесса.

33. Установлено, что период полуобмена  $^{204}\text{Tl}$  между  $\text{TlCl}$  и  $\text{TlCl}_3$  в соляной кислоте (1,5 моль/л) уменьшается в 3,46 раза при повышении температуры от 20 до 35°C. Оцените энергию активации процесса.

34. При повышении температуры от 25°C до 37°C период полуобмена реакции изотопного обмена первого порядка уменьшается в 3,8 раза. Оцените энергию активации этой реакции.

35. Период полуобмена реакции изотопного обмена при 298 К равен 15,4 ч. Определите период полуобмена при 323 К, если в указанном диапазоне температур энергия активации реакции равна 45440 Дж/моль.

36. Константы скорости реакции  $XA + YA^* \leftrightarrow XA^* + YA$  при 25 и 50°C равны  $1,30 \cdot 10^{-4}$  и  $1,16 \cdot 10^{-3}$  л/(моль·с), соответственно. Вычислите константу скорости при 36°C.

37. С какой максимальной удельной активностью (МБк/моль) можно приготовить  $C_2H_5^{131}I$  с помощью изотопного обмена, если для его проведения использовать 10 мл 0,01 моль/л спиртового раствор  $C_2H_5I$  и 2 мл раствора  $Na^{131}I$  без носителя с удельной активностью 20 МБк/мл?

38. Сколько миллилитров водного раствора  $Na^{131}I$  без носителя с удельной активностью 10 МБк/мл необходимо внести в 50 мл 0,01 моль/л спиртового раствора  $C_3H_7I$ , чтобы путем изотопного обмена приготовить иодпропан с  $A_{уд.} = 200$  МБк /моль?

39. 6,72 л (н.у.) дейтерия  $D_2$  ввели в реакцию с 3,36 л хлора. Продукт реакции растворили в 90 мл воды. Далее в раствор добавили 1,12 г магния. Каково молярное отношение протия и дейтерия в выделившемся газе?

40. К 30 мл насыщенного при 25°C раствора сульфата калия, содержащего 10 г кристаллов  $K_2SO_4$ , добавили 0,1 мл насыщенного раствора этой соли, содержащего радионуклид  $^{35}S$  с активностью 120 кБк. Суспензию перемешивали 12 ч при той же температуре. Активность 1 мл раствора, полученного после полного отделения твердых частиц центрифугированием, оказалась равна 146 Бк. Наступило ли равнораспределение серы-35 между раствором и кристаллами? Растворимость  $K_2SO_4$  при 25°C равна 12,05 г на 100 г воды, плотность насыщенного при 25°C раствора 1,08 г/мл. Ответ подтвердите расчетами.

41. Смешали 50 мл 0,05 моль/л спиртового раствора  $C_3H_7Br$ , меченного  $^{82}Br$ , с объемной активностью 500 Бк/мл, и 20 мл 0,02 моль/л спиртового раствора  $CaBr_2$ , также меченного  $^{82}Br$ , с объемной активностью 250 Бк/мл. Смесь 36 ч выдерживали при температуре 40°C, пока не наступило равнораспределение  $^{82}Br$ . Какова удельная активность (МБк/моль) полученного  $C_3H_7^{82}Br$ ? Постоянная распада  $^{82}Br$   $\lambda = 5,304 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ .

42. Ампулу объемом 20 см<sup>3</sup>, в которой находился нерадиоактивный образец  $BaCO_3$  массой 0,58 г, заполнили  $CO_2$  (давление 122 кПа, температура 20°C). Углекислый газ содержал метку углерод-14; объемная радиоактивность газа составляла 8 кБк/см<sup>3</sup>. Ампулу запаляли и 100 ч выдерживали при 400°C, а затем охладили до исходной температуры. Радиоактивность  $CO_2$  составила 7,5 кБк/см<sup>3</sup>. Рассчитайте степень обмена и найдите удельную радиоактивность (Бк/см<sup>3</sup>)  $CO_2$  при равнораспределении углерода-14 в системе.

43. Изучен изотопный обмен атомами брома-82 в растворе между  $\text{CH}_3\text{CHBrCOOH}$  и  $\text{LiBr}$  при  $22^\circ\text{C}$  и при концентрации каждого из веществ, равной  $0,333$  моль/л. Исходная радиоактивность содержалась в  $\text{LiBr}$ , причем объемная активность исходного  $0,333$  моль/л раствора составляла  $8900$  Бк/мл. Результаты измерений объемной активности раствора ( $I_t$ )  $\text{CH}_3\text{CH}^{82}\text{BrCOOH}$ , проведенных по истечении времени  $t$  с момента начала обмена, следующие:

$t$ , мин	10	25	40	50	60	70	90	100
$I_t$ , Бк/мл	748	1953	2416	2799	3168	3333	3693	3849

Значения объемной активности растворов  $\text{CH}_3\text{CH}^{82}\text{BrCOOH}$  (с учетом фона) приведены к моменту времени, в который измеряли исходную объемную активность растворов  $\text{Li}^{82}\text{Br}$ . Определите период полуобмена  $\tau_{1/2}$  и константу скорости реакции изотопного обмена второго порядка.

## Раздел V. МЕЖФАЗНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ

### Адсорбция и сокристаллизация

1. В 50 мл разбавленной соляной кислоты растворили  $8 \cdot 10^{-7}$  моль гидроксида циркония, меченного  $^{95}\text{Zr}$ , с активностью 12,5 ГБк. Предполагается, что адсорбированные ионы, содержащие один атом циркония, могут покрыть монослоем  $25 \text{ см}^2$  поверхности стекла, а занимаемая ионом площадь равна  $2,5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ . Как может измениться удельная активность раствора за счет молекулярной адсорбции?

2. В стеклянный стакан поместили 100 мл раствора оксалата циркония-95 без носителя активностью 100 МБк. Площадь поверхности стенок стакана, с которыми контактирует раствор, равна  $80 \text{ см}^2$ , а площадь, которую занимает на поверхности стекла одна гидратированная частица  $^{95}\text{Zr}$ , -  $2,5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ . Площадь внутренней поверхности стакана, на которой могут адсорбироваться ионы циркония-95, составляет примерно 80% геометрической поверхности внутренних стенок стакана, контактирующих с раствором. Какая доля радиоактивных атомов цирконий-95 окажется адсорбированной на поверхности стекла после установления адсорбционного равновесия?

3. За счет адсорбции на стенках ампулы активность раствора  $\text{XY}^*$  (без носителя) уменьшилась с 600 до 250 МБк. Какое минимальное количество носителя  $\text{XY}$  необходимо внести в раствор, чтобы уменьшить адсорбционные потери  $\text{XY}^*$  до 1%. Период полураспада  $\text{Y}^*$  равен 192,541 ч.

4. Определить, какая активность  $^{95}\text{Zr}$  ( $\lambda = 1,25 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ ) может быть адсорбирована силикагелем с удельной поверхностью  $80 \text{ м}^2/\text{г}$ , если мономолекулярный слой адсорбированных ионов занимает 40% поверхности, а площадь иона, содержащего один атом циркония на поверхности адсорбента, равна приблизительно  $5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ .

5. В 50 мл  $10^{-7}$  моль/л раствора  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$  внесли 1 мл раствора  $^{89}\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$  (без носителя) с удельной активностью 47,7 МБк/мл. Определите активность раствора после мономолекулярной адсорбции на стекле площадью  $10 \text{ см}^2$ . Площадь, занимаемую гидратированным ионом, принять равной  $5 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$ .

6. 15 мл раствора  $\text{XY}^*$  (без носителя, период полураспада  $\text{Y}^* = 2,2$  года) с активностью 120 МБк поместили в стеклянную ампулу. За счет молекулярной адсорбции активность уменьшилась до 100 МБк. Определите какой будет активность раствора, если в раствор без носителя предварительно внести 0,5 мл  $10^{-4}$  моль/л раствора соли  $\text{XY}$ .

7. Оцените активность  $^{57}\text{Co}$  ( $T_{1/2} = 250$  дней), который может быть адсорбирован 1 г адсорбента с удельной поверхностью  $2 \text{ м}^2/\text{г}$ . Предполагается, что ионы кобальта могут покрыть монослоем 25% поверхности адсорбента, а занимаемая ионом площадь равна  $\sim 5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ .

8. 100 мл раствора, содержащего радионуклид  $A^*$  ( $\lambda_{A^*} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ ) без носителя, с удельной активностью 10 МБк/мл поместили в стеклянный стакан. Предполагается, что молекулы  $A^*B$  за счет молекулярной адсорбции могут покрыть монослоем всю поверхность соприкосновения раствора со стеклом ( $100 \text{ см}^2$ ). Как изменится удельная активность раствора, если площадь, занимаемая молекулой  $AB$ , равна  $10^{-14} \text{ см}^2$ ?

9. В 15 мл насыщенного при  $25^\circ\text{C}$  водного раствора хлорида калия внесли 1,45 г высокодисперсных кристаллов  $\text{KCl}$  и добавили 0,015 г хлорида рубидия, меченного рубидием-86. В водном растворе при этой температуре коэффициент сокристаллизации  $D$  (отношение количества рубидия-86 в 1 г осадка к его количеству в 1 г соли в растворе)  $\text{RbCl}$  с кристаллами  $\text{KCl}$  равен 0,12. Внесенная в раствор активность  $^{86}\text{Rb}$  составила 8 МБк. Термодинамически равновесное распределение  $\text{RbCl}$  в системе установилось после многократной перекристаллизации кристаллов  $\text{KCl}$  в насыщенном растворе (при  $25^\circ\text{C}$  в течение 4 суток). Какой стала при этом общая радиоактивность твердой фазы? 1 мл насыщенного при  $25^\circ\text{C}$  раствора  $\text{KCl}$  содержит 0,29 г соли.

10. В 100 мл насыщенного при  $25^\circ\text{C}$  водного раствора хлорида калия, который содержал 30 МБк радионуклида рубидий-86 без носителя, ввели 5 г высокодисперсного хлорида калия. Какова удельная активность твердой фазы после установления в системе термодинамического равновесия, если коэффициент сокристаллизации  $D$  равен 0,1, а 1 мл насыщенного при  $25^\circ\text{C}$  раствора хлорида калия содержит 0,29 г соли.

11. В 50 мл водного раствора  $^{133}\text{BaCl}_2$  без носителя объемной активностью 10 МБк/мл внесли препарат мелкокристаллического стабилизированного (неспособного к перекристаллизации) сульфата бария массой 1,2 г. Рассчитайте, на сколько процентов понизится объемная активность раствора за счет первичной адсорбции ионов  $^{133}\text{Ba}^{2+}$  на поверхности частиц  $\text{BaSO}_4$ , если средний диаметр частиц сульфата бария 5 мкм, плотность  $4,5 \text{ г}/\text{см}^3$ , а площадь на поверхности этих частиц, приходящаяся на одну формульную единицу  $\text{BaSO}_4$ , равна  $2,5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ . При расчете примите, что дополнительного растворения сульфата бария не происходит, а равновесие при первичной адсорбции устанавливается довольно быстро.

12. В 50 мл насыщенного при  $25^\circ\text{C}$  раствора  $\text{PbI}_2$ , меченного иодом-131, внесли 2,5 г мелкокристаллического стабилизированного осадка  $\text{PbI}_2$ .

Рассчитайте, во сколько раз понизится объемная активность исходного раствора за счет первичной адсорбции иода-131 на кристаллах осадка, если принять, что частицы осадка шарообразны, средний диаметр частиц  $\text{PbI}_2$  6 мкм, плотность  $6,16 \text{ г/см}^3$ , растворимость в воде при  $25^\circ\text{C}$   $1,6 \text{ ммоль/л}$ , а площадь, занимаемая одной формульной единицей  $\text{PbI}_2$  на поверхности, равна  $2,5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ .

13. В 100 мл насыщенного при  $30^\circ\text{C}$  раствора  $^{45}\text{CaSO}_4$  с удельной активностью 1 МБк/мл внесли 0,9 г стабилизированного мелкодисперсного осадка  $\text{BaSO}_4$ . Рассчитайте, какова будет объемная удельная активность раствора после установления адсорбционного обменного равновесия и достижения равновесной растворимости  $\text{BaSO}_4$ . При расчетах принять, что исходные частицы  $\text{BaSO}_4$  шарообразны и их диаметр 2 мкм, растворимость  $\text{CaSO}_4$  при  $30^\circ\text{C}$   $0,209 \text{ г/100 мл}$  воды, а растворимость  $\text{BaSO}_4$  в 100 мл насыщенного раствора  $\text{CaSO}_4$   $1,7 \cdot 10^{-9} \text{ г}$ . Плотность  $\text{BaSO}_4$   $4,5 \text{ г/см}^3$ . Коэффициент  $D$ , характеризующий переход  $\text{CaSO}_4$  на поверхность кристаллов  $\text{BaSO}_4$ , равен 0,1. Площадь, занимаемую на поверхности  $\text{BaSO}_4$  одной формульной единицей  $\text{BaSO}_4$  ( $\text{CaSO}_4$ ), примите равной  $1,8 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ . Принять, что растворение частиц  $\text{BaSO}_4$  происходит равномерно по всей их поверхности.

14. Какова активность (МБк) ниобия-95 без носителя может максимально адсорбироваться на  $1 \text{ см}^2$  поверхности стекла при мономолекулярной адсорбции, если площадь иона, содержащего один атом ниобия-95 на поверхности стекла, равна  $8 \cdot 10^{-15} \text{ см}^3$ ?

15. Во сколько раз понизится объемная активность нейтрального раствора церия-144 в результате адсорбции, если 100 мл раствора церия-144 без носителя с объемной активностью 20 МБк/мл приведены в соприкосновение с поверхностью стекла площадью  $45 \text{ см}^2$ ? В результате мономолекулярной адсорбции стекло будет покрыто гидратированными ионами  $^{144}\text{Ce}^{3+}$ , причем площадь, занимаемая ионом, содержащим один атом церия-144, равна  $9 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ .

16. Для некоторой системы микрокомпонент – макрокомпонент –  $\text{H}_2\text{O}$  значения коэффициентов сокристаллизации  $D = \lambda = 4$ . Проведены две независимые кристаллизации макрокомпонента из равных объемов его насыщенного раствора, содержавшего равные исходные количества микрокомпонента. Количество макрокомпонента, перешедшее в осадок, в обоих случаях оказалось одинаковым (равно  $\frac{1}{2}$  от первоначально имевшегося в растворе). В первом случае микрокомпонент оказался распределенным по объему макрокомпонента гомогенно (термодинамически равновесное распределение по Хлопину), во втором – в

соответствии с логарифмическим распределением Дёрнера-Госкинса. В каком случае в осадок перейдет больше микрокомпонента и насколько?

## Экстракция

17. Необходимо извлечь  $^{131}\text{I}$  из 50 мл водного раствора в 40 мл раствора экстрагента. Как будут отличаться факторы извлечения при однократной экстракции и последовательном проведении четырех экстракций (4 порции по 10 мл), если коэффициент распределения для данного случая равен 4 и не зависит от концентрации?

18. Удельная объемная скорость счета 10 мл раствора нитрата тория в 5М азотной кислоте равнялась  $1,5 \cdot 10^3$  имп/(мин·мл). После экстракции тория в 5 мл 20% раствора ТБФ в керосине скорость счета водной фазы уменьшилась в 1,5 раза. Определить коэффициент распределения.

19. Объем водного раствора равен 20 мл, объем органической фазы – 5 мл. Во сколько раз активность органической фазы будет больше активности водной (после установления экстракционного равновесия), если известно, что для данной системы  $K_p = 10$ .

20. Определите коэффициент распределения  $^{72}\text{Ga}$  при экстракции из 5 мл 6 моль/л соляной кислоты по приведенным ниже данным. Скорость счета солянокислого раствора хлорида галлия равнялась 60 имп/с, скорость счета 0,1 мл органической фазы после установления равновесия составила 0,7 имп/с. Использовали 5 мл раствора экстрагента.

21. Ампула с 10 мл водного раствора нитрата стронция-90, предварительно очищенного от дочерних продуктов, хранилась в течение месяца. Определите отношение активностей  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Y}$  в органической фазе после экстракции 10 мл раствора 8-оксихинолина в хлороформе, если фактор обогащения иттрия по отношению к стронцию в экстракте в данном случае равен 50.

22. Определите коэффициент разделения  $^{90}\text{Y}$  и  $^{90}\text{Sr}$  при экстракции раствором 8-оксихинолина в  $\text{CHCl}_3$ , если при однократной экстракции активность водного раствора иттрия уменьшилась в 33 раза, а водного раствора стронция – на 2%. Объемы водной и органической фаз были одинаковы.

23. Определите фактор обогащения вещества А в органической фазе по отношению к веществу В при однократной экстракции, если коэффициенты распределения  $K_{p(A)}$  и  $K_{p(B)}$  равны, соответственно, 10 и 0,3. Объем водной фазы равен 25 мл, органической – 5 мл.

24. Определите коэффициент распределения радиоактивного вещества X, если удельная активность 5 мл водного раствора составляла 6000 имп/(мин·мл), а после экстракции 3 мл раствора экстрагента она уменьшилась в 3 раза.

25. Для определения степени разделения урана и тория при экстракции их диэтиловым эфиром из 1 моль/л азотной кислоты взяли по 10 мл растворов уранилнитрата и нитрата тория с удельной активностью 1 кБк/мл и 10 кБк/мл, соответственно, и по 5 мл экстрагента. После установления равновесия активности органических фаз, содержащих уран и торий, стали равны 5,3 кБк и 2 кБк, соответственно. Рассчитайте фактор обогащения урана к торью в диэтиловом эфире.

26. После установления экстракционного равновесия скорость счета органической фазы в 5 раз больше скорости счета водной. Определите  $K_p$ , если объем органической фазы в 4 раза меньше объема водной.

27. Исходная скорость счета водного раствора составляла 90 имп/с, его объем в 2 раза больше объема раствора экстрагента, коэффициент распределения  $K_{p(X)} = 10$ . Определите равновесные скорости счета вещества X в органической и водной фазах.

28. В 100 мл воды растворены вещества A\* и B\*, удельные активности которых равны 60 и 20 Бк/мл, соответственно. Для разделения веществ используют 20 мл экстрагента. Известно, что в данном случае коэффициенты распределения для A\* и B\* равны 10 и 1, соответственно. Можно ли путем однократной экстракции получить препарат вещества A\*, с удельной активностью не менее 500 Бк/мл и содержащий не более 5% примеси B\*? Ответ подтвердите расчетами.

29. Объем водного раствора соли циркония-95 равен 10 мл. Путем двукратной экстракции необходимо уменьшить активность водной фазы в 25 раз, предполагая, что в данных условиях  $K_{p(Zr)} = 10$ . Какой объем экстрагента необходимо взять?

30. Водный раствор стронция-90, предварительно очищенного от иттрия-90, хранился в течение 8 суток. Объем раствора 10 мл. Для разделения радионуклидов предполагается использовать 5 мл раствора 8-оксихинолина в хлороформе. Известно, что коэффициент распределения  $K_{p(Y)}=32$ , а фактор обогащения иттрия по отношению к стронцию в экстракте составляет 50. Можно ли при однократной экстракции добиться того, чтобы активность стронция в рафинате превышала активность иттрия в 15 раз? Ответ подтвердите расчетами.

31. В 50 мл водного раствора содержатся вещества  $X^*$  и  $Y^*$  с равными удельными активностями  $A_0$  (Бк/мл). После первой экстракции удельная активность  $X^*$  в 10 мл органической фазы составила  $2,5 A_0$ , удельная активность  $Y^*$  –  $0,5 A_0$ . Определите фактор обогащения  $Y^*$  по отношению к  $X^*$  в рафинате после проведения пяти последовательных экстракций (5 по 10 мл).
32. В 30 мл водного раствора содержится равновесная смесь  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Y}$ . Для разделения радионуклидов предполагается экстрагировать  $^{90}\text{Y}$  в 20 мл раствора 8-оксихинолина. Известно, что в данном случае коэффициент разделения иттрия от стронция в экстракте равен 1600, а фактор обогащения стронция к иттрию в рафинате - 12. Определите фактор обогащения иттрия к стронцию в экстракте.
33. Коэффициент распределения тория между 5 моль/л  $\text{HNO}_3$  и 20% раствором ТБФ в керосине равен 1. Сколько экстракций порциями по 20 мл надо провести, чтобы в рафинате объемом 100 мл осталось не более 5% тория?
34. Найдите коэффициент распределения радиоактивного вещества при экстракции по следующим данным. Объемы водной и органической фаз равны, соответственно, 8 и 3 мл. Скорость счета (за вычетом фона) 0,5 мл исходного раствора составляет 1700 имп/мин, а скорость счета 1,0 мл водного раствора после установления экстракционного равновесия - 1000 имп/мин. Определите фактор извлечения радиоактивного вещества в органическую фазу при однократной экстракции.
35. В результате экстракции радиоактивного вещества активность водной фазы уменьшилась в 3 раза. Рассчитайте коэффициент распределения радиоактивного вещества, если объемы водной и органической фаз равны 10 и 8 мл, соответственно.
36. Коэффициент распределения радиоактивного вещества при экстракции органическим растворителем равен 2,5. Экстрагирование из 5 мл водного раствора проводили двумя способами: однократно 40 мл экстрагента и четырехкратно порциями по 10 мл. Рассчитайте, какая доля радиоактивного вещества останется в водном растворе в каждом случае.
37. Проводится экстракция радиоактивного вещества из 12 мл водного раствора порциями органического экстрагента по 4 мл. Определите, сколько нужно провести последовательных экстракций, чтобы обеспечить значение фактора извлечения радиоактивного вещества, равное 98 %, если коэффициент распределения 3,6.

38. Имеются две экстракционные системы, содержащие вещества А и В. В первой системе  $K_{p(A)} = 10$ ,  $K_{p(B)} = 2$ , во второй  $K_{p(A)} = 2$ ,  $K_{p(B)} = 0,4$ . Т.о., коэффициент разделения веществ в обеих системах  $K_{p(A)}/K_{p(B)} = 5$ . Проводят 3 последовательные экстракции в каждой системе и экстракты собирают. На всех стадиях  $V_{(o)} = V_{(в)}$ . Определите фактор обогащения в каждой системе.

39. Имеются два идентичных водных раствора объемом 10 мл, содержащих вещества А и В. Коэффициент распределения А из данного раствора гексаном равен 4, а вещества В – 0,5. Из первого раствора провели 1 экстракцию веществ А и В в 40 мл гексана, а из второго – 3 последовательные экстракции в 8 мл гексана. Определить фактор обогащения А и В в двух системах.

40. При экстракции калия из 3 моль/л раствора нитрата лития 21-краун-7 коэффициент распределения равен 1,25. Рассчитайте количество последовательных экстракций для перевода в органическую фазу 98% калия.

41. Коэффициент распределения иттрия-90 из 13,6 М  $\text{HNO}_3$  100% ТБФ равен 200, а стронция-90 – 0,02. При экстракции из воды  $K_{pY} = 0,01$ . Предложите схему получения водного препарата иттрия-90 из равновесной смеси  $^{90}\text{Sr}(^{90}\text{Y})$  с выходом  $^{90}\text{Y}$  более 98 % и содержанием стронция не более  $10^{-4}$  %.

42. Радий-226, массой  $10^{-3}$  мг, растворен в 10 мл раствора пикрата лития. Радий трижды экстрагировали 5 мл ДБ-24-краун-8 в бензоле ( $K_{pRa} = 2,24$ ). Экстракты объединили. Определить молярную концентрацию и активность радия в органической и водной фракциях.

43. Определить концентрационную константу экстракции уранилнитрата ( $C = 10^{-3}$  моль/л) 100% трибутилфосфатом из 0,5 моль/л раствора  $\text{HNO}_3$ . Коэффициент распределения уранилнитрата равен 3,73; в состав экстрагируемого комплекса входят две молекулы экстрагента. Плотность раствора ТБФ 0,97 г/мл,  $V_{(o)} = V_{(в)}$

44. Определить концентрационную константу экстракции  $\text{Y}(\text{NO}_3)_3$  100% трибутилфосфатом из 13,5 моль/л раствора  $\text{HNO}_3$ . При экстракции  $\text{Y}(\text{NO}_3)_3$  образуется трисольват.  $K_{p(Y)} = 197$ ,  $C_Y = 10^{-3}$  моль/л,  $V_{(o)} = V_{(в)}$ ,  $\rho_{\text{ТБФ}} = 0,97$  г/мл.

45. Имеется система: водный раствор смеси нитрата калия ( $C_M = 0,5$  моль/л) и перманганата калия ( $C_M = 1,5 \cdot 10^{-4}$  моль/л) - раствор нитрата тетраоктиламмония в бензоле ( $C_M = 1,5 \cdot 10^{-4}$  моль/л). Для этой системы

логарифм константы обмена ( $K_{обм.}$ ) перманганат-иона с нитрат-ионом равен 4,42. Определить коэффициент распределения перманганат-иона.

46. Для системы: водный раствор смеси перрутената калия ( $C_M = 1 \cdot 10^{-5}$  моль/л) и перманганата калия ( $C_M = 1,5 \cdot 10^{-4}$  моль/л) – перманганат тетраоктиламмония в бензоле ( $C_M = 1 \cdot 10^{-3}$  моль/л) логарифм константы обмена перрутенат-иона с перманганат-ионом равен – 0,51. Определить коэффициент распределения перрутенат-иона.

47. В системе: водный раствор пертехнетата калия ( $C_M = 1 \cdot 10^{-6}$  моль/л) и нитрата калия ( $C_M = 0,5$  моль/л) – раствор нитрата тетраоктиламмония в бензоле ( $C_M = 1 \cdot 10^{-3}$  моль/л) логарифм константы обмена пертехнетат-иона с нитрат-ионом равен 3,6. Определить коэффициент распределения пертехнетат-иона.

48. Для системы: водный раствор, содержащий рутенат-ион ( $C_M = 7 \cdot 10^{-5}$  моль/л) и хлорид-ион ( $C_M = 5 \cdot 10^{-3}$  моль/л) – раствор хлорида тетраоктиламмония в бензоле ( $C_M = 1 \cdot 10^{-3}$  моль/л) логарифм константы обмена рутенат-иона с хлорид-ионом равен - 0,43. Определить коэффициент распределения рутенат-иона.

49. Определить концентрационную константу экстракции Sr (II) из раствора пикрата лития ( $C_M = 1 \cdot 10^{-2}$  моль/л) ДБ 18-краун-6 в хлороформе ( $C_M = 0,1$  моль/л);  $K_{p(Sr)} = 2,1$

50. Определить концентрационную константу экстракции Pb (II) из раствора пикрата лития ( $C_M = 1 \cdot 10^{-2}$  моль/л) модифицированным тиакраунэфиром в хлороформе ( $C_M = 2,2 \cdot 10^{-2}$  моль/л);  $K_{p(Pb)} = 5,73$ .

51. Определить концентрационную константу экстракции Pb (II) из 3 моль/л раствора азотной кислоты ДБ 18-краун-6 в дихлорэтаноле ( $C_M = 0,1$  моль/л);  $K_{p(Pb)} = 0,98$ .

52. Определить концентрационную константу экстракции Sr (II) 4-адамантилбензо-18-кран-6 в хлороформе ( $C_M = 1 \cdot 10^{-2}$  моль/л) из 3 моль/л раствора азотной кислоты.  $K_{p(Sr)} = 5,73$ .

53. Определить концентрационную константу экстракции серебра из 1 моль/л раствора азотной кислоты при экстракции модифицированным краунэфиром в хлороформе ( $C_M = 3,6 \cdot 10^{-3}$  моль/л).  $K_{p(Ag)} = 27$ .

54. Определить концентрационную константу экстракции серебра из раствора пикрата лития ( $C_M = 1 \cdot 10^{-2}$  моль/л) модифицированным

краунэфиром в хлороформе ( $C_M = 1 \cdot 10^{-2}$  моль/л). Экстракция серебра сопровождается образованием комплекса типа «сэндвич».  $K_{p(Ag)} = 140$

55. Определить концентрационную константу экстракции радия (II) из раствора пикрата лития ( $C_M = 1 \cdot 10^{-2}$  моль/л) хлороформным раствором ДБ-24-краун-8 ( $C_M = 5 \cdot 10^{-3}$  моль/л).  $K_{p(Ra)} = 0,24$ .

56. Определить концентрационную константу экстракции палладия (II) из 3 моль/л раствора азотной кислоты раствором модифицированного краунэфира в хлороформе ( $C_M = 5 \cdot 10^{-3}$  моль/л).  $K_{p(Pd)} = 2,0$ .

57. Определить концентрационную константу экстракции олова (IV) из 4 моль/л раствора иодоводородной кислоты бензолом. Олово экстрагируется по механизму «физического» распределения.  $K_{p(Sn)} = 24$ .

## Раздел VI. ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

### Предел обнаружения элемента и определение его массы в образце по излучению радионуклида.

1. Элемент М содержит 6% радионуклида  $^{144}\text{M}$  ( $\lambda = 2 \cdot 10^{-17} \text{ с}^{-1}$ ). Рассчитайте предел обнаружения элемента на счетной установке, надежно регистрирующей 10 имп/с при коэффициенте регистрации  $\phi = 0,01$ .

2. Какое минимальное количество (в граммах) а) углерода, меченного углеродом-14, б) серы, меченной серой-35 и в) брома, меченного бромом-82 можно определить радиометрическим методом, если имеются меченные указанными радионуклидами препараты с удельной активностью 1 МБк/г? Минимально надежно определяемая с помощью сцинтилляционного детектора скорость счета равна 5 имп/с. Коэффициент регистрации 0,95.

3. В распоряжении экспериментатора имеется установка, надежно регистрирующая 10 имп/мин при коэффициенте регистрации  $\phi = 0,1$ . Каков предел обнаружения элемента М по излучению его изотопа  $^{100}\text{M}$  (содержание в природной смеси 10%, постоянная распада  $\lambda = 10^{-18} \text{ мин}^{-1}$ )?

4. Можно ли радиометрически определить  $10^{-3} \%$  нуклида  $^{150}\text{X}$  ( $\lambda = 10^{-9} \text{ с}^{-1}$ ) в пробе массой 10 мг, если имеющаяся установка позволяет надежно регистрировать 120 имп/мин при коэффициенте регистрации  $\phi = 0,1$ ?

5. Надежно регистрируется 6 Бк  $^{233}\text{U}$  ( $T_{1/2} = 1,585 \cdot 10^5$  лет). Рассчитайте предел обнаружения этого радионуклида.

6. В распоряжении экспериментатора имеется установка, позволяющая надежно регистрировать 30 имп/мин (скорость счета над фоном) при коэффициенте регистрации  $\phi = 0,1$ . Найдите пределы обнаружения калия по излучению  $^{40}\text{K}$  ( $T_{1/2} = 1,3 \cdot 10^9$  лет, массовая доля в природной смеси изотопов  $\omega = 0,0118 \%$ ) и рубидия по излучению  $^{87}\text{Rb}$  ( $T_{1/2} = 4,8 \cdot 10^{10}$  лет,  $\omega = 27,8 \%$ ).

7. В распоряжении экспериментатора имеется установка, позволяющая надежно регистрировать 30 имп/мин (скорость счета над фоном) при коэффициенте регистрации  $\phi = 0,1$ . Найдите предел обнаружения индия по излучению его изотопа  $^{115}\text{In}$  ( $T_{1/2} = 4,4 \cdot 10^{14}$  лет, массовая доля в природной смеси изотопов 95,7 %).

8. В распоряжении экспериментатора имеется установка, позволяющая надежно регистрировать 30 имп/мин (скорость счета над фоном) при коэффициенте регистрации  $\phi = 0,1$ . Найдите пределы обнаружения лантана

по излучению  $^{138}\text{La}$  ( $T_{1/2}=1,3\cdot 10^{11}$  лет, доля в природной смеси изотопов  $\omega = 0,09\%$ ) и лютеция по излучению  $^{176}\text{Lu}$  ( $T_{1/2}=3,6\cdot 10^{10}$  лет,  $\omega = 2,59\%$ ).

9. Массовые доли  $^{147}\text{Sm}$  ( $T_{1/2}=1,06\cdot 10^{11}$  лет) и  $^{148}\text{Sm}$  ( $T_{1/2}=8\cdot 10^{15}$  лет) в природной смеси изотопов составляют 15 и 11,3%, соответственно. Найдите предел обнаружения самария по излучению его природных радионуклидов. Имеющаяся установка позволяет надежно регистрировать 20 имп/мин (над фоном) при коэффициенте регистрации  $\phi = 0,5$ .

10. В распоряжении экспериментатора имеется установка, надежно регистрирующая 54 имп/мин с коэффициентом регистрации 0,05. Какова должна быть удельная активность (Бк/г)  $^{22}\text{Na}:\text{NaCl}$ , чтобы с помощью этой установки обнаружить  $2\cdot 10^{-7}$  г NaCl?

11. Какой объем 0,01 моль/л раствора нитрата алюминия, меченного  $^{26}\text{Al}$ , с удельной активностью 270 МБк/моль необходимо взять, чтобы на установке с коэффициентом регистрации 0,2 зарегистрировать скорость счета 27 имп/с?

12. Определите массу калия в образце, регистрируемая активность которого 251 имп/мин. Коэффициент регистрации используемой установки  $\phi = 0,1$ .

13. Определите массу лютеция в образце, регистрируемая активность которого 300 имп/мин. В природной смеси изотопов 2,59%  $^{176}\text{Lu}$ , период полураспада  $T_{1/2}=3,6\cdot 10^{10}$  лет, коэффициент регистрации установки  $\phi = 0,1$ .

14. Определить массу калия в смеси хлоридов калия и натрия, если регистрируемая активность (за вычетом фона) образца равна 4 имп/с; коэффициент регистрации излучения  $^{40}\text{K}$   $\phi = 0,05$ .

15. Определить массовую долю самария в смеси оксидов  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  и  $\text{Eu}_2\text{O}_3$ . Скорость счета (за вычетом фона) образца массой 0,2 г равна 30 имп/мин; коэффициент регистрации излучения  $^{147}\text{Sm}$   $\phi = 0,1$ . Массовая доля  $^{147}\text{Sm}$  в природной смеси изотопов 15%, период полураспада  $1,06\cdot 10^{11}$  лет.

16. Удельная объемная активность азотнокислого раствора лютеция равна 9,52 Бк/мл. Определите молярную концентрацию  $\text{Lu}^{3+}$  в растворе. Период полураспада  $^{176}\text{Lu}$  равен  $3,6\cdot 10^{10}$  лет, его массовая доля в природной смеси изотопов 2,59%.

17. Объемная активность азотнокислого раствора самария равна 18,7 Бк/мл. Определите молярную концентрацию ионов самария. Период полураспада  $^{147}\text{Sm}$  равен  $1,06\cdot 10^{11}$  лет, его доля в природной смеси изотопов 15%.

18. С помощью радионуклида  $^{64}\text{Cu}$  необходимо определить концентрацию ионов меди в растворе при содержании меди около  $10^{-5}$  г в 1 л раствора. В распоряжении исследователя имеется установка, для которой коэффициент регистрации излучения  $^{64}\text{Cu}$  равен 0,04. Предполагается использовать пробы раствора объемом по 10 мл каждая. Для надежного определения концентрации минимальная регистрируемая активность пробы должна составлять 100 имп/мин (над фоном). Какова должна быть минимальная удельная активность используемой меди (МБк/г)?

19. Найдите предел обнаружения меди методом нейтронно-активационного анализа при облучении образца потоком нейтронов  $4,3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , если с помощью имеющейся аппаратуры можно надежно зарегистрировать активность порядка 0,1 МБк. В природной смеси изотопов содержатся  $^{63}\text{Cu}$  (69,09%) и  $^{65}\text{Cu}$  (30,91%), а эффективные сечения (n,  $\gamma$ )-реакций для этих нуклидов равны  $4,3 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$  и  $2,1 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ , соответственно. Периоды полураспада  $^{64}\text{Cu}$  и  $^{66}\text{Cu}$  равны, соответственно, 12,8 ч и 5,1 мин.

20. Для активационного анализа диспрозия в одинаковых условиях облучали нейтронами два образцовых и один анализируемый препарат. Регистрируемые активности (над фоном) образовавшегося  $^{165}\text{Dy}$  ( $T_{1/2}=2,36$  ч), приведенные к одному моменту времени, составили:

$m(\text{Dy}), \text{ г}$	$x,$	1,0	0,1
$I, \text{ имп/мин}$		540	170

Определите содержание диспрозия в анализируемом образце. Коэффициент регистрации  $\phi$  во всех случаях был один и тот же.

21. Для определения содержания европия в оксиде гадолиния измерены активности анализируемого и образцовых препаратов равной массы и одинаковой конфигурации, возникшие в результате облучения всех препаратов потоком нейтронов одной и той же интенсивности и за одно и то же время. Получены следующие значения радиоактивности препаратов, отнесенные к одинаковому моменту времени:

$\omega(\text{Eu}), \%$	$x$	0,004	0,010	0,027	0,046	0,060	0,077
$I, \text{ имп/мин}$		620	75	180	460	850	980

Найдите содержание (%) европия в анализируемой пробе.

22. Определение содержания железа в руде проводили методом обратного рассеяния  $\beta$ -излучения. Скорость счета образцового препарата, содержащего 5,8% железа, составила 4200 имп/мин, а анализируемой пробы – 5760 имп/мин. Полагая, что на этом участке зависимость скорости счета от содержания железа линейна, определите содержание железа в анализируемой пробе.

23. При определении бора по поглощению нейтронов найдено, что ослабление потока нейтронов, проходящих через образцовый препарат с содержанием бора 0,6 г, составляет 0,72, а ослабление потока нейтронов, проходящих через анализируемый препарат, равно 0,58. Найдите массу бора в анализируемом препарате.

### Метод изотопного разбавления

24. К раствору соли МА был добавлен радионуклид А\* без носителя общей активности 15500 Бк. Через некоторое время (достаточное для равномерного распределения изотопов) была выделена часть вещества МА массой 50 мг; её активность оказалась равной 9300 Бк. Чему равна масса МА в растворе?

25. Для определения концентрации ионов  $Mn^{2+}$  к 10 мл анализируемого раствора добавили 2 мл 0,01 моль/л раствора  $^{54}Mn(NO_3)_2$  с объемной активностью 45 кБк/мл. Осадив часть марганца в виде сульфида и отделив осадок центрифугированием, измерили удельную активность  $^{54}MnS$  – в расчете на элемент она составила 44,226 МБк/г. Рассчитайте концентрацию марганца в исходном растворе.

26. В пробирку последовательно внесли 5 мл анализируемого раствора  $CoCl_2$ , 2 мл 0,01 моль/л раствора  $^{57}CoCl_2$  с объемной скоростью счета 9900 имп/(мин·мл) и 2 мл 0,02 моль/л раствора КОН. Отделив осадок центрифугированием, установили, что объемная скорость счета раствора стала равна 600 имп/(мин·мл). Определить количество вещества хлорида кобальта в анализируемом растворе.

27. Для определения объема крови животного ему ввели внутривенно 0,5 мл воды, меченной тритием, с удельной активностью 2 кБк/мл, а затем отобрали 0,2 мл крови. Скорость счета этой пробы, измеренная с помощью ЖС-спектрометра с коэффициентом регистрации 0,6, оказалась равной 100 имп/мин. Рассчитайте объем крови животного.

28. Для определения концентрации иодид-иона к 5 мл исходного раствора прилили 1 мл раствора  $K^{131}I$  без носителя (регистрируемая активность  $10^4$  имп/мин) и 4 мл 0,1 моль/л раствора нитрата серебра. После отделения осадка скорость счета 0,5 мл фильтрата оказалась равной 300 имп/мин. Рассчитайте молярную концентрацию  $I^-$  в анализируемом растворе.

29. К раствору  $Fe_2(SO_4)_3$  добавили 0,05 мл раствора  $^{59}Fe_2(SO_4)_3$  без носителя с объемной активностью  $5 \cdot 10^6$  имп/(мин·мл). Часть ионов  $Fe^{3+}$  осадили 5 мл 0,06 моль/л раствора NaOH. Активность осадка составила 2500 имп/мин. Определите количество вещества сульфата железа(III) в растворе.

30. В 10 мл анализируемого раствора соли железа(III) внесли сначала 0,2 мл раствора  $^{59}\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  без носителя с объемной активностью 20 кБк/мл, затем 4 мл 0,05 моль/л раствора КОН. Скорость счета 1 мл раствора над осадком, измеренная на установке с коэффициентом регистрации  $\phi = 0,15$ , составила 2000 имп/(мин·мл). Определите концентрацию ионов железа.

31. К 5 мл раствора NaI, содержащему  $^{131}\text{I}$ , добавили по 5 мл 0,1 моль/л растворов KI и  $\text{AgNO}_3$ . Какова молярность исходного раствора, если его объемная регистрируемая активность равна  $10^4$  имп/(мин·мл), а раствора над осадком -  $2 \cdot 10^3$  имп/(мин·мл).

32. К 50 мл раствора  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ , содержащему  $^{65}\text{Zn}$ , с объемной регистрируемой активностью 1000 имп/(мин·мл) добавили сначала 4 мл 0,01 моль/л раствора  $\text{ZnSO}_4$ , а затем 4 мл 0,01 моль/л раствора  $\text{Na}_2\text{S}$ . Удельная регистрируемая активность раствора над осадком оказалась равной 517 имп/(мин·мл). Определите концентрацию ионов цинка в исходном растворе.

33. В 10 мл раствора  $\text{SrCl}_2$  ввели 2 мл  $^{89}\text{SrCl}_2$  без носителя с удельной активностью 1,5 кБк/мл. Стронций частично осадили 3 мл 0,02 моль/л раствора  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Активность осадка составила 10 Бк. Рассчитайте молярную концентрацию хлорида стронция в исходном растворе.

34. Для определения концентрации ионов  $\text{Y}^{3+}$ , которая предположительно не превышала  $2 \cdot 10^{-4}$  моль/л, использовали 0,001 моль/л раствор  $\text{Y}(\text{NO}_3)_3$ , содержащий  $^{88}\text{Y}^{3+}$ . В 2 пробирки поместили по 30 мл анализируемого раствора. Затем в первую добавили 2 мл радиоактивного раствора и 2 мл раствора 8-оксихинолина в  $\text{CHCl}_3$ , во вторую – 4 мл радиоактивного раствора и 2 мл раствора экстрагента. После перемешивания и разделения фаз регистрируемая активность экстракта в первой пробирке оказалась равной 2315 имп/(мин·мл), во второй – 3501 имп/(мин·мл). Определите концентрацию ионов иттрия в анализируемом растворе.

35. Для определения концентрации ионов  $\text{Fe}^{3+}$ , которая предположительно не превышала  $4 \cdot 10^{-4}$  моль/л, использовали 0,001 моль/л раствор  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , содержащий  $^{59}\text{Fe}$ . В 2 пробирки внесли по 10 мл анализируемого раствора. В первую добавили 2 мл радиоактивного раствора, во вторую – 1 мл радиоактивного раствора и 1 мл воды. Затем в каждую пробирку внесли по 1 мл раствора изопропанола. После перемешивания и разделения фаз регистрируемая активность экстракта в первой пробирке оказалась равной 4650 имп/мин, во второй – 3286 имп/мин. Определите концентрацию ионов железа в анализируемом растворе.

36. Для определения концентрации ионов  $\text{Fe}^{3+}$ , которая предположительно не превышала  $3 \cdot 10^{-4}$  моль/л, использовали 0,002 моль/л раствор  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ , содержащий  $^{59}\text{Fe}$ . В 2 пробирки внесли по 10 мл анализируемого раствора. В первую добавили 2 мл радиоактивного раствора, во вторую – 1 мл радиоактивного раствора и 1 мл воды. Затем в каждую пробирку внесли по 1 мл 0,006 моль/л раствора КОН. После центрифугирования измерили регистрируемую активность растворов над осадками: в первой пробирке 1539 имп/(мин·мл), во второй – 684 имп/(мин·мл). Определите концентрацию ионов железа в анализируемом растворе.

37. При анализе методом изотопного разбавления раствора, содержащего ионы стронция, к раствору добавили 1,5 мл 0,2 моль/л раствора  $^{89}\text{SrCl}_2$  с удельной активностью  $2,7 \cdot 10^6$  имп/(мин·моль). Осадив часть стронция в виде сульфата, нашли, что удельная активность полученного осадка равна  $9,3 \cdot 10^5$  имп/(мин·моль). Определите количество стронция в анализируемой пробе.

38. Для определения содержания нафталина в угле к 10 г пробы прибавили 10 мг нафталина, меченного  $^{14}\text{C}$ , с общей активностью  $10^6$  имп/мин. После нагревания в замкнутом объеме и тщательного перемешивания смеси из нее выделили часть нафталина массой 120 мг и активностью 240000 имп/мин. Определите процентное содержание нафталина в угле.

39. Для определения содержания сульфат-ионов к раствору прибавили 100 мг  $\text{BaCl}_2$ , в результате все сульфат-ионы перешли в осадок. Сульфат бария отфильтровали. Для определения массы избыточных ионов  $\text{Ba}^{2+}$  к фильтрату прибавили 100 мг радиоактивного  $\text{BaCl}_2$ , содержащего  $^{140}\text{Ba}$  (очищенного от дочернего  $^{140}\text{La}$ ) общей активностью 6650 имп/мин. Из полученного раствора выделили часть  $\text{BaSO}_4$ . Измерения показали, что активность 20 мг этого осадка составляет 618 имп/мин. Определите содержание сульфат-ионов в исходном растворе.

40. В две центрифужные пробирки внесено по 3 мл анализируемого раствора  $\text{AgNO}_3$  и прибавлено в первую 3, а во вторую 6 мл 0,2 моль/л раствора  $\text{NaI}$ , меченного  $^{131}\text{I}$ . Объем растворов доведен водой до 10 мл. Из каждой пробирки отобраны пробы раствора над осадком объемом по 1 мл. Среднее значение активности проб (за вычетом фона) составило 920 и 3760 имп/мин, соответственно. Определите концентрацию раствора  $\text{AgNO}_3$ .

41. Для определения кобальта методом изотопного разбавления в стаканы №1 и №2 поместили 2 мл и 5 мл пробы соответственно. В стакан №3 прибавили 10 мл 0,2 моль/л раствора  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ , меченного  $^{58}\text{Co}$ , с объемной удельной активностью 630 имп/мин·мл. Этот же раствор и в том же количестве прибавили в стаканы № 1 и 2. В стакан №3 по каплям добавили

1%-й спиртовой раствор диметилглиоксима и нашли объем, необходимый для полного осаждения металла. Точно такие же объемы реагента прибавили в стаканы №1 и 2. Найдите молярную концентрацию раствора кобальта, если активности осадков, выделенных из стаканов №1, 2 и 3, составили (без фона) 2100, 1033 и 6300 имп/мин, соответственно.

42. К раствору, содержащему неизвестное количество иодида натрия, прибавили 0,1 мл 0,01 моль/л раствора  $\text{Na}^{131}\text{I}$  с объемной активностью  $3,24 \cdot 10^6$  имп/(мин·мл) и 5 мл 0,01 моль/л раствора  $\text{AgNO}_3$ . Активность осадка составила 2760 имп/мин. Определите массу иодида натрия в пробе, если известно, что иодид-ион осажден не полностью.

43. Массу бария в сплаве со стронцием определяли методом изотопного разбавления. К раствору анализируемого сплава (стакан № 1) прибавили некоторое количество раствора  $^{133}\text{BaCl}_2$  без носителя. Такой же объем радиоактивного раствора был добавлен к смеси, содержащей 2 мл 0,5 моль/л раствора  $\text{BaCl}_2$  и некоторое количество стронция (стакан № 2). Из каждого раствора выделили часть ионов бария в виде хромата. При этом массы осадков составили 100 и 161 мг, а их радиоактивности оказались равны 940 и 1240 имп/мин. Какова масса бария в анализируемом сплаве?

44. Для определения содержания иодид-ионов в растворе методом изотопного разбавления к 10 мл анализируемого раствора прибавили 1 мл раствора  $\text{Na}^{131}\text{I}$  без носителя. Такой же объем радиоактивного раствора прилили в другой стакан, содержащий 10 мл 0,05 моль/л  $\text{NaI}$ . К обоим растворам прилили по 4 мл 0,05 моль/л раствора  $\text{AgNO}_3$ . Активности отфильтрованных осадков оказались равны, соответственно, 4200 и 8820 имп/мин. Какова молярная концентрация иодид-ионов в анализируемом растворе? (известно, что иодид-ион был осажден не полностью).

45. Для определения содержания церия в анализируемом растворе методом изотопного разбавления отобрали 3 пробы объемом по 10 мл и добавили в каждую по 1 мл раствора церия-141 (содержание носителя в растворе мало и им можно пренебречь). Для осаждения церия в пробы прибавили 1, 2 и 10 мл 0,15 моль/л раствора щавелевой кислоты. Для определения значения добавленной активности к раствору, содержащему 20 ммоль церия, прилили 1 мл того же раствора  $^{141}\text{Ce}$  и 3 мл 0,15 моль/л раствора  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ . Активности осадков, полученных при использовании 1, 2, 3 и 10 мл осадителя, равны, соответственно, 1220, 2408, 1560 и 3180 имп/мин (без фона). Определите среднее содержание церия в пробах.

46. К двум одинаковым объемам анализируемого раствора церия добавили соответственно 3 и 5 мл раствора  $^{144}\text{CeCl}_3$ , содержащего 20 мкг церия в 1 мл. Прибавлением одинакового, но недостаточного для полного осаждения

церия, количества HF выделили осадки фторида церия. Активности осадков измерили через 3 ч после их приготовления (когда наступило вековое равновесие  $^{144}\text{Ce} \rightarrow ^{144}\text{Pr}$ ). Они оказались равны, соответственно, 3350 и 4870 имп/мин (без фона). Найдите содержание церия в анализируемом растворе.

### Методы, основанные на стехиометрических реакциях

47. Определите массовую долю примеси бромид-ионов в нитрате калия по изменению активности  $^{110m}\text{Ag}$ . К 100 мл 0,1 моль/л раствора  $\text{KNO}_3$  прибавили 3 мл 0,001 моль/л раствора  $\text{AgNO}_3$  с удельной активностью 3296 имп/(мин·мл). Осадок  $\text{AgBr}$  отделили центрифугированием. Скорость счета (за вычетом фона) раствора составила 72 имп/(мин·мл).

48. К 0,2 мл анализируемого раствора  $\text{CaCl}_2$  добавили 0,5 мл 0,12 моль/л раствора  $\text{Na}^{14}\text{CO}_3$ , объемная скорость счета которого составляла 840 имп/(с·мл). Объемная скорость счета фильтрата оказалась равной 100 имп/(с·мл). Определите молярную концентрацию раствора хлорида кальция.

49. Серебро из 0,2 мл его раствора полностью осадили 0,1 мл 0,2 моль/л раствора  $\text{NaI}$  с массовой активностью 1 МБк/г иодида натрия. На счетной установке с коэффициентом регистрации 0,02 скорость счета осадка составила 381 имп/мин. Найдите молярность анализируемого раствора.

50. К раствору, содержащему неизвестное количество  $\text{M}^+$ , добавили 50 мг соли  $\text{BX}$ , меченной радионуклидом  $\text{X}^*$ , и осадили  $\text{MX}$ . Регистрируемые активности: раствора до осаждения 1000, осадка 300 имп/мин. Определить массу элемента  $\text{M}$  в растворе, если атомные массы  $\text{M}$ ,  $\text{B}$  и  $\text{X}$  равны 60, 80 и 100 г/моль, соответственно.

51. К 0,5 мл раствора  $\text{NaOH}$  добавили 0,5 мл 0,24 моль/л раствора  $\text{FeCl}_3$ , содержащего  $^{55}\text{Fe}$ , с объемной активностью 12 кБк/мл. Фильтрат оказался радиоактивным, а скорость счета осадка на установке с коэффициентом регистрации 0,05 была равна 90 имп/мин. Определите молярность раствора щелочи.

52. Определить массу ионов иода, захваченных частицами формирующегося осадка гидроксида алюминия по результатам радиохимического эксперимента. К 50 мл 0,2 моль/л раствора  $\text{AlI}_3$  прилили небольшой избыток раствора аммиака, полученный осадок отделили, тщательно промыли и затем растворили в 40 мл азотной кислоты. В полученный раствор внесли 3 мл 0,001 моль/л раствора нитрата серебра, меченного  $^{110m}\text{Ag}$ , общей регистрируемой активностью 9600 имп/мин. Скорость счета раствора, измеренная после отделения осадка, составила 8320 имп/мин.

53. Для определения массы магния в растворе его осадили 10 мл 0,1 моль/л раствора  $(\text{NH}_4)_2\text{H}^{32}\text{PO}_4$  с удельной активностью 1000 имп/мин (на 1 мг фосфора). Отношение количеств  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{PO}_4^{3-}$  в осадке равно 1:1. Активность фильтрата оказалась равна 16600 имп/мин. Определите массу магния.

54. К раствору соли бария объемом 10 мл прибавили 10 мл 0,01 моль/л раствора  $\text{Na}_2^{35}\text{SO}_4$  с объемной активностью 2400 имп/(мин·мл). Активность 2 мл фильтрата, отделенного от осадка, составила 1440 имп/мин (все результаты получены с учетом фона). Определите молярную концентрацию бария в анализируемом растворе.

55. Из 100 мл 0,111 моль/л раствора  $\text{KCl}$ , содержащего также 5 МБк  $^{137}\text{Cs}$ , выделили цезий, после чего объемная активность раствора составила 200 Бк/мл. Во сколько раз использованная методика отделения уменьшает содержание хлорида цезия в растворе?

56. Для контроля степени очистки кадмия от цинка к 20 мл раствора соли кадмия добавили 2 мл 0,0231 моль/л раствора  $^{65}\text{ZnCl}_2$  с удельной активностью 400 МБк/моль. После отделения цинка объемная активность раствора составила 14 Бк/мл. Во сколько раз уменьшает содержание цинка использованная методика?

57. С помощью радионуклида  $^{65}\text{Zn}$  контролировали очистку некоторой соли от примеси цинка (ионы цинка удаляли с помощью катионита). К исходному раствору прибавили 1 мл 0,0232 моль/л раствора  $^{65}\text{ZnCl}_2$  с удельной активностью  $8,8 \cdot 10^8$  имп/(мин·моль). После удаления цинка активность раствора составила 18 имп/мин (без фона). Во сколько раз уменьшилось содержание цинка в очищаемом растворе соли?

58. К 10 мл 0,1 моль/л раствора  $\text{SrCl}_2$ , содержащего 60 кБк  $^{90}\text{Sr}$ , добавили 10 мл раствора серной кислоты. Активность осадка составила 120 Бк. Рассчитайте концентрацию раствора серной кислоты.

59. Для оценки толщины цинкового электролитического покрытия на металлических дисках диаметром 12 мм использован раствор  $^{65}\text{ZnCl}_2$  без носителя с объемной удельной активностью 996000 имп/(мин·мл). Перед электролизом к 20 мл 0,1 моль/л раствора  $\text{ZnCl}_2$  добавили 0,1 мл раствора  $^{65}\text{ZnCl}_2$  без носителя. После электролиза радиоактивность диска оказалась равна 498 имп/мин. Все измерения проводили в идентичных условиях. Какова толщина покрытия (плотность цинка  $7,0 \text{ г/см}^3$ )?

60. Для определения плотности паров иода использовали радиоактивный препарат  $^{131}\text{I}$ . Скорость счета 0,2 г иода составила  $7 \cdot 10^4$  имп/мин, а  $5 \text{ см}^3$

насыщенного пара - 380 имп/мин. Какова плотность пара иода при данных условиях, если коэффициент регистрации при измерениях был одинаковый?

### Радиометрическое титрование

61. Оценить концентрацию фосфат-ионов по результатам титрования его раствора, содержащего фосфор-32, 0,001 моль/л раствором нитрата стронция. В 30 мл анализируемого раствора, удельная скорость счета которого составляла 603 имп/(мин·мл), последовательно добавили сначала 1 мл, затем 2 мл, затем еще 2 мл титранта. После каждого добавления отбирали 1 мл раствора над осадком и измеряли скорость счета (за вычетом фона) этой пробы  $I_{уд,р}$  (таблица).

Объем титранта, мл	0	1	3	5
$I_{уд,р}$ , имп/(мин·мл)	603	440	133	0

62. Оцените концентрацию фосфат-ионов по результатам титрования его раствора, содержащего  $^{32}\text{P}$ . Титрование проводили 0,001 моль/л раствором нитрата бария. В четыре пробы анализируемого раствора объемом по 25 мл каждая внесли 1, 2, 4 и 6 мл титранта. Скорость счета 1 мл раствора после отделения осадка оказалась равной 662, 483, 163 и 36 имп/мин, соответственно. Скорость счета фона 36 имп/мин.

63. Оцените содержание серебра в 10 мл раствора по результатам его титрования 0,1 моль/л раствором  $\text{Na}^{131}\text{I}$ . При отдельном добавлении 3, 10 и 20 мл радиоактивного раствора скорость счета 0,5 мл раствора над осадком составила 50, 300 и 550 имп/мин, соответственно. Скорость счета фона равна 50 имп/мин.

64. Оцените концентрацию бария в 50 мл раствора, содержащего  $^{133}\text{Ba}$ , по результатам его радиометрического титрования. Скорость счета (за вычетом фона) 0,5 мл исходного раствора составляла 1000 имп/мин, а после добавления 10 мл 0,01 моль/л раствора сульфата натрия - 500 имп/мин.

65. В две пробы анализируемого раствора хлорида олова(IV) внесли по 0,1 и 0,2 мл 0,0014 моль/л раствора  $\text{Na}_2^{35}\text{S}$ , соответственно. После отделения осадков скорости счета растворов составили 240 и 720 имп/мин. Определите количество вещества атомов олова в исходном растворе.

66. Содержание титана определяли методом радиометрического титрования. Анализируемый раствор содержал титан, меченный радионуклидом  $^{51}\text{Ti}$ , с объемной активностью 2870 имп/(мин·мл). К 10 мл этого раствора добавили 2,7 мл 0,05 моль/л раствора  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ . Активность 1 мл раствора, полученного после отделения осадка, 1650 имп/мин (в значения

регистрируемой активности введены поправки на фон). Рассчитайте содержание титана в анализируемой пробе.

67. Содержание ионов ртути определяли методом радиометрического титрования с помощью раствора диэтилдитиокарбамата натрия (NaL) в слабокислой среде. Порции раствора объемом по 10 мл каждая встряхивали с равным объемом органической фазы. Органическую фазу готовили смешиванием титрованного раствора NaL (0,37 моль/л) в  $\text{CCl}_4$  с чистым  $\text{CCl}_4$  таким образом, чтобы общий объем органической фазы в каждом опыте составлял 10 мл. Продукт реакции  $^{203}\text{HgL}_2$  накапливался в органической фазе. Полученные результаты приведены в таблице. В значения скорости счета фаз ( $I$ , имп/мин) введены поправки на фон. Определите точку эквивалентности и рассчитайте содержание ртути (в граммах) в анализируемой пробе.

Объем титрованного р-ра NaL, мл		1	2	3	4	5	6
$I$ , имп/мин	органическая фаза	900	1740	2664	2996	3020	3002
	водная фаза	2020	1254	341	0	0	0

### Применение радиоактивных индикаторов в неорганической и физической химии

68. Для получения  $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2$ , меченного  $^{32}\text{P}$ , использовали 0,005 моль/л раствор  $\text{SrCl}_2$ , содержащий  $^{89}\text{Sr}$ . Объемная регистрируемая активность разбавленного в 50 раз раствора  $^{89}\text{SrCl}_2$  составляла 17050 имп/(мин·мл). Осадок  $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2$  был получен добавлением небольшого избытка ортофосфата натрия к 100 мл раствора  $^{89}\text{SrCl}_2$ . Суспензия части осадка длительное время перемешивалась при 298 К в 50 мл 0,001 моль/л раствора перхлората натрия. Объемная регистрируемая активность насыщенного раствора оказалась равной 52 имп/(мин·мл). Определите растворимость (моль/л)  $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2$  в 0,001 моль/л растворе  $\text{NaClO}_4$ . Оцените произведение растворимости этой соли.

69. Определите растворимость (г/мл)  $\text{Ba}_3(\text{PO}_4)_2$  в 0,01 моль/л растворе  $\text{KNO}_3$  по результатам радиохимического эксперимента. Количественное осаждение меченого  $\text{Ba}_3(\text{PO}_4)_2$  проведено добавлением небольшого избытка  $\text{K}_3\text{PO}_4$  к 100 мл 0,01 моль/л раствора  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ , содержащего  $^{133}\text{Ba}$ . Перед осаждением 1 мл используемого для синтеза радиоактивного раствора внесли в колбу на 1 л, довели водой до метки и измерили объемную скорость счета разбавленного раствора (23297 имп/(мин·мл)). Суспензия полученного осадка длительное время перемешивалась при 25°C в 50 мл 0,01 моль/л раствора нитрата калия. Объемная регистрируемая активность раствора над осадком, измеренная после установления равновесия, оказалась равной, за вычетом фона, 38 имп/(мин·мл).

70. В 100 мл насыщенного водного раствора  $\text{AgI}$ , меченного  $^{131}\text{I}$ , с удельной активностью  $1,88 \cdot 10^{12}$  Бк/моль внесли 0,1 мл 0,001 моль/л раствора  $\text{AgNO}_3$ . Рассчитать активность раствора над осадком до и после внесения нитрата серебра. Произведение растворимости  $\text{AgI}$  равно  $8 \cdot 10^{-17}$ .

71. Для определения растворимости  $\text{BaSO}_4$  в 0,003 моль/л растворе  $\text{MgCl}_2$  использовали образец, меченный  $^{35}\text{S}$ . Радиоактивный осадок сульфата бария был получен после внесения 200 мг  $\text{BaCl}_2$  в 100 мл 0,005 моль/л раствора  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , содержащего 8 МБк  $^{35}\text{S}$ . Удельная скорость счета разбавленного в 100 раз раствора сульфата натрия составляла 2824 имп/(мин·мл). Скорость счета 1 мл насыщенного раствора, измеренная после длительного перемешивания суспензии радиоактивного  $\text{BaSO}_4$  в 50 мл раствора  $\text{MgCl}_2$  при  $30^\circ\text{C}$ , оказалась равной 948 имп/мин. Измерения скорости счета проводились в идентичных условиях, результаты измерений приведены к одному времени. Определите равновесную концентрацию  $\text{BaSO}_4$  в 0,003 моль/л растворе  $\text{MgCl}_2$  и оцените произведение растворимости сульфата бария, считая, что в данном растворе коэффициенты термодинамической активности катиона и аниона одинаковы и равны 0,62.

72. К 50 мл 0,02 моль/л раствора  $\text{NaCl}$  прилили 50 мл 0,01 моль/л раствора  $\text{AgNO}_3$ , содержащего  $^{110m}\text{Ag}$ . Объемная регистрируемая активность разбавленного в 100 раз радиоактивного раствора составляла 8409 имп/(мин·мл). Объемная скорость счета насыщенного при 298 К раствора над сформировавшимся осадком оказалась равна 37 имп/(мин·мл). Определите количество вещества ионов серебра в растворе над осадком. Поправки на фон внесены в результаты измерения радиоактивности.

73. К 100 мл 0,005 моль/л водного раствора  $\text{MnSO}_4$ , содержащего  $^{54}\text{Mn}$ , с удельной активностью 776000 имп/(мин·мл) прилили 50 мл 0,02 моль/л раствора  $\text{Na}_2\text{S}$ . Удельная активность (за вычетом фона) насыщенного раствора над сформировавшимся осадком  $\text{MnS}$  оказалась равной 29 имп/(мин·мл). Определите массу марганца в растворе над осадком.

74. Для определения произведения растворимости  $\text{PbCrO}_4$  использовали образец, меченный  $^{51}\text{Cr}$ . Количественное осаждение хромата свинца проведено добавлением небольшого избытка  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  к 100 мл 0,01 моль/л раствора  $\text{Na}_2\text{CrO}_4$ , содержащего примерно 30 МБк  $^{51}\text{Cr}$ . Удельная скорость счета разбавленного в 100 раз раствора хромата натрия составила 20330 имп/(мин·мл). Осадок отделен, промыт и длительное время перемешивался при 298 К в 50 мл 0,02 моль/л водного раствора  $\text{KCl}$ . Удельная скорость счета (за вычетом фона) раствора над осадком, измеренная после установления равновесия, оказалась равной 44 имп/(мин·мл). Оцените произведение растворимости  $\text{PbCrO}_4$ , полагая, что коэффициенты

термодинамической активности ионов  $Pb^{2+}$  и  $CrO_4^{2-}$  в данном случае одинаковы и равны 0,62.

75. Для определения растворимости  $SrCO_3$  использовался образец, меченный  $^{89}Sr$ , массой 200 мг с удельной активностью  $5,1 \cdot 10^7$  Бк/г. Суспензия карбоната стронция длительное время перемешивалась в 40 мл 0,01 моль/л водного раствора перхлората натрия. Скорость счета раствора над осадком, измеренная на установке с коэффициентом регистрации  $\phi = 0,1$ , составила 72 имп/(мин·мл). Определите равновесную концентрацию карбоната стронция в 0,01 моль/л растворе  $NaClO_4$ .

76. Радиоактивный осадок  $BaCrO_4$  был получен при смешивании 100 мл 0,005 моль/л водного раствора  $BaCl_2$ , содержащего  $^{133}Ba$ , и 25 мл 0,04 моль/л раствора хромата калия. Предварительно проведенное определение регистрируемой активности раствора хлорида бария показало, что удельная скорость счета разбавленного в 100 раз раствора равна 16300 имп/(мин·мл). Удельная скорость счета (за вычетом фона) насыщенного раствора над сформировавшимся осадком  $BaCrO_4$  оказалась равной 25 имп/(мин·мл). Определить количество вещества ионов бария в растворе над осадком.

77. Осадок  $Ag_2C_2O_4$ , меченный  $^{110m}Ag$ , был получен при смешивании 50 мл 0,02 моль/л радиоактивного раствора нитрата серебра и 75 мл 0,0133 моль/л раствора оксалата калия. Измерение регистрируемой активности раствора  $AgNO_3$  показало, что удельная скорость счета разбавленного в 1000 раз раствора равна 40680 имп/(мин·мл). Удельная скорость счета насыщенного раствора над сформировавшимся осадком  $Ag_2C_2O_4$  оказалась равной 33 имп/(мин·мл). Определить массу ионов серебра в растворе над осадком. В результаты измерения радиоактивности внесены поправки на фон.

78. Для определения растворимости ортофосфата магния в водном растворе хлорида калия был получен образец  $Mg_3(PO_4)_2$ , меченный  $^{32}P$ , с удельной активностью  $1,69 \cdot 10^6$  Бк/моль. Объемная скорость счета раствора над осадком за вычетом фона, измеренная после длительного перемешивания суспензии малорастворимого вещества в 50 мл 0,01 моль/л раствора  $KCl$  при 298 К на установке с коэффициентом регистрации  $\phi = 0,35$ , составила 63 имп/(мин·мл). Определить растворимость (моль/л)  $Mg_3(PO_4)_2$  в указанных условиях.

79. Для определения растворимости сульфида железа(II) в водном растворе нитрата натрия был получен образец  $FeS$ , меченный  $^{35}S$ , с удельной активностью  $2,5 \cdot 10^9$  Бк/г. Объемная скорость счета раствора над осадком, измеренная после длительного перемешивания суспензии малорастворимого вещества в 50 мл 0,02 моль/л раствора  $NaNO_3$  при 298 К при помощи

спектрометра с коэффициентом  $\varphi = 0,5$ , составила 23 имп/(мин·мл). Определить растворимость (моль/л) FeS в указанных условиях.

80. В 50 мл насыщенного водного раствора  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , меченного  $^{32}\text{P}$ , с удельной активностью  $2 \cdot 10^9$  Бк/г внесли 0,1 мл 0,01 моль/л раствора  $\text{CaCl}_2$ . Рассчитать активность раствора над осадком  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  до и после внесения хлорида кальция. Произведение растворимости  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  равно  $2 \cdot 10^{-29}$ .

81. Определение растворимости CoS в 0,1 моль/л водном растворе  $\text{KNO}_3$  при  $18^\circ \text{C}$  проводили, используя соединение, меченное радионуклидом  $^{60}\text{Co}$ . Удельная активность  $^{60}\text{CoS}$  равнялась  $5,26 \cdot 10^7$  имп/(мин·г). В ходе определения растворимости один раз в час отбирали пробу раствора над осадком объемом 5 мл каждая. После отделения частиц осадка измеряли активности высушенных проб в одинаковых условиях. При этом были получены следующие результаты (в порядке отбора проб): 628, 760, 850, 890, 920, 960, 1005, 1020, 985, 992, 1017 и 998 имп/мин. Какова растворимость CoS в воде (мг/мл) при указанных условиях?

82. Растворимость  $\text{AgCl}$  при комнатной температуре составляет примерно  $10^{-6}$  г/мл. Какова должна быть удельная радиоактивность твердой фазы для точного определения растворимости этой соли, если объем пробы составляет 1 мл, минимальная регистрируемая активность 10 имп/с (без фона), а коэффициент регистрации  $\varphi = 0,25$ .

83. Растворимость  $\text{BaSO}_4$  в воде при комнатной температуре примерно  $1 \cdot 10^{-5}$  моль/л. С какой удельной активностью (МБк/г) нужно приготовить препарат  $\text{Ba}^{35}\text{SO}_4$  для точного определения растворимости этого вещества, если для регистрации радиоактивности предполагается отбирать пробы раствора объемом 2 мл, коэффициент регистрации  $\varphi = 0,05$ , а необходимая скорость счета препарата (без фона) 300 имп/мин?

84. Для определения растворимости  $\text{SrMoO}_4$  в воде при  $17^\circ\text{C}$  использовали препарат, меченный  $^{89}\text{Sr}$ , с удельной активностью  $1,3 \cdot 10^7$  имп/(мин·г). После установления равновесия оказалось, что регистрируемая активность  $^{89}\text{SrMoO}_4$ , содержащегося в 2 мл раствора, составляет 5280 имп/мин. Измерения активности  $^{89}\text{SrMoO}_4$ , находившегося в растворе, проводил в тех же условиях, что и измерения активности исходного твердого вещества, но по истечении 16 суток. Найдите растворимость (моль/л)  $\text{SrMoO}_4$ .

85. Для определения растворимости в воде предполагается использовать препарат фторида кальция, полученный из  $^{45}\text{CaCl}_2$ . Какую минимальную удельную активность (МБк/г) должен иметь исходный  $^{45}\text{CaCl}_2$ , если ориентировочное значение растворимости  $\text{CaF}_2$  равно  $2 \cdot 10^{-5}$  г/мл и необходимо, чтобы регистрируемая активность препарата, полученного

выпариванием 10 мл насыщенного раствора  $\text{CaF}_2$ , составляла не менее 2000 имп/мин. Коэффициент регистрации  $\phi = 0,2$ .

86. Установите, можно ли определить точное значение растворимости гидроксида железа(III) в воде при  $25^\circ\text{C}$ , если его растворимость равна  $\sim 5 \cdot 10^{-7}$  г/мл, а для получения  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  предполагается использовать  $\text{FeCl}_3$ , меченный  $^{59}\text{Fe}$ . В продаже имеются растворы  $^{59}\text{FeCl}_3$  с содержанием иона  $\text{Fe}^{3+}$  3 мг/мл и объемной активностью 400 МБк/мл. Оптимальный объем пробы жидкой фазы для измерения радиоактивности раствора 5 мл. Регистрацию излучения предполагается проводить с помощью счетчика, толщина стальных стенок которого составляет  $60 \text{ мг/см}^2$ , в условиях, когда геометрический коэффициент равен 0,1, а поправочные коэффициенты обратного рассеяния и самоослабления равны 1. Минимальная скорость счета каждой пробы (без фона) должна составлять 100 имп/мин. Ответ подтвердите расчетами.

87. Для определения растворимости  $\text{BaCO}_3$  в воде нужно синтезировать 100 мг карбоната бария, меченого  $^{140}\text{Ba}$ . Регистрируемая удельная активность  $^{140}\text{BaCO}_3$  должна составлять  $2 \cdot 10^8$  имп/(мин·г). В наличии имеется раствор  $^{140}\text{BaCl}_2$  без носителя с объемной активностью 1ТБк/мл. При измерении радиоактивности проб коэффициент регистрации  $\phi = 0,2$ . Какой объем исходного раствора  $^{140}\text{BaCl}_2$  требуется для синтеза нужного осадка?

88. Давление насыщенных паров  $\text{IVr}$  определяли статическим методом, регистрируя радиоактивное излучение  $^{131}\text{I}$ , проникающее через стенки нагревательной печи. Калибровку прибора (определение зависимости между регистрируемой детектором радиоактивностью пара и концентрацией иода в паре) проводили с помощью элементарного иода, меченого  $^{131}\text{I}$ . В ходе опытов на дно стеклянной ампулы помещали порцию кристаллов иода и измеряли скорости счета, отвечающие давлениям насыщенного пара над твердым иодом при  $60,2$ ,  $70,5$ ,  $80,5$  и  $91,1^\circ\text{C}$ , которые оказались равны, соответственно, 67, 126, 217 и 397 имп/с (без фона; излучение от твердой фазы полностью поглощалось защитным экраном). Из литературы известно, что пары иода состоят только из двухатомных молекул, а зависимость давления насыщенного пара над твердым иодом от температуры в интервале  $298\text{-}368 \text{ K}$  описывается уравнением  $\lg p = 8,884 - (2843/T)$ , где температура  $T$  в К, давление  $p$  в мм рт.ст.

В ходе дальнейших опытов в ту же ампулу помещали количество брома, превышающее то, которое необходимо для количественного превращения иода в  $\text{IVr}$ . Для того, чтобы полностью превратить иод и бром в это соединение, ампулу 10 ч нагревали при  $50^\circ\text{C}$ . Образовавшийся  $\text{IVr}$  конденсировали на дне ампулы и ампулу помещали в печь в том же положении, в котором проводили опыт с чистым иодом. Скорости счета, отвечающие равновесию пар - конденсированная фаза при температурах

38,2, 46,1 и 65,9°C, оказались равны, соответственно, 172, 274 и 589 имп/с (в результаты введены поправки на фон и радиоактивный распад атомов иода-131). По полученным данным рассчитайте давление паров IBr при трех указанных температурах. Пары над IBr в условиях опыта состоят только из молекул IBr, и их диссоциация на бром и иод в условиях избытка паров брома пренебрежимо мала.

89. Для определения плотности пара иода использован препарат иода, меченный  $^{131}\text{I}$ , с удельной активностью 10 МБк/г. Согласно полученным результатам, радиоактивность паров иода, содержащихся при температуре опыта в  $12\text{ см}^3$  паровой фазы, равна 630 имп/мин (фон составляет 30 имп/мин). Коэффициент регистрации радиоактивности равен 0,05. Какова плотность паров иода в условиях эксперимента?

90. Для изучения самодиффузии атомов Cu на чистую поверхность меди нанесли электролизом тонкий слой меди, содержащий атомы  $^{64}\text{Cu}$ . Образец в течение  $4,1 \cdot 10^4$  с выдерживали при 1336 К, а затем измеряли концентрацию радиоактивных атомов в слоях, расположенных на различных расстояниях от поверхности. Результаты измерений (приведены к одному моменту времени) указаны в таблице. Глубина снятых слоев значительно меньше толщины использованного образца меди (1,2 см). Поэтому можно считать, что в данном эксперименте имела место диффузия в полубесконечный слой. Рассчитайте коэффициент самодиффузии атомов меди при 1336 К.

Глубина слоя, $l \cdot 10^{-2}$ , см	1,5	2,0	2,7	3,3	4,4	5,5
Удельная активность слоя, имп/(мин·г)	750	540	320	180	45	10

91. Капиллярным методом с использованием радионуклида хлор-36 определяли коэффициент самодиффузии хлорид-ионов в 1 моль/л водном растворе LiCl при 15°C. Длина использованного капилляра 2,20 см, начальная активность раствора в нем 8000 имп/мин. Опыт продолжали 30 ч, активность раствора в капилляре по окончании опыта 3190 имп/мин (в результаты измерения активности введена поправка на фон). Найдите значение коэффициента самодиффузии хлорид-иона.

92. Капиллярным методом с использованием радионуклида  $^{36}\text{Cl}$  предстоит определить коэффициент самодиффузии хлорид-ионов в 0,5 моль/л водном растворе CsCl при 30°C. Рассчитайте минимальную продолжительность опыта, если предполагаемое значение коэффициента самодиффузии  $2 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с, а в распоряжении имеются капилляры длиной 25 мм.

93. Капиллярным методом предполагается определять коэффициенты самодиффузии галогенид-ионов в водном растворе. Имеются капилляры длиной 0,8 и 4,2 см. При использовании каких капилляров минимальная

продолжительность опытов будет меньшей? Во сколько раз? По каким соображениям может оказаться необходимым использование капилляров, работа с которыми требует больших затрат времени?

94. В среде 0,5 моль/л HCl при 25°C коэффициент диффузии иона, содержащего полоний, оказался равен  $9,2 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с. Определите заряд иона, если его подвижность равна  $7 \cdot 10^{-4}$ .

95. В 50 мл насыщенного при 20°C водного раствора PbI<sub>2</sub> внесли 0,53 г хорошо стабилизированного (практически не способного к перекристаллизации) осадка PbI<sub>2</sub>. Затем в раствор добавили 1 каплю раствора K<sup>131</sup>I без носителя, активность которой  $4 \cdot 10^5$  имп/мин. Жидкости с осадком перемешивали и каждые 5 мин определяли удельные объемные активности раствора, которые оказались равны (в порядке отбора проб): 6800, 6340, 6018, 5950, 5964, 5947, 5942 имп/(мин·мл) (без фона). Считая, что изменение активности раствора связано с поверхностным изотопным обменом, в котором участвует только один поверхностный слой осадка, оцените его активную удельную поверхность. Плотность PbI<sub>2</sub> равна 6,16 г/см<sup>3</sup>, а растворимость при 20°C в воде –  $6,3 \cdot 10^{-4}$  г/мл.

96. Для определения относительной удельной поверхности осадка Ce(IO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> использовали 100 мл насыщенного при 20°C водного раствора этого соединения, содержащего радионуклид <sup>141</sup>Ce, с объемной активностью 5600 имп/(мин·мл). В раствор внесли 0,35 г стабилизированного осадка Ce(IO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> и далее суспензию перемешивали. Каждые 10 мин отбирали пробы жидкой фазы объемом 0,2 мл и определяли по результатам измерений их радиоактивности удельную активность раствора. При этом были получены следующие результаты (с учетом фона, в порядке отбора проб): 4800, 4600, 4450, 4400, 4365, 4331, 4355, 4323 и 4315 имп/(мин·мл). Приняв, что в первой (быстрой) стадии обмена участвуют только ионы церия, входящие в поверхностный монослой частиц твердой фазы, определите относительную удельную поверхность использованного осадка. При расчетах растворимость Ce(IO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> в воде при 20°C примите равной  $1,5 \cdot 10^{-4}$  г/мл.

97. При нагревании до 120-150°C смеси безводных порошков FeCl<sub>3</sub> и ZrCl<sub>4</sub> образуется FeZrCl<sub>6</sub> и отщепляется хлор. Для того чтобы выяснить, от какого исходного соединения при этом отщепляются атомы хлора, использовали смесь 0,02 моль FeCl<sub>3</sub>, меченого <sup>36</sup>Cl, с общей активностью 12000 имп/мин, и 0,024 моль нерадиоактивного ZrCl<sub>4</sub>. Радиоактивность полученного препарата составила 7885 имп/мин. Какой вывод о механизме реакции можно сделать на основании полученного результата?

98. Имеется меченный хлором-36 препарат хлорида калия с удельной активностью 0,6 МБк/г. Предполагается сначала получить из него меченный

радионуклидом газообразный хлор, а потом с помощью этого хлора и порошка железа приготовить препарат трихлорида железа. С какой максимальной удельной радиоактивностью (МБк/г) можно приготовить этот препарат?

99. При изучении термогидролиза безводного хлорида алюминия использовали  $\text{AlCl}_3$ , меченный  $^{36}\text{Cl}$ , с удельной активностью 8700 имп/(мин·мг). После проведения при  $250^\circ\text{C}$  термогидролиза оказалось, что активность 3,8 мг полученного твердого продукта составляет 1653 имп/мин. Какая доля связей Al – Cl подверглась гидролитическому расщеплению?

100. Определение чисел переноса ионов в 100%-ой серной кислоте, меченной радионуклидом  $^{35}\text{S}$ , проводили в электролитической ячейке, зоны анода и катода которой были отделены от центральной зоны пористыми перегородками. До начала электролиза в зоне у анода содержалось 0,125 моль, а в зоне у катода – 0,110 моль серной кислоты. Исходная объемная активность в центральной зоне ячейки 8250 имп/(мин·мл). В ходе электролиза через ячейку было пропущено 600 Кл электрического тока. После завершения электролиза удельные активности в анодной и катодной зонах составили (с учетом диффузии) соответственно 8 и 211 имп/(мин·мл). Так как перенос радионуклида  $^{35}\text{S}$  из центральной зоны в анодную и катодную зоны был незначительным, можно считать, что объемная активность серной кислоты в центральной зоне оставалась все время одинаковой. Определите числа переноса катионов и анионов, принимающих участие в электролизе.

101. Для определения числа переноса аниона в 0,132 моль/л водном растворе  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , меченной радионуклидом  $^{32}\text{P}$ , использовали электролитическую ячейку, описанную в предыдущей задаче. До начала электролиза в анодной зоне содержалось 20,65 ммоль  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , а объемная активность раствора в центральной зоне электролитической ячейки составляла 5000 имп/(мин·мл). В ходе электролиза через ячейку было пропущено 620 Кл электрического тока. После завершения электролиза объемная активность раствора в анодной зоне стала равна 100 имп/(мин·мл) (с учетом поправки на диффузию). Определите число переноса аниона, считая, что в ходе электролиза удельная активность раствора в центральной зоне ячейки практически не меняется.

## ОТВЕТЫ и РЕШЕНИЯ

### Раздел I.

1. 782 кэВ      2. 18,6 кэВ

3. В данном случае распад примерно 5% ядер не сопровождается  $\gamma$ -излучением (см. схему распада). Максимальная энергия  $\beta$ -частиц (или антинейтрино) равна энергии ядерного превращения:  $E_{\beta, \max} = 1,259257 \cdot 10^{-3} \cdot 931501 = 1173$  кэВ.

4. 9,8 МэВ

5. Энергия, выделяемая при  $\beta^+$ -распаде, определяется энергетическим эквивалентом разности масс покоя ядер и энергией массы покоя пары электрон-позитрон.  $E_{\beta^+, \max} = 4,35748 \cdot 10^{-3} \cdot 931501 - 1022 = 3037$  кэВ.

6.  $E_{\beta^+, \max} = 3,92162757 \cdot 10^{-3} \cdot 931501 - 1157 - 1022 = 1474$  кэВ

7.  $E_{\text{я.п.}} = (M_{\text{Rn}} - M_{\text{Po}} - M_{\text{He}}) \cdot 931501 = 5590$  кэВ.  $E_{\alpha} = E_{\text{я.п.}} - E_{\text{R}} = 5490$  кэВ

8.  $E_{\beta^+, \max} = (\Delta m - 2m_e) \cdot 931501 = 1199$  (кэВ);  $m_e$  – масса покоя электрона (позитрона).

9. 960 кэВ.

10.  $E_{\beta^+, \max} = 1870 - 1022 = 848$  (кэВ);  $E_{\beta^-, \max} = (M_{\text{Br}} - M_{\text{Kr}}) \cdot 931501 = 2006$  (кэВ); Энергия нейтрино  $E_{\nu} = 1870 - 666 = 1204$  (кэВ)

11.  $E_{\alpha, \text{з.}} = \Delta m \cdot 931501 = 3653$  (кэВ);  $E_{\beta^+, \max} = 1474$  кэВ;  $E_{\nu 1} = 2496$  кэВ ( $p = 4,7\%$ );  $E_{\nu 2} = 997$  кэВ ( $p = 1\%$ )

12. Энергия распада  $E_{\text{я.п.}} = E_{\alpha} + E_{\text{R}} = 5686 + 5686 \cdot (4/220) = 5728$  (кэВ). Энергия, передаваемая ядру вылетающей частицей (энергия отдачи), определяется как:  $E_{\text{R}} = E_{\alpha} \cdot (m_{\alpha}/m_{\text{Rn}}) \cong E_{\alpha} \cdot (4/220)$ , где  $m_{\alpha}$  и  $m_{\text{Rn}}$  – точные массы частицы и дочернего ядра.

13.  $E_{\text{я.п.}\beta^+} = 4227 - 1022 = 3205$  кэВ.  $E_{\beta^+, 1} = 3205$  кэВ;  $E_{\beta^+, 2} = 3205 - 2230 = 975$  кэВ

14.  $E_{\text{я.п.}\beta^+} = E_{\beta^+, \max} = (\Delta m - 2m_e) \cdot 931501 = 2591$  (кэВ).

17. Полная энергия ядерного превращения ( $\Delta m \cdot 931501 = 3695$  кэВ) больше максимальной энергии любой из испускаемых частиц. Следовательно, при любом превращении образуется возбужденное ядро  $^{56}\text{Fe}$ . Переход возбужденного ядра в состояние с меньшей энергией сопровождается, как правило, испусканием  $\gamma$ -квантов. Поэтому, сравнивая энергию  $\beta^-$ -частиц и фотонов, можно оценить энергию уровней ядра, и затем построить схему распада. В частности, полная энергия распада соответствует сумме  $E_{\beta} = 2848$  кэВ и  $E_{\gamma} = 847$  кэВ; энергия первого возбужденного уровня ядра  $^{56}\text{Fe}$  равна 847 кэВ.

22. 2842 кэВ;

23.  $^{22}\text{Na}$ ;

24. 2,815 МэВ,  $^{60}\text{Co}$ ;

25.

Ионизирующее излучение, сопровождающее распад ядра  $^{137}\text{Cs}$  ( $^{137\text{m}}\text{Ba}$ )

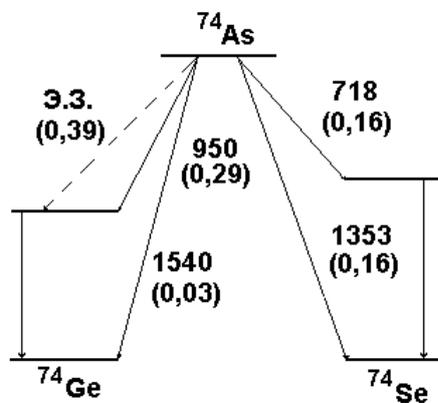
Тип	Энергия, кэВ	Выход на распад, $p, \%$
$\beta^-$ -излучение	$E_{\beta 1, \max} = 1173,7$	5,4
$\beta^-$ -излучение	$E_{\beta 2, \max} = 512$	94,6
$\gamma$ -излучение	661,7	85,6
электроны конверсии	624; 656	7,6; 1,4
характеристическое рентгеновское излучение	~31,5; ~36	9
электроны Оже	менее 26	

Коэффициент конверсии  $\alpha$  - отношение числа конвертированных переходов к числу  $\gamma$ -переходов. Значение  $\alpha = 9/85,6 \approx 0,105$  позволяет сделать вывод, что 856 из 946 ядер  $^{137m}\text{Ba}$  испускаются  $\gamma$ -кванты, а в остальных случаях энергия возбуждения ядра передается электронам  $K$ -оболочки (реже  $L$ -оболочки), которые покидают атом. Кинетическая энергия электронов конверсии равна энергии ядерного перехода за вычетом энергии связи  $K(L)$ -электрона:  $661,7 - 37,44 \approx 624$  кэВ или  $661,7 - 5,62 \approx 656$  кэВ. Вакансия, образовавшаяся на  $K$ -оболочке атома, заполняется электроном с одного из находящихся выше уровней, например,  $L_I$ . Выделяющаяся при этом энергия ( $E_X = E_K - E_{L_I} \approx 37,44 - 5,99 \approx 31,5$  кэВ) может быть либо рассеяна в виде рентгеновского кванта, либо передана электрону другого уровня, например,  $L_{II}$ . Этот электрон покинет атом, т.к.  $(E_K - E_{L_I}) > E_{L_{II}}$ . В этом заключается эффект Оже. Каскадное размножение «дырок» после первого оже-перехода происходит до тех пор, пока они не переместятся во внешние оболочки. Таким образом, процесс перестройки электронных оболочек, вызванный появлением  $K$ -вакансии, включает ряд актов последовательного испускания рентгеновских квантов и электронов Оже со все более удаленных от ядра орбиталей.

26.  $E_{\text{я.п.}\beta^+} = 475 + 811 = 1286$  кэВ;  $E_{\text{я.п.}\Delta 3} = 475 + 811 + 1022 = 2308$  кэВ

27.  $E_{\text{я.п.}\Delta 3} = 575 + 1434 + 935 + 744 + 2 \cdot 511 = 4710$  кэВ; коэффициент конверсии  $\alpha = 0,19$

28. Кванты  $E_\gamma = 65,7$  кэВ в фотонном спектре практически отсутствуют ( $p = 0,0027$ ); вероятность испускания квантов  $E_\gamma = 23,8$  кэВ  $p_\gamma = (1 + \alpha)^{-1} = 0,161$ .  $K_\alpha^-$  и  $K_\beta^-$ -линии характеристического рентгеновского излучения:  $\sim 25,2$  и  $\sim 3,6$  кэВ. Энергия электронов конверсии: 36,5,  $\sim 61,6$ ,  $\sim 19,7$  кэВ



29. Энергия  $\beta^-$ -распада равна максимальной энергии  $\beta^-$ -частиц (1353 кэВ). Энергия позитронного распада  $E_{\text{я.п.}\beta^+} = 2562 - 1022 = 1540$  (кэВ); энергия распада путем Э.З.  $E_{\text{Э.З.}} = 2562$  кэВ.

- |                                 |                 |                             |
|---------------------------------|-----------------|-----------------------------|
| 33. 12,7 суток;                 | 34. 12,3 мин;   | 35. $4,8 \cdot 10^{10}$ лет |
| 36. 88 Бк/г;                    | 37. 16121 Бк;   | 38. $4,8 \cdot 10^{10}$ Бк  |
| 39. 81,4 мг;                    | 40. 23,8%       | 41. 51,1%                   |
| 42. $1,5 \cdot 10^{-8}$ моль/л; | 43. 411 мг      | 44. 95,6 Бк                 |
| 45. 13,46 Бк;                   | 46. 1,17 Бк/мл; | 47. 11,71 Бк/мл             |

48.  $1,667 \cdot 10^{-8}$  моль/л

49. 2971 имп/мин

50. 7543 имп/мин;  $N = \int_5^{15} I_0 e^{-\lambda t} dt = I_0 \left( \frac{e^{-15\lambda} - e^{-5\lambda}}{-\lambda} \right)$ ;  $\lambda \cdot 60000 = I_0 (e^{-5\lambda} - e^{-15\lambda})$ ;

$\lambda = 0,023105 \text{ мин}^{-1}$ ;  $I_0 = 7543$  имп/мин

51. 1236,5 ч; 52. 14,7; 53. 99,17 МБк; 54. 350 МБк; 55. 1341 кБк/мл

56. Активности дочернего и материнского нуклидов сравниваются в момент накопления максимальной активности дочернего:  $t_{\text{max}} = [\ln(\lambda_2/\lambda_1)]/(\lambda_2 - \lambda_1) = 10,8$  мин

57. 10,66 ч

58. Активность дочернего  $A_2 = A_{1,0} [(\lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1))] \cdot [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)] = 9716$  Бк

59. 4,07 кБк; 60.  $7,708 \cdot 10^{11}$ ; 61. 24440 част./с; 62.  $5,4 \cdot 10^{-11}$  моль;

63. 0,3 Па; 64. 0,875; 65. 120 Бк; 48,76 года;

66. а)  $7,3 \cdot 10^7$ ; б)  $7,3 \cdot 10^7$

67.  $\sim 0$ ;  $1,50 \cdot 10^{18}$

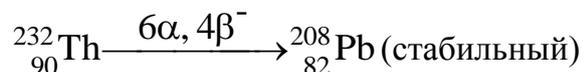
68.  $\sim 5$ ;  $1,55 \cdot 10^{18}$ ;  $N_Y = N_{X,0} \cdot [(\lambda_X/(\lambda_Y - \lambda_X)) \cdot [\exp(-\lambda_X t) - \exp(-\lambda_Y t)]]$ , где  
 $t = 2 T_{1/2(Y)} = 30 T_{1/2(X)}$ ;  $\lambda_X = 30 \lambda_Y$

69.  $1 \cdot 10^{19}$ ;  $\sim 7 \cdot 10^{19}$  (отсутствие равновесия;  $t \ll T_{1/2(*B)}$ )

70. 1) 4,82 МБк, 2) 407,6 кБк, 3) 4,826 МБк;

71. 29,2 кБк

72. 24,55 кг; Торий-232 – родоначальник естественного радиоактивного семейства, ядра атомов которого претерпевают каскад  $\alpha$ - и  $\beta$ -превращений:



В вековом равновесии с  ${}^{232}\text{Th}$  находятся 9 дочерних радиоактивных продуктов, и активности материнского и всех дочерних радионуклидов равны. Следовательно, активность самого  ${}^{232}\text{Th}$  в десять раз меньше активности равновесной смеси.  $A({}^{232}\text{Th}) = 1 \cdot 10^8$  Бк. Используя ур-е  $A = \lambda N = (\ln 2/T_{1/2})N$ , находим число ядер тория ( $N$ ) и массу тория ( $m$ ).  $N = 0,637 \cdot 10^{26}$ ;  $m = (N/N_A) \cdot 232 = 24549$  г.

73. 4,25 мг; 74.  $m(\text{CsNO}_3)/m(\text{NaI}) = 1768$ ; 75. 24,5 ч; 76.  $7,5 \cdot 10^{-9}$  моль; 77. 574 ч

78. В цепочке превращений к моменту  $t = 10 T_{1/2(B)}$  практически устанавливается вековое равновесие. При  $t \ll T_{1/2(A)}$  равновесная активность дочернего  $A_\infty \cong A_A$

а)  $t = 110$  сут., к моменту  $t = 5,5 T_{1/2(B)}$   $A_B = A_A \cdot [(1 - \exp(-5,5 \cdot \ln 2))]$  и  $A_A/A_B = 1,00226$

б)  $t = 70$  сут., к моменту  $t = 3,5 T_{1/2(B)}$   $A_i/A_\infty = 0,9116$

79. 128 ч; 28,7 года; 80. 1,5 МБк; 2,75 МБк; 1,5 МБк; 81.  $\sim 0$ ;  $\sim 1,5 N_{A(0)}$

82.  $\sim N_{A(0)}$ ;  $\sim 0,75 N_{A(0)}$ ; 83. а)  $\sim 1,293$ , б) 1,75, в) 1 МБк; 84. 1,5 кБк; 0,375 кБк

85.  $1,4 \cdot 10^6 : 1$ ; 86. 1) 0,696 МБк,  $A(S)/A(P) = 1,783$ ; б) 0,2576 МБк,  $A(S)/A(P) = 32,9$

87. Энергетический эффект реакции  $Q = [(M_S + M_n) - (M_P + M_p)] \cdot 931501 = -926$  кэВ. Реакция является эндотергической. Для её осуществления энергия относительного движения вступающих в реакцию ядер и частиц должна быть не меньше порогового значения ( $E_{\text{пор}}$ ). В частности, при бомбардировке неподвижной мишени кинетическая энергия бомбардирующих частиц должна быть не ниже

$E_{\text{пор}} = |Q| \cdot (M_S + M_n + M_P + M_p) \cdot (2M_S)^{-1} \cong |Q| \cdot (A_S + A_n) \cdot (A_S)^{-1} \cong 926(33/32) \cong 955$  кэВ,  
где  $M_i$  и  $A_i$  – соответственно массы (в а.е.м.) и массовые числа ядер и частиц, участвующих в реакции  ${}^{32}\text{S}(n,p){}^{32}\text{P}$ .

88.  $E_{\text{пор}} \cong 1,54$  МэВ; высота кулоновского барьера  $\sim 3,2$  МэВ. Энергетический эффект реакции  $Q = \Delta m \cdot c^2 \cong -0,00129 \cdot 931,5 \cong -1,20$  МэВ.

Альфа-частица должна обладать кинетической энергией, превышающей (без учета кулоновского барьера)  $E_{\text{пор}} = 1,2(14+4)/14 = 1,54$  МэВ.

Кулоновский барьер ( $\sim 3,2$  МэВ) в данном случае выше энергетического. Вероятность проникновения  $\alpha$ -частицы в ядро по туннельному механизму (т.е. вероятность протекания реакции) тем выше, чем ближе её энергия к 3,2 МэВ.

Из закона сохранения импульса следует, что  $\sim 4/18$  энергии  $\alpha$ -частицы передается продуктам (ядро  ${}^{17}\text{O}$  и протон). Если энергия частицы выше  $3,2(18/14) \approx 4$  МэВ, то кулоновский барьер не будет препятствовать протеканию реакции.

89.  $Q = (0,9988888 - 1,00866497) \cdot 931501 = -9106,5$  кэВ.  $E_{\text{пор}} = |Q| \cdot 121/120 = 9182$  кэВ

90. 11,253 МэВ;

91. 3255 кэВ;

92. 0,99924147 а.е.м.

93. Энергетический эффект реакции  $Q = [(M_{\text{Be}9}) - (M_{\text{Be}8} + M_n)] \cdot 931501 = -1665$  кэВ. Пороговая энергия этой фотонейтронной реакции 1665 кэВ. При распаде  ${}^{24}\text{Na}$

испускаются два кванта:  $E_{\gamma 1} = 1368$  кэВ и  $E_{\gamma 2} = 2754$  кэВ. Следовательно, только квант с энергией 2754 кэВ может инициировать превращение ядра  ${}^9\text{Be}$  в  ${}^8\text{Be}$ . Энергия нейтрона, покидающего составное ядро, с учетом энергии отдачи ( $E_R$ ) рассчитывается по ур-ю:  $E_{\text{кин,п}} = E_{\gamma} + Q - E_R$ ;  $E_R = (M_{\text{п}}/M_{\text{Be8}}) \cdot E_{\text{кин,п}}$ ;

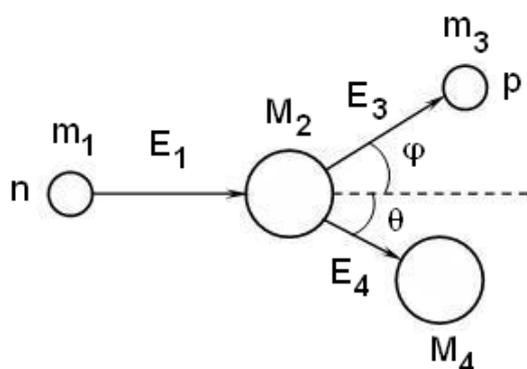
$$E_{\text{кин,п}} = (8/9)(2754 - 1665) = 968 \text{ кэВ}$$

**94.**  $Q = E_{\gamma} + E_R = 7,535$ ;  $E_R = E_{\gamma}^2 / (1862 \cdot M_{\text{K42}})$ . Решая ур-е  $7,535 = E_{\gamma} + E_{\gamma}^2 / 1862 \cdot 42$ , получаем  $E_{\gamma} = 7,53428$  (МэВ) и  $E_R = 725,9$  (эВ)

**95.** 7415 кэВ; **96.**  $E_p = 615(35/35 + 1) = 598$  кэВ;  $E_{\text{кинS}} = 17$  кэВ; **97.** 12,3 МэВ

**98.**  $E_p = (14 - 8,06) / (1 + 1/196) = 5,909$  МэВ; **99.** 2965 кэВ

**100.**  $Q = -2965(56/57) = -2913$  кэВ;  $E_T = 14 - 2,913 = 11,087$  МэВ; **101.** -12,07 МэВ



**102.** Решение:

Энергетический эффект реакции  $Q = -2965(56/57) = -2913$  кэВ. Суммарная кинетическая энергия частиц и ядер:

$E_T = E_1 + Q = E_3 + E_4$ , где энергия нейтрона  $E_1 = 14$  МэВ,  $E_3$  - искомая кинетическая энергия протона.  $E_T = 14 - 2,913 = 11,087$  МэВ

Для частиц с нерелятивистской энергией выполняется

$$\frac{E_3}{E_T} = B \left[ \cos \varphi \pm \left( \frac{D}{B} - \sin^2 \varphi \right)^{1/2} \right]^2, \text{ где}$$

$$B = \frac{m_1 m_3}{(m_1 + M_2)(m_3 + M_4)} \frac{E_1}{E_T} \quad \text{и} \quad D = \frac{M_2 M_4}{(m_1 + M_2)(m_3 + M_4)} \left( 1 + \frac{m_1}{m_2} \frac{Q}{E_T} \right)$$

$M_2$  и  $M_4$  – массы ядер  ${}^{56}\text{Fe}$  и  ${}^{56}\text{Mn}$ , соответственно.

В случае  $B \leq D$  вместо  $\pm$  используется только знак  $+$ .

Замена в уравнении значений масс  $M_i$  на соответствующие массовые числа частиц и ядер  $A_i$  приводит к несущественной погрешности результата расчетов.

Протон имеет максимальную энергию при угле вылета  $\varphi = 0$  ( $\cos \varphi = 1$ ,  $\sin \varphi = 0$ ). Подставив исходные данные в уравнение, получим значение  $E_3 = 11,084$  МэВ.

**103.**  $E_{\text{пор.}} = 4,929$  МэВ;  $E_p = 9,7484$  МэВ (см. решение 102)

**104.** 7937 кэВ; энергия отдачи ( $E_R = E_{\gamma}^2 / (1862000 \cdot M_{\text{P32}}) \cong 1,06$  кэВ) пренебрежимо мала.

**105.**  $\nu(\text{Mn}) = 6,4 \cdot 10^{-6}$  моль (0,16%);  $\nu(\text{V}) = 5,6 \cdot 10^{-6}$  моль (0,14%)

В первую очередь необходимо оценить возможную активность радионуклидов, образующихся при поглощении тепловых нейтронов ядрами примесных элементов в тонкой мишени, используя уравнение:

$$A = 10^7 \cdot \sigma \cdot (208/52 \cdot 10^3) \cdot (\omega/100) \cdot x \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot [(1 - \exp(-\lambda t_{\text{обл.}})) \cdot \exp(-\lambda t_{\text{изм.}})] \quad (1),$$

где  $x$  - мольная доля (для хрома  $x = 1$ , для примеси  $x \leq 0,002$ ). Хром – основной элемент мишени, содержание примесных элементов не более 0,2%.

Расчет показывает, что при данных условиях облучения и при максимальном значении  $x = 0,002$  активности  ${}^{60}\text{Co}$ ,  ${}^{65}\text{Ni}$ ,  ${}^{51}\text{Ti}$  и радионуклидов Fe будут меньше 1 Бк. Например,  $A({}^{60}\text{Co}) \approx 0,3$  Бк,  $A({}^{65}\text{Ni}) \approx 0,6$  Бк. Надежно регистрируемая

активность могла быть индуцирована в Cr, Mn и V. Принимая во внимание существенное различие величин периодов полураспада  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{56}\text{Mn}$  и  $^{52}\text{V}$ , можно сделать вывод, что в момент третьего измерения регистрируется только  $^{51}\text{Cr}$ , в момент второго -  $^{51}\text{Cr}$  и  $^{56}\text{Mn}$ . Используя ур-е зависимости регистрируемой активности от времени ( $I_t = I_0 \exp(-\lambda t)$ ), можно подсчитать, что в момент первого измерения  $I_t$  для  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{56}\text{Mn}$  и  $^{52}\text{V}$  были равны 1242, 2886 и 438 имп/мин, соответственно. Измерения скорости счета проводят в одинаковых условиях (коэффициент  $\phi = \text{const}$ ). Сравнивая скорости счета примеси и хрома ( $x = 1$ ), согласно (1) можно найти: для марганца  $x = 0,0016$ , для ванадия  $x = 0,0014$ .

**106.**  $\nu(\text{V}) = 8 \cdot 10^{-6}$  моль ( $\omega = 0,4\%$ ); **107.** 0,15 ат.% Mn; 0,3 ат.% V;

**108.**  $\nu(\text{V}) = 7 \cdot 10^{-7}$  моль

**109.**  $A = F\sigma n[(1 - \exp(-\lambda t))]$ ;  $5 = 2 \cdot 10^{12} \cdot 4,3 \cdot 10^{-24} \cdot n \cdot 1$ ; число ядер  $^{75}\text{As}$   $n = 5,814 \cdot 10^{11}$ ;  
 $m = (5,814 \cdot 10^{11} / 6,02 \cdot 10^{23}) \cdot 75 = 7,24 \cdot 10^{-11}$  г

**110.** 1473,3 кБк

**111.** Период полураспада  $^{176}\text{Lu}$  очень велик и, следовательно, при облучении в течении нескольких суток активность мишени будет определяться только реакцией  $^{176}\text{Lu}(n, \gamma)^{177}\text{Lu}$ .

$$A = 10^6 \cdot 2100 \cdot 10^{-24} \cdot (0,026/176) \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot [(1 - \exp(-10 \ln 2 / 6,7))] = 120000 \text{ (Бк)}$$

**112.**  $n_1/n_2 = 8,232$ ; **113.** 35 мин; **114.** 49,3 ч; **115.** 167 сут.;

**116.** 5565 Бк/мл; **117.** 34 Бк; **118.** 66 ч; **119.** а) 0,438; б) 0,818

**120.**  $n(\text{Al})/n(\text{Mn}) = 3,37 \cdot 10^7$

**121.** 21,47%; для определения начальной скорости счета ( $I_0$ ,  $\text{с}^{-1}$ ) используют зависимость  $N = (I_0/\lambda) \cdot [(\exp(-\lambda t_1) - \exp(\lambda t_2))]$

**122.**  $110 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$

**123.**  $2,98 \cdot 10^{-11}$  г

**124.** Энергия нейтронов ниже пороговой (17,2 МэВ) для реакции  $^{24}\text{Mg}(n, 2n)^{23}\text{Mg}$ . По реакции ( $n, \alpha$ ) образуется стабильный неон. Т.о., регистрируемая активность обусловлена реакцией  $^{24}\text{Mg}(n, p)^{24}\text{Na}$ . Количество вещества ядер  $^{24}\text{Mg}$  0,0025 моль. Активность  $^{24}\text{Na}$ :  $A = 10^9 \cdot \sigma \cdot 0,0025 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} [1 - \exp(-1 \cdot \ln 2 / 15)] = 12230$ ;  $\sigma = 0,18 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$

**125.** Ядра  $^{29}\text{Si}$  стабильны. Образовавшиеся ядра  $^{31}\text{S}$  и  $^{31}\text{Si}$  к моменту начала измерений практически полностью распадутся. Активность мишени определяется лишь  $^{32}\text{P}$ . Для реакции  $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$   $\sigma = 0,23 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$ .

**126.** реакция  $^{93}\text{Nb}(n, \alpha)^{90}\text{Y}$ ;  $\sigma = 0,09 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$

**127.** реакция  $^{31}\text{P}(n, p)^{31}\text{Si}$ ;  $\sigma = 0,08 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2$

## Раздел II.

**1.** ~23%, ~76% и 100%

Для  $\beta$ -частиц:  $d = 250 \cdot 0,25 = 62,5 \text{ мг/см}^2$ ;  $\mu = 23 \text{ см}^2/\text{г}$ ;  $N_d = N_0 \exp(-\mu d)$ ; задерживается ~76%  $\beta$ -частиц.

Пробег  $\alpha$ -частиц в твердых телах ничтожно мал (в рассматриваемом случае ~ 2,7 мг/см<sup>2</sup>). Экран толщиной  $d = 62,5 \text{ мг/см}^2$  полностью их поглощает.

Для определения максимального пробега электронов (изначально моноэнергетических) с энергией от 0,01 до 3 МэВ можно использовать эмпирическую формулу  $R_{\text{max}} = 412(E_{\text{эл}})^n$ , где  $n = 1,265 - 0,0954E_{\text{эл}}$ . (энергия в МэВ,

пробег в мг/см<sup>2</sup>). Согласно этому приближению  $R_{\max} = 269$  мг/см<sup>2</sup>. Ослабление потока моноэнергетических электронов приближенно следует линейному закону. Т.о, слой 62,5 мг/см<sup>2</sup> задерживает ~23% потока изначально моноэнергетических электронов.

2.  $F_e \sim 340$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>;  $F_\beta \sim 10$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>;  $F_\alpha = 0$

Экран  $d = 2,7 \cdot 0,1 = 0,27$  г/см<sup>2</sup>. Для электронов  $R_{\max} = 412$  мг/см<sup>2</sup> (см. решение 1). Задерживается 65,5% потока, проходит 34,5%; за экраном плотность потока электронов  $\sim 340$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

Для  $\beta$ -частиц с энергией 1 МэВ  $R_{\max} = 0,410$  г/см<sup>2</sup>,  $\mu = 13$  см<sup>2</sup>/г (табл. П.4). Отношение  $d/R_{\max} = 0,659 > 0,3$ . По графику зависимости коэффициента ослабления  $k$  от отношения  $d/R_{\max}$  находим значение  $k \approx 0,01$ . Только 1 из 100 частиц проходит за экран; плотность потока за экраном  $\sim 10$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

3. ~0,1% и 97,7%; 4. ~602 см; 5. ~0,62 см; 6. ~96%

7. поглощается 93 и 100% потока  $\beta$ -частиц; 1,3 и 3,9% потока  $\gamma$ -квантов.

8. ~60%, ~98% и 0%; 9. ~0,05( $\beta$ ); 0,095 ( $\gamma$ ); 10. 0,567; 11. 0,25 ( $\beta, \gamma$ )

12. 210 мг/см<sup>2</sup>; 13. ~0,875 ( $\beta$ ) 0,002 ( $\gamma$ ); 14. ~0,30 г/см<sup>2</sup>; 15. 0,99( $\beta$ ) и 1( $\alpha$ )

16. 0,898; 17. 0( $\beta$ ) и 0,0056( $\gamma$ ); 18. 7,4 см<sup>2</sup>/г;  $R_{\max} \approx 650$  мг/см<sup>2</sup>

19. 0,002 ( $\beta$ ) и 0,018 ( $\gamma$ )

20. Плотность потока частиц  $F_\alpha = 9,05 \cdot 10^6 / 4\pi \cdot 6^2 = 2 \cdot 10^4$  част./(с·см<sup>2</sup>).

Средняя потеря энергии каждой частицей  $\Delta E = 6 \cdot 10^4 \cdot 2,234 = 4,48 \cdot 10^6$  эВ.

Плотность потока энергии  $\Phi_E \cong 5,52 \cdot 2 \cdot 10^4 \cong 11 \cdot 10^4$  МэВ/(с·см<sup>2</sup>)

21. 67%; 22. ~0,063 см<sup>2</sup>/г. 23. ~0,076 см<sup>2</sup>/г. 24. 0,4

25. По табл. П.4 значение  $\mu = 246$  см<sup>2</sup>/г и  $R_{\max} = 32,8$  мг/см<sup>2</sup>. Следовательно,  $d_{\text{пр}} < 0,3R_{\max}$  и применима формула  $S = [1 - \exp(-\mu d_{\text{пр}})] / \mu d_{\text{пр}}$ .  $S = 0,437$ .

26.  $S = 0,75$ ; 27.  $S = 0,53$ ; 28. 100% ( $\beta$ ) 75% ( $\gamma$ ); 29.  $k \approx 0,018$ .

30.  $k \approx 0,062$ ; 31. 0,31; 32. ~0,3 (Y); ~0,93 (Sr) 33. 0,24

34. 0,0086; 35. Метод насыщенных слоев. 2429 Бк/г

36.  $\varphi = 0,0554$ ,  $A = 18986$  Бк; 37. 433 Бк. 38. 1370 Бк;

39. 11 кБк; 40.  $A(^{90}\text{Y}) = 375$  Бк

41. Скорость счета с поправкой на фон и разрешающее время

$$I = [80 / (1 - 0,0003 \cdot 80)] - 0,5 = 81,47 \text{ имп/с.}$$

По табл. П.4 для  $\beta$ -частиц  $^{204}\text{Tl}$  (763 кэВ):  $R_{\max} = 288$  мг/см<sup>2</sup>,  $\mu = 20,5$  см<sup>2</sup>/г;

$d = 6 + 2 \cdot 1,293 \cong 6,6$  мг/см<sup>2</sup>;  $k = \exp(-20,5 \cdot 0,0066) = 0,8735$ ;

$S = [1 - \exp(-\mu d_{\text{пр}})] / \mu d_{\text{пр}} = 0,682$ ;  $\varphi = \eta \cdot k \cdot S = 0,03574$ ;  $A = I / \varphi = 81,47 / (\eta \cdot k \cdot S) = 2279$  Бк

42. 2679 Бк/г

43. для  $\beta$ -частиц трития  $R_{\max} < 3$  мг/см<sup>2</sup> ( $\varphi = 0$ ); для  $^{14}\text{C}$   $\varphi = 0,089$

44.  $I_{\text{Sr(Y)}} / I_{\text{P}} = 0,855$

45. Периоды полураспада  $^{35}\text{S}$  и  $^{36}\text{Cl}$  составляют 87 суток и  $3 \cdot 10^5$  лет, соответственно. Следовательно, уменьшение регистрируемой активности за 30 дней определяется только распадом  $^{35}\text{S}$ .

При первом измерении  $I(^{35}\text{S}) = (2700 - 2275) / [1 - \exp(-30 \cdot \ln 2 / 87)] = 1999$  имп/мин; регистрируемая активность  $^{36}\text{Cl}$  равна 701 имп/мин.

$d = d_{\text{ст.}} + d_{\text{возд.}} = 0,006$  г/см<sup>2</sup>;  $\mu(^{35}\text{S}) = 246$  см<sup>2</sup>/г ( $E_{\beta\text{-max}} = 167$  кэВ);

$k_1 = \exp(-246 \cdot 0,006) = 0,2285$ ;  $\mu(^{36}\text{Cl}) = 22,6$  см<sup>2</sup>/г ( $E_{\beta\text{-max}} = 710$  кэВ);

$k_2 = \exp(-22,6 \cdot 0,006) = 0,873$

Коэффициент самопоглощения  $S$  для тонкого препарата можно считать равным 1.

Поправка на разрешающее время не вводится, т.к.  $\tau \cdot I_c = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 45 = 0,009 < 0,02$   
 $1999 = \varphi_1 \cdot A(^{35}\text{S}) = \eta \cdot 0,2285 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \varepsilon \cdot q \cdot A(^{35}\text{S})$ ;  $701 = \varphi_2 \cdot A(^{36}\text{Cl}) = \eta \cdot 0,873 \cdot 0,98 \cdot 1 \cdot \varepsilon \cdot q \cdot A(^{36}\text{Cl})$   
 $A(^{35}\text{S})/A(^{36}\text{Cl}) = (1999 \cdot \eta \cdot 0,873 \cdot 0,98 \cdot 1 \cdot \varepsilon \cdot q) / (701 \cdot \eta \cdot 0,2285 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \varepsilon \cdot q) = 10,68$

**46.** 5722 имп/мин, 6783 имп/мин; **47.** 1218 имп/мин; **48.** 594 с; **49.** 14,1 мин

**50.**  $\sim 15 \text{ мг/см}^2$  ( $\sim 0,0056 \text{ см}$ ); **51.** 626 Бк **52.** 16,3% ( $626 \pm 102 \text{ Бк}$ )

**53.** Метод насыщенных слоев. Регистрируемая скорость счета «толстого»  $\beta^-$ -активного препарата ( $d_{\text{пр.}} \geq 0,75 R_{\text{max}}$ ), имеющего площадь  $s$ , пропорциональна его удельной активности:  $I = A_{\text{уд.}} \cdot s \cdot \varphi / \mu$ . Если измерения скорости счета анализируемых и эталонных препаратов проводят в одинаковых условиях (постоянство  $\varphi \cdot s$ ), то искомое содержание радионуклида определяют по отношению скоростей счета.

$$\omega_x = \omega_{\text{эт.}} (A_x / A_{\text{эт.}}) = 0,102 = 10,2\%.$$

**54.**  $A_{\text{уд.2}}/A_{\text{уд.1}} = 2$ ;  $A_2/A_1 = 3$

**55.**  $A_{\text{уд.2}}/A_{\text{уд.1}} = 0,45$ ;  $A_2/A_1 = 1,08$ ; **56.**  $1,52 \pm 0,14\%$  **57.** 5,42%

**58.** 49,7 мг;

**59.**  $9 \pm 2\%$ ;

**60.** 81 мг

**61.**  $^{22}\text{Na}$

**61.**  $^{22}\text{Na}$ ;

**62.**  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$

**63.**  $^{58}\text{Co}$

**64.**  $^{64}\text{Cu}$ ;  $^{88}\text{Y}$

**65.** Образец № 433-14,  $t = 49617 \text{ с}$ ;  $m = 0,12 \text{ кг}$

Удельная активность радионуклида в грунте ( $A_{\text{уд.}}$ , Бк/кг) рассчитывают по формуле:

$$A_{\text{уд}} = \frac{N}{\varepsilon_f \cdot t \cdot p \cdot m}, \quad \text{где}$$

$t$  – время набора спектра (с),  $m$  – масса образца (кг),  $p$  – выход на распад  $\gamma$ -квантов данной энергии (справочные данные),  $N$  – площадь пика ППЭ (имп.) на определенном участке спектра за вычетом вклада фона и комптоновского континуума («пьедестала»),  $\varepsilon_f$  – эффективность регистрации по пику ППЭ  $\gamma$ -квантов данного радионуклида, которая определяется по прилагаемой калибровочной зависимости  $\varepsilon_f$  от  $E_\gamma$ .

нуклид	Энергия, кэВ	Выход на распад, $p$	Эффективность регистрации по пику ППЭ, $\varepsilon_f$
$^{40}\text{K}$	1460	0,1	0,005
$^{232}\text{Th}$ (по линии $^{228}\text{Ac}$ )	911	0,266	0,005
$^{137}\text{Cs}$	662	0,85	0,010
$^{226}\text{Ra}$ (по линии двух дочерних нуклидов)	186	0,057	0,025

$$A_{\text{эф}} = A_{\text{уд.,Ra}} + 1,3 \cdot A_{\text{уд.,Th}} + 0,09 \cdot A_{\text{уд.,K}} = 3,7 + 1,3 \cdot 18,6 + 0,09 \cdot 323 = 57 \text{ Бк/кг}$$

Абсолютная погрешность определения  $\Delta(A_{\text{эф}}) = \pm 5 \text{ Бк/кг}$ ;  $A_{\text{эф}} = 57 \pm 5 \text{ Бк/кг}$

$57 \text{ Бк/кг} \ll 370 \text{ Бк/кг}$ . Ограничений по строительству нет.

$A_{\text{уд.,Cs}} = 3,8 \text{ Бк/кг}$  (ниже «нормы» для Московского региона).

### Раздел III.

1.  $F_{\beta}=20$  част./ $(\text{с}\cdot\text{см}^2)$ ;  $\Phi = 71830$  част./ $\text{см}^2$ .

Флюенс (перенос) частиц – отношение числа ионизирующих частиц (фотонов), проникающих в элементарную сферу, к площади центрального (поперечного) сечения этой сферы ( $\Phi = dN/dS$ ; част./ $\text{см}^2$ ). Плотность потока частиц – характеристика изменения флюенса частиц во времени:

$$F_{\beta}=dF/dS=d\Phi/dt \text{ (част./}(\text{с}\cdot\text{см}^2)\text{)}.$$

2.  $F_{W,\gamma}/F_{W,\beta} = 2,4$

Ослабление потока  $\beta$ -частиц. Слой воздуха  $d = 0,00129\cdot 50 = 0,0645$  г/ $\text{см}^2$ . По табл. П.4  $\mu = 10,1$   $\text{см}^2/\text{г}$  (для  $E_{\beta} = 1,2$  МэВ) и  $\mu = 4,6$   $\text{см}^2/\text{г}$  (для  $E_{\beta} = 2,2$  МэВ).

$$F_{W,\beta} = (A/4\pi r^2)[0,7\cdot 0,4\cdot 1,2\cdot \exp(-10,1\cdot 0,0645) + 0,3\cdot 0,4\cdot 2,2\cdot \exp(-4,6\cdot 0,0645)] \cong \cong 0,37138\cdot (A/4\pi r^2) \text{ МэВ}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$$

Ослабление фотонного потока в воздухе (50 см) пренебрежимо мало. Например, для  $E_{\gamma} = 0,19$  МэВ  $k = \exp(-50\cdot 0,161\cdot 10^{-3}) = 0,992$  (задерживается менее 1% потока).

$$F_{W,\gamma} = (A/4\pi r^2)(0,7\cdot 1,0 + 1\cdot 0,19) = 0,89\cdot (A/4\pi r^2) \text{ МэВ}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$$

3.  $35,25$  аГр $\cdot\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{Бк})$ .

4.  $18$  мГр/с. По формуле  $P_{\text{п},\beta} = I/S_{\text{д}}\cdot\Phi\cdot F_{\beta}$ , где  $F_{\beta} = 6,25\cdot 10^9\cdot (R_{\text{max}}/0,4E_{\beta,\text{max}})$  – плотность потока, создающего дозу мощностью  $1$  Гр/с.

5.  $P_{\beta} / P_{\gamma} \approx 7$

6.  $11$  мГр

7. Нет. Минимальная толщина экрана  $10,2$  см.

Эквивалентная доза, полученная за  $1$  ч (без защиты)  $D_0 = 1,09\cdot 0,5\cdot 10^{-6}\cdot 3600 = 1,962\cdot 10^{-3}$  Зв. Предельная мощность дозы на поверхности защиты  $6\cdot 10^{-6}$  Зв/ч. Требуемая кратность ослабления  $k = 1,962\cdot 10^{-3}/6\cdot 10^{-6} = 327$ . В этом случае необходим свинцовый экран толщиной  $10,2$  см (табл. П.11).

8. Не требуется; доза за год  $H = 14$  мЗв  $< 20$  мЗв

9.  $H = 722$  мкЗв; При условии  $2^x$ -часовой работы в день ( $567$  ч за год) минимальная толщина защитного экрана  $d = 3$  см

Общая формула, позволяющая определить дозу  $H$  (аЗв), создаваемую точечным изотропным  $\gamma$ -источником активностью  $A$  (Бк) в биологической ткани на расстоянии  $r$  (м) в течение  $t$  (с):  $H = (1,09\cdot A\cdot \Gamma_{\text{в}}\cdot t/r^2)\cdot W$ .

Для фотонного излучения взвешивающий коэффициент  $W=1$  аЗв/аГр. Значение керма-постоянной (табл. П.7) для  $^{137}\text{Cs}$ ( $^{137\text{m}}\text{Ba}$ )  $\Gamma_{\text{в}} = 21$  аГр $\cdot\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{Бк})$ . Т.о., сотрудник, работая по **2 часа в день** без защитного экрана, может получить эквивалентную дозу  $H = 1,09\cdot 394\cdot 10^6\cdot 21\cdot 7200/0,09 = 7,215\cdot 10^{14}$  аЗв  $\cong 722$  мкЗв.

В общем случае годовая доза для сотрудников, работающих с источниками ионизирующего излучения, не должна превышать  $20$  мЗв в среднем за любые последовательные  $5$  лет. При этом "Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)", обязывают проводить проектирование защиты с коэффициентом запаса по мощности эквивалентной дозы, равным  $2$ . Это создает резерв, компенсирующий возможные погрешности в исходных данных, возможность облучения от неучтенных источников и т.п. Т.о., при постоянной работе с источниками И.И. ( $1700$  ч в год) проектная мощность дозы на поверхности защиты не должна превышать значения  $P_{\text{пр}} = 36\cdot 10^{-6}$  Зв/день или  $P_{\text{пр}} = 6\cdot 10^{-6}$  Зв/ч.

Поэтому, при условии **2<sup>х</sup>-часовой работы в день**, требуемая кратность ослабления  $k = 7,215 \cdot 10^{-4} / 36 \cdot 10^{-6} = 20,04 \approx 20$ . Используя таблицу Н.Г. Гусева (табл. П. 11), находим (для  $E_\gamma = 0,662$  МэВ и  $k = 20$ ) толщину экрана  $d = 3$  см.

*Примечание.* Если время ежедневной работы с источником не регламентировано, то необходимо рассчитать кратность ослабления мощности дозы, измеренной на рабочем месте, до предельно допустимого уровня. В рассматриваемом случае мощность дозы (при отсутствии защиты)  $P_0 = 3,61 \cdot 10^{-4}$  Зв/ч. Предельное значение  $P_{np} = 6 \cdot 10^{-6}$  Зв/ч. Кратность ослабления  $k = P_0 / P_{np} = 60$ . Толщина экрана, согласно табл. П.11,  $d = 4,0$  см.

**10.**  $F_{загр} = 48$  част/(см<sup>2</sup>·мин); не превышает

**11.** Поглощенная доза равна отношению энергии  $dE$ , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе этого объема  $dm$ . Единица измерения 1 Гр = 1 Дж/кг. За 1 с веществу передана энергия:  $\Delta E = 6 \cdot 10^4$  МэВ/с. Масса объема ткани, поглотившего энергию частиц:  $\Delta m = [4 \cdot \pi \cdot (0,0056)^3 / 3] \cdot 1 = 7,357 \cdot 10^{-7}$  г =  $7,357 \cdot 10^{-10}$  кг. Мощность дозы  $P = \Delta E / \Delta m = 8,155 \cdot 10^{13}$  (МэВ/с·кг) = 13 (Гр/с).

**12.** 266 Гр/ч

**13.** 0,98 аГр·м<sup>2</sup>/(с·Бк)

**14.**  $D_{\alpha,\beta} = 0,056$  Гр;  $H = 0,056$  Зв.

По табл. П.1 и П.4 находим, что максимальная энергия  $\beta$ -частиц  $^{90}\text{Sr}$   $E_{\beta,\max} = 0,546$  МэВ ( $p = 1$ ), максимальный пробег  $R_{\max} \approx 0,188$  г/см<sup>2</sup>, коэффициент ослабления  $\mu \approx 34$  см<sup>2</sup>/г. Для  $^{90}\text{Y}$  соответствующие значения равны 2,274 МэВ ( $p = 1$ ), 1,098 г/см<sup>2</sup> и 4,4 см<sup>2</sup>/г. Значения  $\mu$  и  $R_{\max}$ , приведенные в табл. П.4 для алюминия, можно использовать для оценки ослабления потоков  $\beta$ -частиц в других средах, в частности, в воздухе и в биологической ткани.

Поглощенная доза, создаваемая на расстоянии  $r$  (см) точечным  $\beta$ -источником (со сложным составом излучения) активностью  $A$  (Бк), равна:

$$D_{n,\beta} = 1,602 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{At}{4\pi r^2} \sum_i \frac{p_i (0,4 E_{\beta,\max,i}) e^{-\mu_i \rho r}}{R_{\max,i}} \quad (\text{Гр})$$

где  $\rho$  – плотность воздуха (при н.у. 0,00129 г/см<sup>3</sup>);  $t$  – время (с); для  $i$ -ой группы частиц:  $p_i$  – доля частиц на распад,  $E_{\beta,\max,i}$  – максимальная энергия (МэВ),  $R_{\max,i}$  – максимальный пробег (г/см<sup>2</sup>),  $\mu_i$  – коэффициент ослабления в воздухе (см<sup>2</sup>/г).

Подставив в формулу значения  $A$ ,  $t$ ,  $r$ ,  $\mu$  и др., получаем  $D_{\alpha,\beta} = 0,0561$  Гр

Необходимо отметить, что приведенная выше формула справедлива в том случае, если время облучения существенно меньше периода полураспада радионуклида.

**15.** 488 мкЗв/ч. Для  $\beta$ -частиц  $^{60}\text{Co}$  ( $E_{\beta,\max} = 318$  кэВ)  $R_{\max} = 83$  мг/см<sup>2</sup>, через 50 см воздуха ( $d = 65$  мг/см<sup>2</sup>) проникает менее 0,5 % частиц. Дозой, создаваемой  $\beta$ -излучением, пренебрегаем.  $H_\gamma = 1,09 \cdot (A \cdot \Gamma_v / r^2) \cdot 3600 \cdot 10^{-18} = 488 \cdot 10^{-6}$  Зв/ч.

**16.** Согласно НРБ 99/2009, часовая предельно допустимая доза для тела 12 мкЗв, для кистей рук 300 мкЗв. Для тела доза превышена в 9 раз, для рук - в 12,5 раз.

**17.** Обеспечит. Мощность дозы за защитой 4,12 мкЗв/ч (ППД = 6 мкЗв/ч)

**18.** 13,6 см

**19.** свинцовый экран толщиной 6,7 см .

При распаде  $^{134}\text{Cs}$  испускаются три основные группы квантов (табл. П.1). Керма-постоянная этого радионуклида  $\Gamma_{\text{в}} = 57 \text{ аГр}\cdot\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{Бк})$  (табл. П.7).

$E_{\gamma_i}$ , МэВ	$p$	$\Gamma_{\text{в}i}^*$ , аГр·м <sup>2</sup> /с·Бк	$p\cdot\Gamma_{\text{в}i}^* = \Gamma_{\text{в}i}$	$k_i$	$d_i$ , см
0,567	0,23	21,4	4,92	51,5	~ 3
0,604	0,97	22,7	22,02	230	4,57
0,797	0,93	29,3	27,3	285	6,68

Защиту от излучения источника со сложным  $\gamma$ -спектром рассчитывают, как правило, методом «конкурирующих линий».

Прежде всего, вычисляют мощность эквивалентной дозы в отсутствие защиты и определяют кратность её ослабления до предельно допустимого уровня. Часовая доза  $H_0 = 1,09 \cdot (4 \cdot 10^9 \cdot 57 \cdot 3600 / 0,5^2) = 3,579 \cdot 10^{15} \text{ аЗв} = 3,579 \cdot 10^{-3} \text{ Зв}$ . Кратность ослабления  $k = 3,579 \cdot 10^{-3} / 6 \cdot 10^{-6} = 596$ .

Затем, оценив парциальные керма-постоянные  $\Gamma_{\text{в}i} = p_i \Gamma_{\text{в},i}^*$  (табл. П.8), выбирают в спектре линии  $E_{\gamma,i}$ , которые вносят заметный вклад в дозу. Рассчитывают кратности ослабления  $k_i$  для доз, создаваемых каждой выбранной компонентой:  $k_i = k \cdot (\Gamma_{\text{в}i} / \Gamma_{\text{в}}) = 596 \cdot (\Gamma_{\text{в}i} / 57)$ , где  $\Gamma_{\text{в},i}$  и  $\Gamma_{\text{в}}$  – парциальная и полная керма-постоянные;  $k_i$  и  $k$  – кратности ослабления  $i$ -той линии и всего спектра, соответственно.

Далее для каждой линии  $E_{\gamma,i}$  по значению  $k_i$  (табл. П.11) находят необходимую толщину защиты  $d_i$ . Выбирают главную линию (наибольшей защиты  $d_{\Gamma} = 6,68$  см требуют фотоны  $E_{\gamma} = 0,797$  МэВ) и конкурирующую линию (фотоны  $E_{\gamma} = 0,604$  МэВ, толщина защиты  $d_{\text{к}} = 4,57$  см). Кратности ослабления этих линий ( $k_{\Gamma}$  и  $k_{\text{к}}$ ) удваивают, по табл. П.11 находят новые значения  $d_{\Gamma}'$  и  $d_{\text{к}}'$  (для  $2k_{\Gamma}$  и  $2k_{\text{к}}$ , соответственно). По разности  $(d_{\Gamma}' - d_{\Gamma} = \Delta_{1/2,\Gamma})$  и  $(d_{\text{к}}' - d_{\text{к}} = \Delta_{1/2,\text{к}})$  определяют слои полуослабления для главной и конкурирующей линий и выбирают наибольшее из двух значений  $\Delta_{1/2}$ . В данной задаче  $(d_{\Gamma}' - d_{\Gamma}) = \Delta_{1/2,\Gamma} = 7,5 - 6,68 = 0,82$  см и  $(d_{\text{к}}' - d_{\text{к}}) = \Delta_{1/2,\text{к}} = 5,1 - 4,57 = 0,53$  см. Наибольшее значение  $\Delta_{1/2} = 0,82$  см. Окончательно толщину защиты  $d$  находят из соотношений:

$$\begin{aligned} d &= d_{\Gamma} + \Delta_{1/2}, & \text{если} & \quad (d_{\Gamma} - d_{\text{к}}) = 0 \\ d &= d_{\text{к}} + \Delta_{1/2}, & \text{если} & \quad 0 < (d_{\Gamma} - d_{\text{к}}) < \Delta_{1/2} \\ d &= d_{\Gamma}, & \text{если} & \quad (d_{\Gamma} - d_{\text{к}}) > \Delta_{1/2} \end{aligned}$$

В рассматриваемом случае  $(d_{\Gamma} - d_{\text{к}}) = 2,11 > \Delta_{1/2}$ .

Т.о., толщина экрана  $d = d_{\Gamma} = 6,68 \cong 6,7$  см

**20.** 3070 имп/с; превышает в 2,3 раза

**21.** ~ 278 мкГр.

**22.** На образование  $8,3 \cdot 10^{12}$  пар ионов необходима энергия:  $\Delta E = 33,85 \cdot 8,3 \cdot 10^{12} \text{ (эВ)} = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ (Дж)}$ . Масса 1 л воздуха (н.у.) равна  $1,297 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ . Поглощенная в воздухе доза составляет  $4,5 \cdot 10^{-5} / (1,297 \cdot 10^{-3}) = 0,035 \text{ Гр}$ .

**23.**  $113 \text{ аГр}\cdot\text{м}^2/\text{с}\cdot\text{Бк}$ . Полная керма-постоянная ( $\Gamma_{\text{в}}$ ) для радионуклида, испускающего фотоны  $E_{\gamma,i}$  (МэВ) с выходом на распад  $p_i$  и коэффициентом истинного поглощения  $\mu_{e,i}$  ( $\text{м}^2/\text{кг}$ ), равна сумме парциальных ( $\Gamma_{\text{в},i}$ )

$$\Gamma_{\text{в}} = \sum_i \frac{p_i E_{\gamma,i} \mu_{e,i} \cdot 1,602 \cdot 10^{-13} \cdot 10^{18}}{4\pi} = \sum_i p_i \Gamma_{\text{в},i}^* = \sum_i \Gamma_{\text{в},i} \left( \frac{\text{аГр}\cdot\text{м}^2}{\text{Бк}\cdot\text{с}} \right)$$

где  $\Gamma_{\text{в},i}^*$  - нормализованная (т.е. рассчитанная для  $p_i=1$ ) парциальная керма-постоянная.

Величину  $\Gamma_{\text{в},i}$  можно также определить, используя данные табл. П.8

Следует отметить, что керма-постоянная не учитывает вклад в мощность дозы от тормозного излучения  $\beta$ -частиц или электронов внутренней конверсии в веществе источника и/или в оболочке закрытого фотонного источника.

**24.**  $1,32 \text{ нЗв}$

**25.**  $203 \text{ мкЗв}$ .

Если время облучения  $t_1$  больше или сопоставимо с периодом полураспада  $T_{1/2}$  радионуклида, то поглощенная доза определяется как:

$$D = P_0 \int_0^{t_1} e^{-\lambda t} dt = \frac{P_0}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_1})$$

Мощность дозы от  $\beta$ -излучения ( $P_{0,\beta}$ , Зв/с) рассчитывается по формуле, приведенной в решении задачи 14. В рассматриваемом случае: активность в начальный момент  $A_0 = 10^6 \text{ с}^{-1}$ ; расстояние  $r = 30 \text{ см}$ ; постоянная распада  $\lambda = \ln 2 / (15 \cdot 3600) = 1,2836 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ . По табл. П.1 и П.4 для  $\beta$ -излучения  $^{24}\text{Na}$  находим: энергия  $E_{\beta,\text{max}} = 1,390 \text{ МэВ}$ ; выход на распад  $p = 1$ ; коэффициент ослабления  $\mu = 8,1 \text{ см}^2/\text{г}$ ; максимальный пробег  $R_{\text{max}} = 0,613 \text{ г}/\text{см}^2$ . Значения  $\mu$  и  $R_{\text{max}}$  из табл. П.4 можно использовать для оценки ослабления потоков  $\beta$ -частиц как в воздухе, так и в биологической ткани.

$$P_{0,\beta} = 9,38923 \cdot 10^{-9} \text{ (Зв/с)}$$

Мощность эквивалентной дозы  $\gamma$ -излучения в начальный момент:

$$P_{0,\gamma} = 1,09 \cdot (A_0 \cdot \Gamma_{\text{в}} / r^2) = 1356,4 \cdot 10^6 \text{ (аЗв/с)} = 1,3564 \cdot 10^{-9} \text{ (Зв/с)}, \text{ где } \Gamma_{\text{в}} = 112 \text{ аГр}\cdot\text{м}^2/\text{с}\cdot\text{Бк} \text{ (табл. П.7); } r = 0,3 \text{ м}$$

Суммарная мощность эквивалентной дозы в начальный момент:

$$P_0 = P_{0,\beta} + P_{0,\gamma} = 10,7456 \cdot 10^{-9} \text{ (Зв/с)}$$

$$\text{Доза за 6 ч: } H = (10,7456 \cdot 10^{-9} / 1,2836 \cdot 10^{-5}) [1 - \exp(-6 \cdot \ln 2 / 15)] = 202,7 \cdot 10^{-6} \text{ Зв}$$

**26.**  $23,87 \text{ част.}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$ ;

**27.**  $0,785 \text{ мкЗв/ч}$ ;

**28.**  $3605 \text{ мкЗв/ч}$ ;  $7210 \text{ мкЗв}$ ;  $5,1 \text{ см}$

**29.**  $6,3 \text{ см}$ ;

**30.**

**31.**  $75000 \text{ Гр}$

**32.** Энергия  $\alpha$ -частиц полностью поглощается в  $2 \text{ г}$  ткани. Для  $\alpha$ -частиц взвешивающий коэффициент  $W = 20$ . Мощность эквивалентной дозы

$$P_{\text{H}} = 1,121 \cdot 10^{-5} \text{ Зв/с} \cong 0,04 \text{ Зв/ч}$$

**33.**  $38,7 \text{ аГр}\cdot\text{м}^2/\text{с}\cdot\text{Бк}$ ;

**34.**  $P_{\beta} / P_{\gamma} \approx 28$ ;

**35.**  $2 \text{ мкЗв}$

**36.** Предельно допустимая мощность эквивалентной дозы при облучении кистей рук равна  $500 \text{ мЗв}$  в год или  $300 \text{ мкЗв}$  в час. Взвешивающий коэффициент, учитывающий «биологическую вредность», для  $\alpha$ -излучения равен  $20$ . Следовательно, предельное значение мощности поглощенной дозы  $15 \text{ мкГр/ч}$ .

При плотности потока  $F_\alpha$  (част./с·см<sup>2</sup>) энергия, переданная за 1 ч единице массы ткани, равна  $\Delta E/\Delta t = (3600 \cdot 10 \cdot F_\alpha / 0,013) \cdot 10^3 = F_\alpha \cdot 2,76923 \cdot 10^9$  (МэВ/кг) =  $F_\alpha \cdot 4,4363 \cdot 10^{-4}$  (Гр);  $F_\alpha = 15 \cdot 10^{-6} / 4,4363 \cdot 10^{-4} = 0,0338$  част./с·см<sup>2</sup>  $\approx 122$  част./с·см<sup>2</sup>

**37.** 11,1 мкЗв/ч. Для «широкого пучка» моноэнергетического излучения мощность эквивалентной дозы (аЗв/с) на внешней (отношению к источнику) поверхности экрана:  $P_{H,\gamma} = 1,09 \cdot (A \cdot \Gamma_B / r^2) \cdot [\exp(-\mu d)] \cdot B_D$ .

В рассматриваемом случае  $A = 1,7 \cdot 10^{11}$  Бк,  $r = 1,5$  м,  $\Gamma_B = 21$  аГр·м<sup>2</sup>/(с·Бк) (табл. П.7), коэффициент ослабления  $\mu = 1,18$  см<sup>-1</sup> (табл. П.5), слой свинца  $d = 6$  см, дозовый фактор накопления  $B_D = 2,12$  (для  $\mu d \cong 7$  и  $E_\gamma = 0,662$  МэВ).

**38.** 288 мкЗв; 2,6 см; **39.** 180 мкЗв/ч; 720 мкЗв; 0,2 см; **40.**

**41.**  $1,72 \cdot 10^6$  γ-квант/(с·см<sup>2</sup>) **42.** Ответ:  $9,46 \cdot 10^7$  с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>. **43.** 77 аГр·м<sup>2</sup>/(с·Бк)

**44.**  $H = (P_{0,\gamma}/\lambda)[(1-\exp(-\lambda t))] = 1,03 \cdot 10^{-6}$  (Зв), где мощность дозы в начальный момент  $P_{0,\gamma} = 1,09 \cdot (5 \cdot 10^6 \cdot 11,8/0,25) = 257,24 \cdot 10^6$  (аЗв/с) =  $0,25724 \cdot 10^{-9}$  (Зв/с)

**45.** 3,8 мкЗв; **46.** 156 см; **47.**  $k = 16940$

**48.**  $H = 0,0902$  Зв;  $d = 13,7$  см.

При распаде <sup>60</sup>Со с равной вероятностью испускаются два кванта:  $E_{\gamma 1} = 1173$  кэВ ( $p_1 = 100\%$ ) и  $E_{\gamma 2} = 1333$  кэВ ( $p_2 = 100\%$ ). Для упрощения расчетов можно принять, что испускается 2 кванта с энергией по 1253 кэВ каждый. Эквивалентная доза, которая может быть получена за 30 мин (без защиты):  $H = (1,09 \cdot A \cdot \Gamma_B \cdot t / r^2) \cdot W \cdot 10^{-18} = (1,09 \cdot 37 \cdot 10^9 \cdot 84 \cdot 1800 / 0,0676) \cdot 1 \cdot 10^{-18} = 9,02056 \cdot 10^{-2}$  Зв.

Предполагая, что в течение года работа с источником будет проводиться **только по 30 мин в день** (142 ч в год), кратность ослабления находим по предельной дневной дозе ( $72 \cdot 10^{-6}$  Зв/день). Она равна  $k = P_0 / P_{пр} = 2 \cdot [9,02056 \cdot 10^{-2} / 72 \cdot 10^{-6}] = 2562$ . Используя таблицу Н.Г. Гусева (табл. П. 11), находим (для  $E_\gamma = 1,25$  МэВ) толщину свинцовой защиты:  $d = 13,7$  см.

**49.** 5,9 см

**50.** 13 мкГр  $F_\beta = 0,5(2700/60 \cdot 0,3) = 75$  част./с·см<sup>2</sup>;

$D = 1,602 \cdot 10^{-10} (75 \cdot 0,4 \cdot 1,492 \cdot 1200 / 0,66) = 13 \cdot 10^{-6}$  Гр

**51.**  $K = D_{п,\gamma} = 5,64 \cdot 10^6$  Гр

**52.**  $F_\gamma = 45$  квант/с·см<sup>2</sup>;  $F_{w,\gamma} = 48$  МэВ/(с·см<sup>2</sup>);  $F_\beta = 351$  част./с·см<sup>2</sup>;

$F_{w,\beta} = 243$  МэВ/(с·см<sup>2</sup>)

**53.** 41,4 аГр·м<sup>2</sup>/(с·Бк);

**54.**  $D_\beta / D_\gamma = 31$

**55.** 5,2 нГр/с. Максимальный пробег в воздухе β-частиц <sup>144</sup>Се ( $E_\beta = 0,318$  МэВ) менее 70 см. На расстоянии 1 м будет регистрироваться только фотонное излучение. Мощность дозы (Гр/с) рассчитывается по формуле

$P_{п,\gamma} = (I/S_d \cdot \varepsilon) \cdot (E_\gamma \mu_e / 6,25 \cdot 10^9)$

**56.** 9,8 с;

**57.** 28 мкГр/ч;

**58.** 9,6 см

**59.** 12,7 см (при расчете на дневную ППД);

**60.** в 12 раз

**61.**  $F_\beta = 5633$  част./с·см<sup>2</sup>;  $F_{w,\beta} = 3368$  МэВ/(с·см<sup>2</sup>)

**62.**  $F_\beta = 5 \cdot 10^3$  част./с·см<sup>2</sup>;  $F_{w,\beta} \cong 1,9 \cdot 10^3$  МэВ/(с·см<sup>2</sup>)

**63.** 20,3 аГр·м<sup>2</sup>/(с·Бк); **64.**  $11,4 \cdot 10^{-12}$  Гр/с = 41 нЗв/ч; **65.**  $P_\beta / P_\gamma \approx 16,5$

**66.** по 74 мин в неделю; **67.** 600 кэВ; **68.** 91 мЗв/ч; 182 мЗв; 12,2 см

**69.** 1,7 см; **70.**  $H_\beta / H_\gamma \approx 76$ ; **71.** 9 мкЗв

**72.** эквивалентная доза, полученная третьим исследователем, в 5-10 раз больше.

73.  $1,48 \cdot 10^{-9}$  Гр/ч;      74. 137 нГр/ч;      75.  $H=0,755$  мкЗв. Не превышает  
 76. 146 см;      77. 66 МБк;      78. 4,3 см.  
 79. 362 мкЗв; свинцовый экран 3,4 см.;      80.  $4,42 \cdot 10^6$  МэВ/Г =  $7,08 \cdot 10^{-7}$  Дж/Г

81. ~41 см. Для  $\beta$ -частиц  $^{32}\text{P}$   $E_{\beta, \max} = 1,7$  МэВ,  $R_{\max} = 0,78$  г/см<sup>2</sup>,  $\mu = 6$  см<sup>2</sup>/Г  
 При плотности потока  $F_{\beta}$  (частиц/(см<sup>2</sup>·ч)) мощность поглощенной дозы равна:  
 $P_{\text{п}, \beta} = 1,602 \cdot 10^{-10} \cdot F_{\beta} \cdot (0,4 \cdot 1,7 / 0,78) = F_{\beta} \cdot 1,3966 \cdot 10^{-10}$  (Гр/ч);

Предельно допустимая часовая доза составляет 12 мкЗв. Плотность потока частиц, создающий дозу 12 мкЗв,  $F_{\beta} = 12 \cdot 10^{-6} / 1,3966 \cdot 10^{-10} = 85922$  частиц/(см<sup>2</sup>·ч) = 23,867 частиц/(см<sup>2</sup>·с). На расстоянии  $r$  (см) от точечного источника активностью  $0,5 \cdot 10^6$  Бк плотность потока  $23,867 = 0,5 \cdot 10^6 / 4\pi r^2$ ;  $r \approx 41$  (см)

82. 1,0 мкЗв;      83. 32 мкГр/ч;      84.  $9,44 \cdot 10^{-9}$  Гр/с;      85.  $P_{\beta} / P_{\gamma} \approx 22$ ;  
 86. 15 мин.;      87. 0,1 нЗв/с;      88. 0,16 мЗв;      89. 428 с.

90.  $P_{\beta} = 1,602 \cdot 10^{-10} (0,3F \cdot 0,4 \cdot 0,5 / 0,160)$  Зв/с ;  $P_{\gamma} = 1,09 \cdot 1,602 \cdot 10^{-10} (0,9F \cdot 0,5 \cdot 0,033)$  Зв/с  
 $H_{\beta} / H_{\gamma} \approx 23$

91. 16,35 мкЗв/ч.;      92. Нет. 5,011 мЗв < 20 мЗв

93.  $^{22}\text{Na}$ ;  $\Gamma_{\text{в}, \text{Na}} / \Gamma_{\text{в}, \text{Hg}} = 77/8,5$ ;  $K_{\text{Na}} / K_{\text{Hg}} = 1 \cdot 77 / 8 \cdot 8,5 = 1,13$

94. 223 нЗв/ч

95. 86,4 мкГр/ч. См. решение 15. Мощность дозы (аГр/с) на расстоянии  $r$  (м) рассчитывается по формуле  $P_{\text{п}, \gamma} = A \cdot \Gamma_{\text{в}} / r^2$

96. 165 см ( $P_{\text{пд}} = 12$  мкЗв/ч);      97. 8,26 МБк;      98. 47 см;      99. 139 кБк.

100. превышает в 8 раз

101. 1000 част./ (мин·см<sup>2</sup>). Загрязнение оборудования ниже допустимого уровня.

102. в 7,5 раз

#### Раздел IV.

1.  $A(\text{HgBr}_2) / A(\text{C}_2\text{H}_5\text{HgBr}) = 2$

При равнораспределении все участвующие в обмене соединения имеют одинаковый изотопный состав и, следовательно, их удельные активности (в расчете на моль или массу элемента) равны друг другу. Количество вещества атомов Hg в составе HgBr<sub>2</sub> равно 0,001 моль, а в C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>HgBr – 0,0005 моль. Следовательно, при равнораспределении  $A(\text{HgBr}_2) / A(\text{C}_2\text{H}_5\text{HgBr}) = 2$ .

2. 2500 и 1000 Бк/мл.

3. Степень обмена  $F = 7500 / 15000 = 0,5$ . Степень изотопного обмена равна отношению имеющейся в данный момент времени  $t$  концентрации (активности) молекул C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>I<sub>2</sub>, содержащих <sup>131</sup>I, к концентрации таких молекул при равнораспределении. В момент  $t = 2$  ч активность C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>I<sub>2</sub> составляла  $150 \cdot 50 = 7500$  Бк. При  $t \rightarrow \infty$  все участвующие в обмене соединения будут иметь одинаковый изотопный состав и удельные активности (в расчете на моль) этих соединений станут одинаковыми (состояние равнораспределения). В рассматриваемом случае количества вещества атомов I в C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>I<sub>2</sub> равно 0,0015 моль, в NaI - 0,002 моль, и при  $t \rightarrow \infty$  активность C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>I<sub>2</sub> составит  $[(2 \cdot 0,0015) / (2 \cdot 0,0015 + 0,002)] \cdot 50 \cdot 500 = 15000$  Бк.

4.  $F = (3000 - 595) / 3000 = 0,802$

Количество вещества атомов <sup>82</sup>Br в растворе «без носителя» пренебрежимо мало. Поэтому при равнораспределении активность бромэтана (без учета распада <sup>82</sup>Br)

должна стать 3000 Бк. В момент  $t = 9$  ч активность водной фазы (без учета распада  $^{82}\text{Br}$ ) равна  $500/\exp(-\lambda t) = 595$  Бк.

5.  $F = 0,35$       6. 0,899      7. 0,3      8. 9800 Бк      9. 0,5 мл  
 10. а)  $10^5$ , б)  $5 \cdot 10^4$       11. 12,1 мл      12. 2,5 мл      13. 0,9 мл      14. 71,4 мл

15. Реакции гомогенного изотопного обмена между галогеналканами и галогенид-ионами протекают по ассоциативному механизму, и кинетические уравнения этих реакций имеют 2-ой порядок. Значения  $\tau_{1/2}$  для различных концентраций можно определить, построив линейные зависимости типа:  $-\ln(1-F) = (\ln 2/\tau_{1/2}) \cdot t$ , где  $F$  – степень изотопного обмена,  $t$  – время с момента начала обмена.

Для определения константы скорости  $k$  можно воспользоваться зависимостью  $\tau_{1/2}$  от суммы концентраций участвующих в обмене веществ  $(a+b)$ :  $\tau_{1/2} = (\ln 2/k) \cdot (a+b)^{-1}$  или зависимостью вида:  $-\ln(1-F) = k(a+b)t$

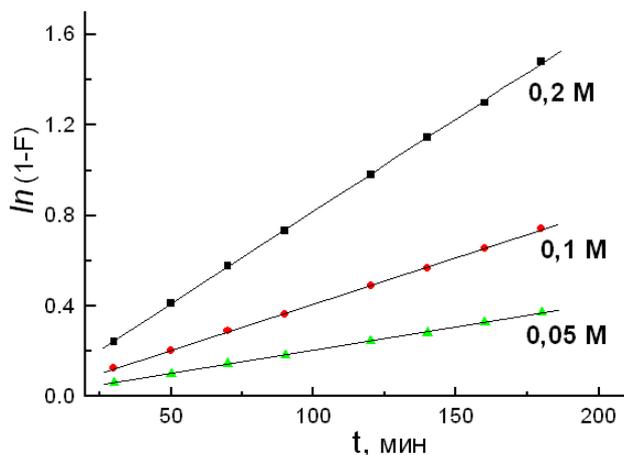
Таким образом, решение задачи включает несколько этапов.

1) По результатам измерения  $A_{\text{экс}}$  определяют степень обмена  $F$  в момент  $t$ .

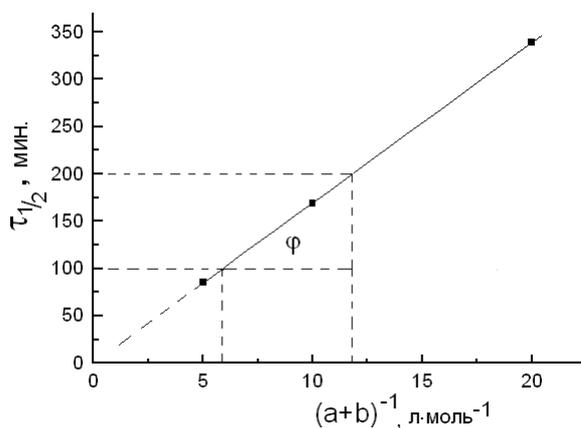
По условию задачи во всех случаях концентрации  $\text{C}_3\text{H}_7\text{I}$  и  $\text{NaI}$  одинаковы, поэтому активность  $\text{C}_3\text{H}_7\text{I}$  ( $^{131}\text{I}$ ) при равнораспределении ( $A_{\text{RI},\infty}$ ) в 50 мл раствора должна быть равна половине исходной активности раствора соли ( $A_{\text{RI},\infty} = 25 \cdot 0,5 \cdot 14800 = 185000$  Бк). Соответствующая удельная активность иодпропана составит  $A_{\text{уд. RI},\infty} = 3700$  Бк/мл.

$$F = (A_{\text{экс}}) \cdot 5 / A_{\text{уд. RI},\infty} = 5A_{\text{экс}} / 3700$$

2) Для каждой из трех концентрации  $(a+b)$  строят графики зависимости  $[-\ln(1-F)]$  от  $t$  и определяют значения  $\tau_{1/2}$  (см. рис.).

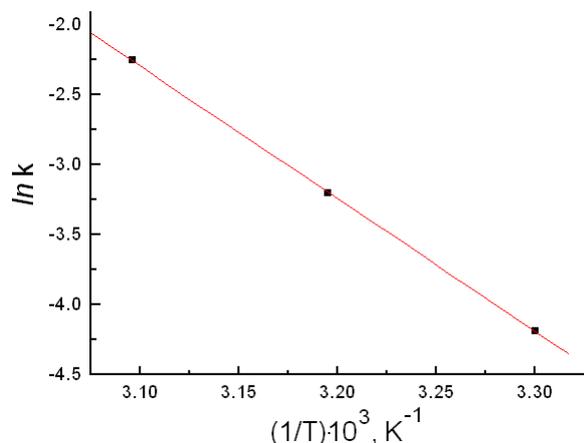


$(a+b)$	$\tau_{1/2}$ МИН
0,2 М	85
0,1 М	169
0,05 М	336



3) Строят график зависимости  $\tau_{1/2}$  от  $(a+b)^{-1}$ . Линейный характер зависимости соответствует 2-ому порядку кинетического уравнения рассматриваемой реакции. По тангенсу угла наклона прямой определяют искомое значение константы скорости  $k = \ln 2 / \text{tg} \varphi = 4,09 \cdot 10^{-2}$  л/(моль·мин) =  $6,82 \cdot 10^{-4}$  л/(моль·с)

16. 3646 МБк/моль    17. 4 ч    18. 5,67 ч    19.  $1,925 \cdot 10^{-4}$  л/(моль·с)  
 20. 3570 Бк    21. 715 Бк/мл    22.  $3,98 \cdot 10^{-4}$  л/(моль·с)    23.  $2,53 \cdot 10^{-4}$  л/(моль·с)  
 24. Зависимость константы скорости реакции  $k$  от температуры подчиняется



уравнению Аррениуса  $k = A \cdot \exp(-E_a/RT)$ , где  $E_a$  – энергия активации (Дж/моль),  $R=8,314$  Дж/моль·К – универсальная газовая постоянная,  $T$  – температура (К),  $A$  – предэкспоненциальный множитель.

Построив зависимость  $\ln k$  от обратной температуры, находят значение  $E_a$ . В рассматриваемом случае эта зависимость имеет вид:  $\ln k = 27,0233 - 9457,59 \cdot T^{-1}$

$$E_a = 78630 \text{ Дж/моль}$$

25.  $1,15 \cdot 10^{-3}$  л·моль<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>; см. решение задачи 15.    26. 4 мин

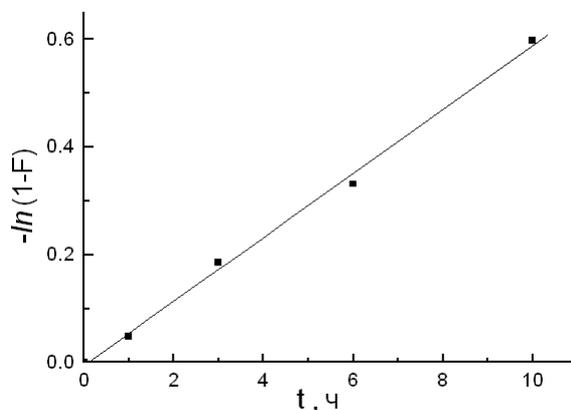
27. Для реакции изотопного обмена период полуобмена  $\tau_{1/2}$  обратно пропорционален константе скорости реакции  $k$ , температурная зависимость которой задается уравнением Аррениуса. Для  $\tau_{1/2}$   $\ln \tau_{1/2} = C + E_a/RT$ . По зависимости  $\ln \tau_{1/2}$  от  $1/T$  [ $\ln \tau_{1/2} = -20,25624 + 7,74995(1/T)$ ] находим  $E_a = 7,74995 \cdot 8,314 \cdot 10^3 = 64433$  Дж/моль.

28. Быстрый изотопный обмен путем переноса электронов между катионами олова в HCl можно представить схемой:  $[^{113}\text{SnCl}_3]^- + [\text{SnCl}_6]^{2-} \leftrightarrow [\text{SnCl}_3]^- + [^{113}\text{SnCl}_6]^{2-}$ . В растворе количество вещества  $\nu_{\text{Sn(II)}}=9 \cdot 10^{-4}$  моль,  $\nu_{\text{Sn(IV)}}=16 \cdot 10^{-4}$  моль. При  $F = 1$  удельная скорость счета  $[\text{SnCl}_6]^{2-}$  должна составить:  $I_{\infty, \text{Sn(IV)}} = (16/25) \cdot 15000 \cdot 10 \cdot (1/50) = 1920$  имп/(мин·мл).

Для решения задачи необходимо определить степень обмена  $F = I_{t, \text{Sn(IV)}}/I_{\infty, \text{Sn(IV)}}$  в момент  $t$  и, используя линейную зависимость  $-\ln(1-F)$  от  $t$ , вычислить  $\tau_{1/2}$ . При 20°C  $\tau_{1/2(1)}=14,016$  мин, при 35°C  $\tau_{1/2(2)}=5,568$  мин. Период полуобмена  $\tau_{1/2}$  обратно пропорционален константе скорости реакции  $k$ . Для оценки  $E_a$  можно использовать:  $E_a = \{\ln[\tau_{1/2(1)}/\tau_{1/2(2)}]\} \cdot R / (1/T_1 - 1/T_2)$ , где  $E_a$  – энергия активации (Дж/моль),  $R = 8,314$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – температура.

После подстановки значений  $\tau_{1/2}$  и  $T$  получаем  $E_a = 46176$  Дж/моль.

29. 11,76 ч



Линейная зависимость  $-\ln(1-F)$  от  $t$

$$-\ln(1-F) = -0,0051 + 0,05939t$$

$$\tau_{1/2} = 11,76 \text{ ч}$$

30. В соответствии с уравнением Аррениуса для констант скорости реакции  $k_{330}/k_{298} = \exp[(80000/8,314)(1/298 - 1/330)] = 22,9$ .

Отсюда  $\tau_{1/2(330)} = (1/22,9) \cdot \tau_{1/2(298)} = 33,6$  мин.

31.  $2,32 \cdot 10^{-3}$  л·моль<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>

32. 83,5 кДж/моль

33. 62 кДж/моль

34. 85,4 кДж/моль

35. 3,72 ч

36.  $3,56 \cdot 10^{-4}$  л/(моль·с)

37.  $4 \cdot 10^5$  МБк/моль

38. 0,01 мл

39. Атомов дейтерия D в составе дейтериеводорода будет 0,3 моль. Содержанием дейтерия в 90 мл воды (5 моль) можно пренебречь (как и растворимостью дейтерия в воде). Атомов H в воде 10 моль. Молярное отношение числа атомов протия и дейтерия в полученном газе будет  $10:0,3 = 333:10$ .

40. Нет; при  $F = 1$   $A_{уд} = 103,3$  Бк/мл

41. 4,545 МБк/моль

42.  $F = 0,0833$ ;  $2000$  Бк/см<sup>3</sup>

43.  $\tau_{1/2} = 2119$  с;  $k = 4,9 \cdot 10^{-4}$  л/(моль·с)

## Раздел V.

### Адсорбция и сокристаллизация

1. Уменьшится с 250 до 244,8 МБк/мл. Решение. Для <sup>95</sup>Zr постоянная распада  $\lambda = 1,25 \cdot 10^{-7}$  с<sup>-1</sup>. Общее число ионов циркония  $4,816 \cdot 10^{17}$  штук, из них радиоактивных -  $10^{17}$ . Доля ионов <sup>95</sup>Zr<sup>4+</sup>:  $1/4,816 = 0,20764$ . Из общего числа адсорбированных ионов ( $10^{16}$ ) радиоактивными являются  $2,0764 \cdot 10^{15}$  ионов. В растворе останется ионов <sup>95</sup>Zr<sup>4+</sup>:  $(10^{17} - 2,0764 \cdot 10^{15}) = 97,9236 \cdot 10^{15}$ . Удельная активность раствора после адсорбции составит:  $97,9236 \cdot 10^{15} \cdot \lambda / 50 = 244,8$  МБк/мл.

2. Определим число ионов  $N$ , содержащих по одному атому цирконий-95.

$10^8 = (0,693/65 \cdot 24 \cdot 3600)N$ ; отсюда  $N = 8,1 \cdot 10^{14}$ . Число ионов, которые могут адсорбироваться на внутренней стенке стакана:  $N_{адс} = (80 \cdot 0,8) / (2,5 \cdot 10^{-15}) = 2,56 \cdot 10^{16}$ . Таким образом,  $N_{адс} \gg N$ , и на стенках стакан может адсорбироваться весь цирконий-95 из раствора.

3.  $5,71 \cdot 10^{-8}$  моль;

4. 8000 ГБк/г

5. 18,89 МБк (за счет адсорбции  $A$  раствора может уменьшиться в ~2,5 раза)

6. 114,3 МБк;

7. 32 ГБк/г;

8. уменьшится до 8 МБк/мл

9. 0,309 МБк. Решение. Общая масса KCl в системе равна  $0,29 \cdot 15 + 1,45 = 5,785$  г. Общая активность <sup>86</sup>Rb в системе 8 МБк, активность всех кристаллов  $x$ . С учетом этих значений получаем уравнение  $(x/1,45) = 0,12(8 - x)/4,335$ . Решив его, находим  $x = 0,309$  МБк.

10. Масса KCl в растворе  $100 \cdot 0,29 = 29$  г. Масса KCl в осадке 5 г. Радиоактивность всех кристаллов  $x$  МБк. Тогда  $(x/5) = 0,12(30 - x)/29$ . Находим  $x = 0,608$  МБк. Удельная радиоактивность твердой фазы после достижения равновесия:  $0,608/5 = 0,122$  МБк

11. Практически весь <sup>133</sup>Ba перейдет на поверхность кристаллов.

12. уменьшится на ~8%

13. Объем частицы сульфата бария  $4/3\pi r^3 \cong 4 \cdot 10^{-12}$  см<sup>3</sup>; масса  $1,8 \cdot 10^{-11}$  г; площадь поверхности одной частицы  $4\pi r^2 \cong 1,26 \cdot 10^{-7}$  см<sup>2</sup>. Общее число частиц:  $0,9/1,8 \cdot 10^{-11} = 5 \cdot 10^{10}$ , их общая поверхность  $5 \cdot 10^{10} \cdot 1,26 \cdot 10^{-7} = 6,3 \cdot 10^5$  см<sup>2</sup> = 63 м<sup>2</sup>. На этой поверхности может разместиться  $6,3 \cdot 10^5$  см<sup>2</sup> /  $1,8 \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup> =  $3,5 \cdot 10^{20}$  формульных

сульфатных единиц, т.е.  $5,8 \cdot 10^{-4}$  моль. В растворе содержание  $\text{CaSO}_4$ :  $0,209/136 = 1,5 \cdot 10^{-3}$  моль. Примем, что радиоактивность, перешедшая на поверхность осадка, равна  $x$  МБк. Всего  $^{45}\text{Ca}$  в растворе было 100 МБк, в растворе останется  $(100-x)$  МБк кальция-45. С учетом значения коэффициента  $D = 0,1$  можно записать следующее уравнение:  $x/(100-x) = (5,8 \cdot 10^{-4})/0,1 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}$ . Отсюда  $x = 79$  МБк. Таким образом, в растворе останется 21 МБк, а объемная активность раствора станет равна 0,21 МБк/мл.

14. 28,7 МБк;

15. в 3,4 раза

16. Обозначим введенную в систему активность через  $A$ , количество макрокомпонента -  $b$ , активность в осадке -  $x$ . В случае распределения по Хлопину:  $x/0,5b = 4(A - x)/0,5b$  и  $x = 4/5A$ .

В случае распределения по Дёрнеру-Госкинсу оказывается, что  $\ln[(A-x)/A] = 0$  (так как  $\ln(0,5b/0,5b) = 0$ ). Это возможно в случае  $x \rightarrow 0$ .

Следовательно, в случае распределения по Хлопину в твердую фазу перейдет значительно больше радионуклида, чем в случае логарифмического распределения.

### Количественные расчеты при экстракционном разделении (задачи 17-42)

**Коэффициент распределения  $K_p$  (другое обозначение  $D$ )** равен отношению равновесных концентраций ( $C_{(o)}$  и  $C_{(в)}$ ) распределяющегося элемента (или веществ во всех его химических формах) в двух фазах: органической (о) и водной (в).

Значение  $K_p$  часто определяют, используя радионуклиды. Обозначим объем водной и органической фаз  $V_{(в)}$  и  $V_{(o)}$ , соответственно. Пусть в начальный момент времени в водной фазе находится радиоактивное вещество с общей активностью  $A_0$ . После установления экстракционного равновесия между фазами, активность водной фазы станет равна  $A_{(в)}$ , активность органической фазы  $A_{(o)} = A_0 - A_{(в)}$ . Равновесные концентрации вещества в органической и водной фазах пропорциональны удельным (объемным) активностям этих фаз, т.е.  $A_{(o)}/V_{(o)}$  и  $A_{(в)}/V_{(в)}$ , соответственно. Таким образом, можно записать

$$K_p = \frac{C_{(o)}}{C_{(в)}} = \frac{A_{(o)}V_{(в)}}{V_{(o)}A_{(в)}} = \frac{(A_0 - A_{(в)})V_{(в)}}{V_{(o)}A_{(в)}}$$

**Фактор извлечения  $R$  (или извлекаемая доля  $E$ )** – отношение массы элемента  $m_{(o)}$ , извлекаемого в органическую фазу, к общей его массе в двух фазах  $m = m_{(o)} + m_{(в)}$ . Расчет  $R$  можно также проводить, исходя из количества распределяющегося вещества (во всех его химических формах) в разных фазах. Фактор  $R$  (доля  $E$ ) после однократной экстракции равен:

$$R = \frac{m_{(o)}}{m_{(в)} + m_{(o)}} = \frac{V_{(o)}}{V_{(o)} + V_{(в)}} = E$$

Коэффициент распределения и фактор извлечения связаны следующими соотношениями:

$$K_p = \frac{RV_{(e)}}{(1-R)V_{(o)}} \quad \text{и} \quad R = \frac{V_{(o)}K_p}{V_{(o)}K_p + V_{(e)}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 1}, \quad \text{где}$$

$\varepsilon = K_p(V_{(o)}/V_{(e)})$  – коэффициент извлечения.

Фактор извлечения  $R_n$  при многократной экстракции ( $n$  операций).

$$R_n = \frac{(\varepsilon + 1)^n - 1}{(\varepsilon + 1)^n} = E_{(\Sigma n)}$$

Степень очистки вещества А от вещества В в органической фазе (в экстракте) характеризует **фактор обогащения**  $S_{(o)}$ , который равен отношению факторов извлечения этих веществ в органическую фазу. При проведении одной экстракции  $S_{(o)} = R_{(A)}/R_{(B)}$ , при проведении  $n$  последовательных экстракций  $S_{(o),n} = R_{n(A)}/R_{n(B)}$

Обогащение вещества В по отношению к веществу А в водной фазе (рафинате) характеризует фактор  $S_{(e)} = (1-R_{(B)})/(1-R_{(A)})$ .

**Коэффициент разделения**  $K_{pD}$  – мера разделения веществ А и В между фазами; он равен отношению коэффициентов распределения этих веществ между органической и водной фазами.  $K_{pD} = K_{p(A)}/K_{p(B)}$

17.  $R_4/R_1=1,19$ ;    18.  $K_p = 1$ ;    19. 2,5;    20.  $K_p = 1,4$   
 21. 50;    22.  $K_{pD}=32/0,0204 = 1570$ ;    23.  $S_{(o)} = 50$ ;    24.  $K_p = 3,33$   
 25.  $S_{(o)} = 26,5$ ;    26.  $K_p = 20$ ;    27.  $A_{(B)}=15$  имп/с;  $A_{(o)}=75$  имп/с  
 28. можно;  $A_{уд.}(A^*) = 600$  Бк/мл, доля примеси В\* составит  $\sim 3,3\%$   
 29. 4 мл;    30. можно; в рафинате  $A(Sr)/A(Y) = 19,05$   
 31.  $S_{(B)} = 18,9$ ;    32.  $S_{(o)} = 133$ ;    33. 17;    34. 6,4% ; 70,6%  
 35.  $K_p = 2,5$ ;    36. 4,67% ; 0,078%;    37.  $n = 5$  (98,05%)  
 38.  $S_1 = 1,036$ ;  $S_2 = 2,65$

В обеих системах коэффициент разделения веществ А и В равен 5, но в первой системе коэффициенты распределения А и В больше единицы, т.е. эти вещества концентрируются в органической фазе, в то время как во второй системе вещество В имеет коэффициент распределения меньше единицы. Фактор извлечения вещества при однократной экстракции и равенстве объемов фаз ( $V_{(o)}=V_{(B)}$ ):  $R=D/(1+D)$ . Доля вещества, оставшаяся в водной фазе:  $(1-R)=(1+D)^{-1}$ .

При многократных последовательных экстракциях:  $(1-R)_n=(1+D)^{-n}$

Решая эти уравнения, находим для системы I  $R_{(3)A} = 0,998$  и  $R_{(3)B} = 0,964$ . Фактор обогащения после 3-х последовательных экстракций  $S_{(o)n} = (R_{(3)A}/R_{(3)B}) = 1,036$ .

Для системы II  $R_{(3)A} = 0,964$  и  $R_{(3)B} = 0,364$ ;  $S_{(o)n} = 2,65$

На примере решения этой задачи можно сделать следующие выводы:

1. Для разделения элементов необходимо использовать системы, в которых  $D_A > 1$ , но  $D_B < 1$  или наоборот.

2. Даже в этих условиях часто не удается разделить вещества так, чтобы получить препарат одного вещества со следовыми примесями другого.

3. В процессе экстракционного разделения для систем типа II эффективной будет промывка экстрактов, которая позволит минимизировать потери целевого продукта (допустим А) при значительном сбросе в водную фазу вещества В.

39. 1,4; 1,54;

40.  $n = 5$

41.

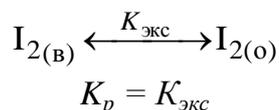
42.  $A_{(o)} = 3,3 \cdot 10^7$  Бк;  $C_{M(o)} = 5,9 \cdot 10^{-14}$  моль/л;  $A_{(в)} = 0,38 \cdot 10^7$  Бк;  $C_{M(в)} = 4,6 \cdot 10^{-15}$  моль/л

### Количественные расчеты при экстракции, требующие знания механизма экстракции (задачи 43-57).

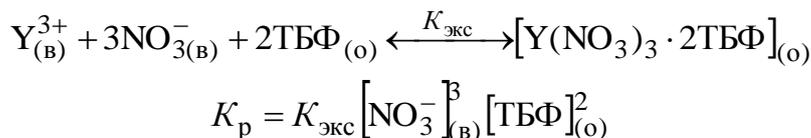
В упрощенном варианте используются значения концентрации, а не термодинамической активности частиц.

I. Экстракция нейтральными экстрагентами.

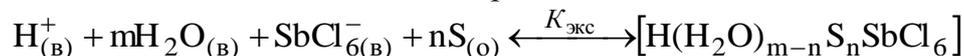
а) механизм физического распределения



б) экстракция сольватов



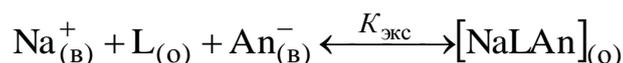
в) «гидратно-сольватный» механизм экстракции



$$K_p = \frac{K_{экс} [H^+]_{(в)} [H_2O]_{(в)}^m [S]_{(o)}^n}{1 + \sum_i \beta_i [Cl^-]_{(в)}^i}$$

где S – растворитель, экстрагент;  $\beta_i$  – константа нестойкости каждого хлоридного комплекса

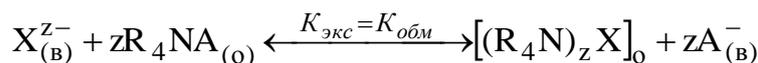
г) экстракция макроциклическими экстрагентами (краунэфиры, краунэфиры модифицированные, каликсарены)



$$K_p = K_{экс} [An^-]_{(в)} [L]_{(o)}$$

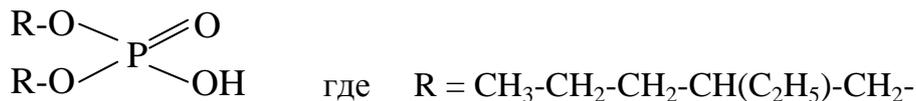
II. Экстракция анионов катион-обменными экстрагентами (экстракция основными экстрагентами).

Экстракция оксоанионов и комплексных анионов солями четвертичных аммониевых оснований



$$\lg D_x = \lg K_{обм} + \frac{z \lg [R_4NA]_{(о)}}{\lg [A^-]_{(в)}}$$

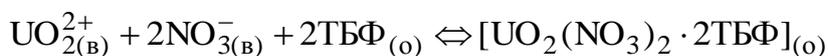
III. Экстракция кислотными экстрагентами. Например, Д-2-этилгексил фосфорной кислотой



$$D = K_{экс} [\text{Д2ЭКФК}]_{(о)}$$

43.  $1,12 \text{ л}^4/\text{моль}^4$ . Для определения концентрационной константы экстракции соединения, при известных коэффициенте распределения и других параметрах системы, в первую очередь необходимо знать механизм экстракции, т.е. химическую реакцию, которая осуществляется на границе раздела фаз при переходе вещества из одной фазы в другую.

Уранилнитрат экстрагируется ТБФ по сольватному механизму, и уравнение экстракции имеет вид:



Индексы (в) и (о) относятся соответственно к водной и органической фазам. В экстракции участвуют и молекулы воды, т.к. ионы в водной фазе гидратированы, а при экстракции происходит их сольватация и перегидратация. Количественный учет этих процессов весьма сложен: их, как правило, формально учитывают в  $K_{экс}$  и не приводят в уравнении экстракции.

$$\tilde{K}_{экс} = \frac{[\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{ТБФ}]_{(о)}}{[\text{UO}_2^{2+}]_{(в)} \cdot [\text{NO}_3^-]_{(в)}^2 \cdot [\text{ТБФ}]_{(о)}^2},$$

где  $\tilde{K}_{экс}$  - концентрационная константа экстракции (в уравнение вводятся значения концентраций, а не активностями частиц).

$$D = \frac{[\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{ТБФ}]_{(о)}}{[\text{UO}_2^{2+}]_{(в)}}$$

В результате преобразований двух уравнений получаем:

$$\tilde{K}_{экс} = \frac{D}{[\text{NO}_3^-]_{(в)}^2 \cdot [\text{ТБФ}]_{(о)}^2}$$

Пусть объемы фаз одинаковы и равны  $V_{(о)} = V_{(в)} = 1000 \text{ мл}$ . Тогда

$$C_{\text{МТБФ}} = \frac{1000 \cdot 0,97}{266} = 3,65 \text{ моль/л}$$

Подставляя все величины в уравнение для концентрационной константы экстракции, получаем:

$$\tilde{K}_{\text{экс}} = \frac{3,73}{0,5^2 \cdot 3,65^2} = 1,12 \text{ л}^4 / \text{моль}^4$$

44.  $K_{\text{экс}} = 1,65 \cdot 10^{-3}$ ;      45.  $3 \cdot 10^5$ ;      46. 7,85;      47.  $8,13 \cdot 10^3$   
 48. 7,8;      49.  $2,1 \cdot 10^5$ ;      50.  $2,6 \cdot 10^6$ ;      51. 0,1  
 52. 0,22;      53.  $7,5 \cdot 10^3$ ;      54.  $1,4 \cdot 10^8$ ;      55.  $4,8 \cdot 10^5$   
 56. 44,4;      57.  $9,4 \cdot 10^{-2}$

## Раздел VI

1.  $m_{\min} = \frac{I_{\min}}{\varphi\lambda} \frac{100}{\omega} \frac{A}{N_A}$      $A$  – атомная масса радионуклида,  $N_A$  – константа

Авогадро,  $\omega$  – массовая радионуклида в природной смеси;  $m_{\min} = 0,2$  г

2. Во всех случаях можно надежно определить  $5/(0,95 \cdot 10^6) = 5,3 \cdot 10^{-6}$  г элемента.

3. 0,1665 г

4. Можно; в 10 мг пробы содержится  $10^{-7}$  г X, предел обнаружения равен  $5 \cdot 10^{-8}$  г.

5.  $1,675 \cdot 10^{-8}$  г      6. 66,5 мг (K);  $5,676 \cdot 10^{-3}$  г (Rb)      7. 21,8 г

8. 7,532 г (La); 0,0924 г (Lu)

9. предел обнаружения по излучению  $^{147}\text{Sm}$  равен  $5,234 \cdot 10^{-3}$  г.

10. 90 Бк/г

11. 0,05 мл

12.  $m_K = \frac{251}{\varphi\lambda} \frac{100}{\omega} \frac{A}{N_A} = 1,393$  г

13. 924,4 мг

14. 2,664 г

15. 24%

16.  $C(\text{Lu}^{3+}) = 1$  моль/л.

17.  $C(\text{Sm}^{3+}) = 1$  моль/л

18. 417 МБк/г

19.  $5,66 \cdot 10^{-6}$  г изотопа  $^{63}\text{Cu}$  или  $8,2 \cdot 10^{-6}$  г меди (регистрация излучения  $^{64}\text{Cu}$ )

20.  $0,31 \pm 0,06$  г

21.  $0,035 \pm 0,002$  %

22. 7,95%

23. Стандарт, содержащий 0,6 г бора, поглощает 28% потока нейтронов, а анализируемый препарат поглощает 42% потока. Содержание бора в анализируемом препарате 0,9 г.

24. 83,3 мг

25. 0,0017 моль/л; Решение №1 (метод изотопного разбавления). В

анализируемом растворе находилось  $m_x$  г марганца, в раствор внесли

$m_0 = 0,002 \cdot 0,01 \cdot 55 = 0,0011$  г меченного марганца, и осадили  $m_1$  г марганца.

Внесенная активность  $A_0 = 90 \cdot 10^3$  Бк, активность осадка  $A_1 = 44,226 \cdot 10^6$   $m_1$ ;

$m_x = m_1(A_0/A_1) - m_0 = 9,35 \cdot 10^{-4}$  г;  $C(\text{Mn}^{2+}) = 9,35 \cdot 10^{-4} / (55 \cdot 0,01) = 0,0017$  моль/л

Решение №2. Удельные активности (в расчете на г или моль элемента) в растворе

до осаждения и в осадке одинаковы:  $90000 / (m_x + 0,002 \cdot 0,01 \cdot 55) = 44,226 \cdot 10^6$  и

$m_x = 9,35 \cdot 10^{-4}$  г.

26.  $7,5 \cdot 10^{-6}$  моль

27. 71,5 мл

28. 0,2 моль/л

29. 0,005 моль

30. 0,03 моль/л

31. 0,15 моль/л

32. Решение. Искомое количество вещества атомов цинка  $v_x = [v_1(A_0/A_1) - v_0]$ , где  $v_1$  – кол-во вещества цинка в осадке,  $v_0$  – кол-во вещества цинка в  $\text{ZnSO}_4$ ,  $A_0$  и

$A_1$  – регистрируемые активности раствора до выделения осадка и осадка, соответственно.  $A_0 = 1000 \cdot 50 = 50000$  имп/мин;  $A_1 = 50000 - 517 \cdot 58 = 20014$  имп/мин;  $v_1 = 0,00004$  моль,  $v_0 = 0,00004$  моль;

$v_x = 5,993 \cdot 10^{-5}$  моль;  $C(\text{Zn}^{2+}) = 1,198 \cdot 10^{-3} \cong 0,0012$  моль/л

**33.** 1,8 моль/л

**34.** Для определения малых количеств веществ используется один из вариантов метода изотопного разбавления. Пусть в 30 мл анализируемого раствора содержится  $x$  моль иттрия. Объемную скорость счета радиоактивного раствора обозначим  $A_{\text{уд},0}$ . После внесения 2 мл 0,001 моль/л радиоактивного раствора удельная скорость счета (в расчете на моль) раствора в первой пробирке стала равна:  $A_{\text{уд},1} = (2 \cdot 10^{-6} A_{\text{уд},0}) / (x + 2 \cdot 10^{-6})$ ; удельная скорость счета раствора во второй пробирке  $A_{\text{уд},2} = (4 \cdot 10^{-6} A_{\text{уд},0}) / (x + 4 \cdot 10^{-6})$ . После экстрагирования одинаковых количеств иттрия ( $v$ ) удельные радиоактивности органических фаз равны соответствующим удельным скоростям счета растворов:  $A_1 = 2315 \cdot 2 / v = (2 \cdot 10^{-6} A_{\text{уд},0}) / (x + 2 \cdot 10^{-6})$ ;  $A_2 = 3501 \cdot 2 / v = (4 \cdot 10^{-6} A_{\text{уд},0}) / (x + 4 \cdot 10^{-6})$ . Решив систему уравнений, находим  $x = 4,20195 \cdot 10^{-6}$  (моль). Концентрация иттрия  $C(\text{Y}^{3+}) = 4,20195 \cdot 10^{-6} / 0,03 = 1,4 \cdot 10^{-4}$  моль/л

**35.**  $2,84 \cdot 10^{-4}$  моль/л

**36.**  $1,6 \cdot 10^{-4}$  моль/л. Решение. Пусть в 10 мл анализируемого раствора содержится  $x$  моль ионов железа. Мольную скорость счета раствора (имп/(мин·моль)) обозначим  $A_0$ . В первой пробирке после внесения 2 мл 0,002 моль/л радиоактивного раствора находится  $(x + 0,000004)$  моль  $\text{Fe}^{3+}$ , активность раствора пробирке  $A_1 = A_0 \cdot (x + 0,000004)$  имп/мин. Во второй пробирке после внесения 1 мл 0,002 моль/л радиоактивного раствора находится  $(x + 0,000002)$  моль  $\text{Fe}^{3+}$ , активность раствора  $A_2 = A_0 \cdot (x + 0,000002)$  имп/мин. Активность осадка в каждой пробирке равна  $A_0 \cdot 0,000002$  имп/мин. Регистрируемая активность раствора над осадком:

в первой пробирке  $1539 \cdot 13 = A_0 \cdot (x + 0,000004) - A_0 \cdot 0,000002$ ;

во второй пробирке  $684 \cdot 13 = A_0 \cdot (x + 0,000002) - A_0 \cdot 0,000002$ .

Решая систему, получаем  $x = 1,6 \cdot 10^{-6}$ ;  $C(\text{Fe}^{3+}) = 1,6 \cdot 10^{-6} / 0,01 = 1,6 \cdot 10^{-4}$  моль/л

**37.**  $5,7 \cdot 10^{-4}$  моль

**38.** 4,9%

**39.** 3,62 мг ( $3,77 \cdot 10^{-5}$  моль). Решение. По отношению к сульфат-ионам барий находится в избытке. Решение сводится к нахождению избытка  $\text{Ba}^{2+}$ , попавшему в фильтрат. В фильтрат попало  $x$  мг бария, после добавления 100 мг  $\text{BaCl}_2$  в фильтрате оказалось  $(x + 100 \cdot 137 / 208)$  мг, в осадке –  $(20 \cdot 137 / 233)$  мг. В расчете на барий удельные активности фильтрата и осадка равны друг другу:  $[6615 / (x + 100 \cdot 137 / 208)] = [618 / (20 \cdot 137 / 233)]$ . Вычисляем  $x$  и находим, что количество вещества ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  в исходном растворе равно  $3,769 \cdot 10^{-5}$  моль.

**40.** 0,135 моль/л

**41.** Ответ: 2,02 моль/л

**42.** В осадке  $5 \cdot 10^{-5}$  моль иода. С радионуклидом в раствор добавлено  $10^{-6}$  моль иода. Получаем уравнение  $[(3,24 \cdot 10^5) / (x + 10^{-6})] = 2760 / (5 \cdot 10^{-5})$ . Его решение дает  $x = 5,87$  ммоль;  $m(\text{NaI}) = 880$  мг

**43.** 112 мг

**44.** 0,0105 моль/л

**45.** В контрольной пробе было 20 ммоль церия и  $3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,15 = 4,5 \cdot 10^{-4}$  моль (0,45 ммоль) оксалат-ионов. В осадке  $\text{Ce}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$  содержится 0,30 ммоль церия. Активность этого препарата, по условию задачи, равна 1560 имп/мин. Т.о., в

каждую анализируемую пробу раствора добавляли церий-141 с регистрируемой активностью  $1560 \cdot 20 / 0,3 = 104000$  имп/мин. Пусть в первом пробе было  $x$  моль церия. После прибавления 1 мл 0,15 моль/л раствора  $H_2C_2O_4$  в осадке оказалось 0,1 ммоль церия. Количество вещества ионов церия в первой пробе:  $x = 104000 \cdot 0,1 / 1220 = 8,52$  ммоль.

Пусть во второй пробе было  $y$  моль церия, в осадке оказалось 0,2 ммоль. Количество вещества церия во второй пробе:  $y = 104000 \cdot 0,2 / 2408 = 8,64$  ммоль. Среднее содержание 8,6 ммоль.

46. 28,2 мкг

47. Мольные удельные регистрируемые активности растворов  $AgNO_3$  до и после выделения части серебра в виде  $AgBr$  одинаковы. Пусть в реакцию вступило по  $x$  моль ионов  $Ag^+$  и  $Br^-$ . Тогда  $3 \cdot 3295 / (3 \cdot 10^{-6}) = 72 \cdot 103 / (3 \cdot 10^{-6} - x)$ .  $x = 7,5 \cdot 10^{-4}$  моль.  
 $\omega(Br^-) = 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot 80 \cdot 100\% / (0,01 \cdot 101) = 0,0059\%$

48. 0,25 моль/л

49. 0,0125 моль/л

50. 5 мг

51.  $3,6 \cdot 10^{-3}$  моль/л

52. 0,0508 мг

53. К раствору соли магния добавили  $10^{-3}$  моль фосфата аммония (избыток), в котором содержится 31 мг фосфора. Общая активность 31000 имп/мин. В осадке оказалась активность  $31000 - 16600 = 14400$  имп/мин, т.е. осадок содержит 14,4 мг фосфора. Масса магния в осадке (следовательно, и в исходном растворе) равна  $14,4 \cdot 24 / 31 = 11,1$  мг

54. 0,025 моль/л

55. 267 раз

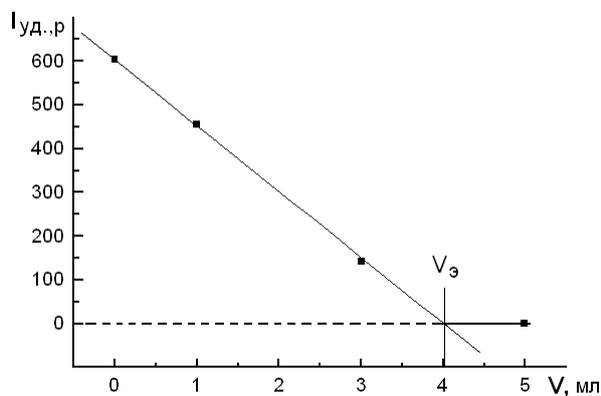
56. 60

57. ~1130 раз

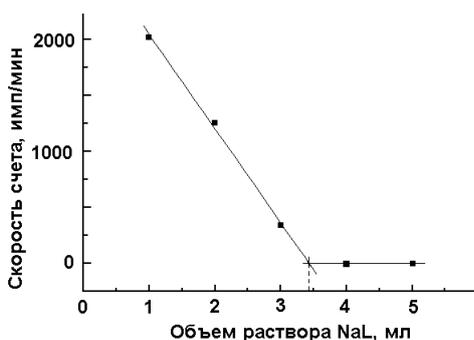
58.  $2 \cdot 10^{-4}$  моль/л

59. Исходная активность  $2 \cdot 10^{-3}$  моль цинка равна 99600 имп/мин. Радиоактивность диска 498 имп/мин. Содержание Zn в покрытии:  $498 \cdot 2 \cdot 10^{-3} / 99600 = 10^{-5}$  моль, т.е.  $65 \cdot 10^{-5}$  г. Толщина покрытия:  $65 \cdot 10^{-5} / (7 \cdot \pi \cdot 0,6^2) = 8,2 \cdot 10^{-5}$  см = 0,82 мкм

60.  $2,17 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>



61. Решение: Внося поправки на изменение объема, определяем объемную скорость счета раствора: 603, 455 и 142 имп/(мин·мл), соответственно. По линейной зависимости ( $I_{уд.р} = 602,159 - 150,265 \cdot V$ ) находим эквивалентный объем  $V_э = 4,007$  мл. Количество вещества фосфат-ионов ионов в растворе  $2,67 \cdot 10^{-6}$  моль, концентрация  $8,9 \cdot 10^{-5}$  моль/л



62.  $1,29 \cdot 10^{-4}$  моль/л

63.  $5 \cdot 10^{-4}$  моль (0,05 моль/л)

64. 0,005 моль/л

65.  $3,5 \cdot 10^{-8}$  моль

66. 0,025 моль/л

67. 127,5 мг

68. Решение. Удельные массовые активности (или скорости счета, измеренные в строго одинаковых условиях)  $Sr_3(PO_4)_2$  в

осадке и в насыщенном растворе равны друг другу. Пусть  $s$  – растворимость (г/мл)  $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2$ ,  $V$ - объем раствора над осадком (мл),  $m$ - масса осадка (г). Тогда  $(A_{\text{ос}}/m) = (A_p/Vs)$  и  $s = A_p m / A_{\text{ос}} V$ . Регистрируемая активность осадка, учитывая чрезвычайно низкую растворимость  $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2$ , равна регистрируемой активности раствора  $\text{SrCl}_2$ :  $A_{\text{ос}} = 17050 \cdot 50 \cdot 100 = 8,525 \cdot 10^7$  имп/мин;  $m=0,227$  г;  $V=50$  мл;  $A_p=52 \cdot 50=2600$  имп/мин;  $s = 1,384 \cdot 10^{-7}$  г/мл  $= 3,048 \cdot 10^{-7}$  моль/л.

Равновесные концентрации ионов  $C(\text{Sr}^{2+})$  и  $C(\text{PO}_4^{3-})$  в насыщенном растворе равны  $3 \cdot 3,048 \cdot 10^{-7}$  и  $2 \cdot 3,048 \cdot 10^{-7}$  моль/л, соответственно.  $\text{ПР} = [f_+ C(\text{Sr}^{2+})]^3 [f_- C(\text{PO}_4^{3-})]^2$ , где  $f_+$  и  $f_-$  - коэффициенты термодинамической активности катиона и аниона, соответственно. Усредненный коэффициент  $f$  можно, в первом приближении, вычислить по ур-ю Дебая-Хюккеля  $\lg f = -0,5117 \cdot z_+ \cdot z_- \cdot I^{1/2}$ , где  $I$  – ионная сила раствора,  $z$  – заряды ионов. Для 0,001 моль/л раствора  $\text{NaClO}_4$   $I = 0,001$ , коэффициенты  $f_+ = f_- \cong 0,8$  (табличные значения  $f_+ = 0,87, f_- = 0,73$ ).

$$\text{ПР} \cong (0,8 \cdot 3 \cdot 3,048 \cdot 10^{-7})^3 (0,8 \cdot 2 \cdot 3,048 \cdot 10^{-7})^2 \cong 1 \cdot 10^{-31}$$

**69.**  $9,8 \cdot 10^{-9}$  г/мл

**70.** Ионная сила рассматриваемых разбавленных растворов  $I \leq 0,000001$ , коэффициенты термодинамической активности ионов  $f \rightarrow 1$ . Можно считать, что значение ПР равно произведению равновесных концентраций ионов  $\text{Ag}^+$  и  $\Gamma^-$ . Пусть в насыщенном растворе содержится  $x$  моль  $\text{AgI}$ . Тогда равновесные концентрации катиона и аниона (до внесения дополнительного количества ионов серебра):  $x = (8 \cdot 10^{-17})^{1/2} = 8,944 \cdot 10^{-9}$  моль/л. Мольные удельные активности твердой фазы и насыщенного раствора одинаковы. Общая активность 100 мл раствора равнялась  $8,944 \cdot 10^{-9} \cdot 0,1 \cdot 1,88 \cdot 10^{12} \cong 1682$  Бк.

После добавления раствора  $\text{AgNO}_3$  концентрация ионов  $\text{Ag}^+$  увеличивается до  $10^{-6}$  моль/л, равновесие смещается в сторону образования осадка, концентрация аниона уменьшается до значения  $C' = 8 \cdot 10^{-17} / 10^{-6} = 8 \cdot 10^{-11}$  моль/л. Общая активность 100 мл раствора после внесения  $\text{Ag}^+$ :  $1682 \cdot (8 \cdot 10^{-11} / 8,944 \cdot 10^{-9}) \cong 15$  Бк.

**71.**  $1,678 \cdot 10^{-5}$  моль/л; ПР =  $1,1 \cdot 10^{-10}$

**72.** Удельная скорость счета раствора  $\text{AgNO}_3$  до осаждения (в расчете на 1 моль) равна  $8409 \cdot 100 \cdot 50 / (0,01 \cdot 0,05) = 8,409 \cdot 10^{10}$  имп/(мин·моль); скорость счета раствора над осадком - 3700 имп/мин. Т.о., в 100 мл раствора содержится ионов серебра.  $v(\text{Ag}^+) = 3700 / (8,409 \cdot 10^{10}) = 4,4 \cdot 10^{-8}$  моль.

**73.**  $1,54 \cdot 10^{-6}$  г

**74.** Равновесные концентрации ионов  $\text{Pb}^{2+}$  и  $\text{CrO}_4^{2-}$ :  $C = 2,164 \cdot 10^{-7}$  моль/л;

$$\text{ПР} = (0,62 \cdot C)^2 = 1,8 \cdot 10^{-14}$$

**75.**  $1,59 \cdot 10^{-6}$  моль/л

**76.**  $9,6 \cdot 10^{-9}$  моль

**77.**  $2,19 \cdot 10^{-7}$  г

**78.**  $1,775 \cdot 10^{-3}$  моль/л

**79.**  $3,5 \cdot 10^{-9}$  моль/л

**80.** 22125 и 665 Бк.

**81.**  $3,813 \cdot 10^{-3}$  мг/мл

**82.** не менее 40 МБк/г

**83.** 21,5 МБк/г

**84.**  $2,53 \cdot 10^{-4}$  г/мл

**85.** 0,586 МБк/г

**86.** можно

**87.** Ответ:  $1,67 \cdot 10^{-5}$  мл.

**88.** Сначала, используя приведенное в условии уравнение зависимости давления паров иода от температуры и данные о скоростях счета газовой фазы, находим связь между содержанием иода в паре и радиоактивностью пара. Используя эту связь, рассчитываем плотности пара  $\text{I}_2\text{g}$  при этих температурах. В предположении мономолекулярного состава паров  $\text{I}_2\text{g}$  при этих температурах находим уравнение зависимости давления насыщенного пара от температуры над расплавленным  $\text{I}_2\text{g}$ .

Оно имеет вид:  $\lg p = 7,65 - 1930/T$ . По этому уравнению находим, что давления насыщенных паров IBr при температурах 311,3, 319,2 и 339 К равны, соответственно, 32, 54 и 146 мм рт.ст.

89. 0,0167 г/л

90.  $D = 1,2 \cdot 10^{-10}$  см<sup>2</sup>/с. Исходя из экспериментальных данных, находим значения  $(l \cdot 10^{-2})^2$  и  $\lg I$  (табл.)

$(l \cdot 10^{-2})^2$	1,5	2,0	2,7	3,3	4,4	5,5
$\lg I$	2,875	2,732	2,505	2,255	1,653	1

Используя график линейной зависимости  $\lg I$  от  $(l \cdot 10^{-2})^2$ , находим тангенс угла наклона  $\operatorname{tg} \theta = 1,1 \cdot 10^{-3}$ . Коэффициент диффузии:

$$D = 0,1086 / (t \cdot \operatorname{tg} \theta) = 0,1086 / (4,1 \cdot 10^4 \operatorname{tg} \theta) = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$$

91.  $1,29 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с. Продолжительность диффузии  $t = 30 \cdot 3600 = 1,08 \cdot 10^5$  с.

$$D = -\lg [(\pi^2/8)(I_0/I)] l^2 / 1,071 \cdot t = 0,3085 \cdot 4,84 / (1,071 \cdot 1,08 \cdot 10^5) = 1,29 \cdot 10^{-5} \text{ (см}^2/\text{с)}$$

92. 17 ч. Решение. Используем соотношение  $D = -\lg [(\pi^2/8)(I_0/I)] l^2 / 1,071 \cdot t = 2 \cdot 10^{-5}$ . Необходимо, чтобы  $I_0/I$  по меньшей мере было равно 0,5. Поэтому получаем уравнение  $2 \cdot 10^{-5} = \{-\lg [(\pi^2/8) 0,5] 2,5^2\} / 1,071 t$  и

$$t = 2,142 \cdot 10^{-5} / \{-\lg [(\pi^2/8) 0,5] 6,25\} = 6,12 \cdot 10^4 \text{ с} = 17 \text{ ч}$$

93. в 27,6 раза больше при использовании длинных капилляров.

94. Заряд  $z$  диффундирующих ионов равен:  $z = 0,0257U/D$ , где  $U$  – подвижность иона, а  $D$  – коэффициент диффузии. Используя это соотношение, находим, что  $z = 1,96$ . Таким образом, заряд ионов полония равен +2.

95. 6,6 м<sup>2</sup>/г

96. Относительная удельная поверхность осадка  $1,17 \cdot 10^{-3}$  г/г. Решение. Исходная радиоактивность раствора составила  $5,6 \cdot 10^5$  имп/мин. В растворе находилось  $1,5 \cdot 10^{-2}$  г  $\text{Ce}(\text{IO}_3)_4$ . После поверхностного изотопного обмена, в котором приняли участие  $x$  г  $\text{Ce}(\text{IO}_3)_4$ , за счет первой быстрой стадии изотопного обмена, объемная активность раствора снизилась с 5600 до 4400 имп/(мин·мл). Так как общая радиоактивность церия-141 должна остаться неизменной, можно составить уравнение  $5,6 \cdot 10^5 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} = 4,4 \cdot 10^5 (1,5 \cdot 10^{-2} + x)$ . Решив его, находим  $x = 4,1 \cdot 10^{-4}$ . В расчете на 1 г  $\text{Ce}(\text{IO}_3)_4$  это составит  $4,1 \cdot 10^{-4} / 0,35 = 1,17 \cdot 10^{-3}$  г/г.

97. 7885:12000 = 0,66. Только 2 атома хлора из 3 сохраняют связь с атомом железа; отщепляется один из атомов хлора  $\text{FeCl}_3$

98. 0,825 МБк/г (в расчете на 1 г  $\text{FeCl}_3$ ).

99. Активность 1 мг продукта гидролиза равна 435 имп/мин;  $435/8700 = 0,05$ .

Следовательно, расщеплению подверглось 95% связей Al-Cl.

100.  $t_+ = 0,45$ ;  $t_- = 0,55$

101.  $t = 0,134$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лукьянов В.Б., Бердоносков С.С., Богатырев И.О., Заборенко К.Б., Иофа Б.З. Радиоактивные индикаторы в химии. Основы метода. М.: Высшая школа, 1985, 287 с.
2. Лукьянов В.Б., Бердоносков С.С., Богатырев И.О., Заборенко К.Б., Иофа Б.З. Радиоактивные индикаторы в химии. Проведение эксперимента и обработка результатов. М.: Высшая школа, 1977, 280 с.
3. Практикум «Основы радиохимии и радиоэкологии»// Под редакцией М.И. Афанасова, М.: Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2008, 90 с.
4. Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н. Радиоактивность окружающей среды. Теория и практика. М.: БИНОМ, 2006, 286 с.
5. Бенман И.Н. Радиоактивность и радиация. Радиохимия, том I. М.: Онтопринт, 2011, 397 с.
6. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009), М., Роспотребнадзор, 2009, 100 с.
7. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности, (ОСПОРБ 99/2010), М., Роспотребнадзор, 2010, 83 с.
8. Козлов В.Ф. // Справочник по радиационной безопасности М., Энергоатомиздат, 1991, 192 с.
9. Машкович В.П., Кудрявцев А.В. // Защита от ионизирующих излучений. М., Энергоиздат, 1995, 496 с.
10. Хольнов Ю.В. и др. // Оцененные значения ядерно-физических характеристик радиоактивных нуклидов. Справочник. М., Энергоиздат, 1982, 311 с.
11. Гусев Н.Г., Дмитриев П.П. // Квантовое излучение радиоактивных нуклидов. Справочник. М., Атомиздат, 1977, 400 с.

Характеристики радионуклидов [10]

Нуклид	Получение и сечение ядерной реакции, барн*	Период полураспада $T_{1/2}$	Тип распада	Энергия $E$ и выход на распад $p$			
				частицы		$\gamma$ -кванты	
				$E$ , кэВ	$p$ , %	$E$ , кэВ	$p$ , %
1*	2	3*	4	5	6	7	8
$^3_1\text{H}$ , (Т)	$^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ ; 70	12,26 года	$\beta^-$	18,6	100	нет	
$^{14}_6\text{C}$	$^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ ; 1,81	5700 лет	$\beta^-$	156	100	нет	
$^{22}_{11}\text{Na}$	$^{24}\text{Mg}(d,\alpha)^{22}\text{Na}$ ;	2,60 года	$\beta^+$ (90%) $\Xi\Xi$ (10%)	546	90	511*	180
						1274	100
$^{24}_{11}\text{Na}$	$^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$ ; 0,53	15,0 ч	$\beta^-$	1390	100	1368	100
						2754	100
$^{32}_{15}\text{P}$	$^{31}\text{P}(n,\gamma)^{32}\text{P}$ ; 0,172 $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$ ; 0,154	14,4 сут	$\beta^-$	1710	100	нет	
$^{35}_{16}\text{S}$	$^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$ ; 0,19	87 сут	$\beta^-$	167	100	нет	
$^{36}_{17}\text{Cl}$	$^{35}\text{Cl}(n,\gamma)^{36}\text{Cl}$ ; 30	$3,1 \cdot 10^5$ лет	$\beta^-$ , $\Xi\Xi$	710	98	нет	
$^{40}_{19}\text{K}$	в природной смеси изотопов 0,0118%	$1,3 \cdot 10^9$ лет	$\beta^-$ (89%) $\Xi.3.$ (11%)	1312	89	1460	11
$^{42}_{19}\text{K}$	$^{41}\text{K}(n,\gamma)^{42}\text{K}$ ; 1,2	12,4 ч	$\beta^-$	1997 3521	19 81	1524	19
$^{45}_{20}\text{Ca}$	$^{44}\text{Ca}(n,\gamma)^{45}\text{Ca}$ ; 0,72	163 сут	$\beta^-$	257	100	нет	
$^{51}_{24}\text{Cr}$	$^{50}\text{Cr}(n,\gamma)^{51}\text{Cr}$ ; 16	28,7 сут	$\Xi\Xi$	нет		320	10
$^{52}_{25}\text{Mn}$	$^{52}\text{Cr}(p,n)^{52}\text{Mn}$	5,6 сут	$\beta^+$ (28%) $\Xi\Xi$ (72%)	574	28	511*	56
						744	87
						935	94
						1434	100
						+другие	
$^{56}_{25}\text{Mn}$	$^{55}\text{Mn}(n,\gamma)^{56}\text{Mn}$ ; 13	2,6 ч	$\beta^-$	735 1037 2848	15 28 56	847 1811 2112	99 27 14
				+слабые		+другие	
$^{59}_{26}\text{Fe}$	$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$ ; 0,98 $^{59}\text{Co}(n,p)^{59}\text{Fe}$ ; 0,006	45 сут	$\beta^-$	273 465	45 53	1099 1292	56 43
				+слабые		+другие	
$^{58}_{27}\text{Co}$	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ ; 0,23	71 сут	$\beta^+$ (15%) $\Xi\Xi$ (85%)	475	15	511*	30
						811	99
						+слабые	
$^{60}_{27}\text{Co}$	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$ ; 37	5,27 года	$\beta^-$	318	100	1173 1333	100 100

\* 1 барн =  $10^{-28}$  м<sup>2</sup>

\* - в столбцах 1 и 3 в скобках указаны короткоживущие дочерние изотопы и их периоды полураспада; сведения об излучении в этих случаях относятся к равновесной смеси материнского и дочернего изотопов

511\* - фотоны, появляющиеся при аннигиляции  $\beta^+$

1*	2	3*	4	5	6	7	8
$^{64}_{29}\text{Cu}$	$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$ ; 4,3	12,7 ч	$\beta^-$ (37%) $\beta^+$ (18%) $\Xi\Xi$ (45%)	578 653	37 18	511*	36
$^{65}_{30}\text{Zn}$	$^{64}\text{Zn}(n,\gamma)^{65}\text{Zn}$ ; 0,77	244 сут	$\Xi\Xi$ (98,5%) $\beta^+$ (1,5%)	330	1,5	511* 1116	3,0 51
$^{74}_{33}\text{As}$	$^{75}\text{As}(n,2n)^{74}\text{As}$	17,8 сут	$\beta^-$ (34%) $\beta^+$ (28%) $\Xi\Xi$ (38%)	716 939 1351 1535	15 25 19 3	511* 596 634	56 59 15
$^{76}_{33}\text{As}$	$^{75}\text{As}(n,\gamma)^{76}\text{As}$ ; 4,3	26,3 ч	$\beta^-$	1216	8	560	45
				2404	35	657	6
				2963	51	1216	4
				+другие		+другие	
$^{82}_{35}\text{Br}$	$^{81}\text{Br}(n,\gamma)^{82}\text{Br}$ ; 3,1	36,3 ч	$\beta^-$	264	2	554	71
				444	98	619	43
						698	28
						776	84
						828	24
						1044	27
						1317	28
				+ другие		+ другие	
$^{86}_{37}\text{Rb}$	$^{85}\text{Rb}(n,\gamma)^{86}\text{Rb}$ ; 0,91	18,8 сут	$\beta^-$	698 1774	9 91	1077	9
$^{89}_{38}\text{Sr} +$ $(^{90\text{m}}\text{Y})$	$\text{U}(n,f)^{89}\text{Sr}$	50,6 сут (16 с)	$\beta^-$	1492	100	нет	
$^{90}_{38}\text{Sr}$	$\text{U}(n,f)^{90}\text{Sr}$	28,7 года	$\beta^-$	546	100	нет	
$^{90}_{39}\text{Y}$		64 ч	$\beta^-$	2274	100	нет	
$^{91}_{39}\text{Y}$	$\text{U}(n,f)^{91}\text{Y}$	59 сут	$\beta^-$	1544	~100	1204	0,3
$^{95}_{40}\text{Zr} +$ $(^{95\text{m}}\text{Nb})$	$\text{U}(n,f)^{95}\text{Zr}$ ; $^{94}\text{Zr}(n,\gamma)^{95}\text{Zr}$ ; 0,08	64 сут (90 ч)	$\beta^-$	366	55	724	44
				399	44	757	55
				+другие		+слабые	
$^{95}_{41}\text{Nb}$		35 сут	$\beta^-$	160	100	766	100
$^{106}_{44}\text{Ru} +$ $(^{106}\text{Rh})$	$\text{U}(n,f)^{106}\text{Ru}$	367 сут (30 с)	$\beta^-$	39	100	513	20
				2407	10	622	10
				3029	8		
				3541	79		
				+другие		+слабые	
$^{110\text{m}}_{47}\text{Ag}$ $(^{110}_{47}\text{Ag})$	$^{109}\text{Ag}(n,\gamma)^{110\text{m}}\text{Ag}$ ; 3	250 сут (25 с)	$\beta^-$	84	67	657	94
				531	32	763	23
				2235	5	884	73
				2893	95	937	34
						1384	26
						1500	15
				+другие		+ другие	

1*	2	3*	4	5	6	7	8
$^{111}_{47}\text{Ag}$	$^{110}\text{Pd}(\text{d},\text{n})^{111}\text{Ag}$	7,5 сут	$\beta^-$	686 783 1082	7 1 92	245 342	1 7
$^{124}_{51}\text{Sb}$	$^{123}\text{Sb}(\text{n},\gamma)^{124}\text{Sb}$ ; 4,4	60 сут	$\beta^-$	211 611 1579 2302	8 53 5 21	606 645 722 1691	98 7 11 49
$^{131}_{53}\text{I}$	$^{130}\text{Te}(\text{n},\gamma)^{131}\text{Te}$ ; 0,2 $^{131}\text{Te} \rightarrow \beta^- \rightarrow ^{131}\text{I}$ $\text{U}(\text{n},\text{f})^{131}\text{I}$	8,05 сут	$\beta^-$	248 334 606	2 7 90	284 364 637	6 81 7
				+другие		+другие	
$^{134}_{55}\text{Cs}$	$^{133}\text{Cs}(\text{n},\gamma)^{134}\text{Cs}$ ; 30	2,06 года	$\beta^-$	89 415 658	27 3 70	567 604 797	23 97 93
				+другие		+другие	
$^{137}_{55}\text{Cs} +$ $^{137\text{m}}_{56}\text{Ba}$	$\text{U}(\text{n},\text{f})^{137}\text{Cs}$	30 лет (2,6 мин)	$\beta^-$	512 1173	95 5	662	85
$^{133}_{56}\text{Ba}$	$^{133}\text{Cs}(\text{d},2\text{n})^{133}\text{Ba}$	10,7 года	$\Xi\Xi$	нет		81 303 356	34 19 63
				+другие		+другие	
$^{140}_{56}\text{Ba}$	$\text{U}(\text{n},\text{f})^{140}\text{Ba}$	12,8 сут	$\beta^-$	454 567 872 991 1005	25 10 4 36 25	30 162 305 424 537	13 6 4 3 24
				+слабые		+слабые	
$^{140}_{57}\text{La}$	$^{140}\text{Ba} \rightarrow \beta^- \rightarrow ^{140}\text{La}$ $^{139}\text{Ln}(\text{n},\gamma)^{140}\text{La}$ ; 8,2	40 ч	$\beta^-$	1260 1344 1412 1677 2164	23 44 5 20 7	328 487 751 815 867 925 1596	20 44 4 23 6 7 95
				+другие		+другие	
$^{141}_{58}\text{Ce}$	$^{140}\text{Ce}(\text{n},\gamma)^{141}\text{Ce}$ ; 0,6	32,5 сут	$\beta^-$	436 581	69 31	145	48
$^{144}_{58}\text{Ce}$	$\text{U}(\text{n},\text{f})^{144}\text{Ce}$	284 сут	$\beta^-$	185 238 318	20 5 75	134	11
				+ слабые		+ слабые	
$^{144}_{59}\text{Pr}$	$^{144}\text{Ce} \rightarrow \beta^- \rightarrow ^{144}\text{Pr}$	17 мин	$\beta^-$	810 2300 2996	1 1 98	696 2185	1,3 0,8
				+слабые		+слабые	
$^{155}_{63}\text{Eu}$	$^{154}\text{Sm}(\text{n},\gamma)^{155}\text{Sm}$ ; 5,5 $^{155}\text{Sm} \rightarrow \beta^- \rightarrow ^{155}\text{Eu}$	4,7 года	$\beta^-$	141 160 246	48 27 13	87 105	36 24
				+другие		+другие	

1*	2	3*	4	5	6	7	8
$^{170}_{69}\text{Tm}$	$^{169}\text{Tm}(n,\gamma)^{170}\text{Tm}$ ; 130	129 сут	$\beta^-$	884 968	24 76	84	3
$^{185}_{74}\text{W}$	$^{184}\text{W}(n,\gamma)^{185}\text{W}$ ; 2,1	75 сут	$\beta^-$	432	~100	слабые	
$^{192}_{77}\text{Ir}$	$^{191}\text{Ir}(n,\gamma)^{192}\text{Ir}$ ; 1120	74 сут	$\beta^-$ (96%) $\Xi\text{З}$ (4%)	256	6	296	29
				536	41	308	29
				672	49	317	82
						+другие	
$^{203}_{80}\text{Hg}$	$^{202}\text{Hg}(n,\gamma)^{203}\text{Hg}$ ; 5	46,7 сут	$\beta^-$	212	100	279	82
$^{204}_{81}\text{Tl}$	$^{203}\text{Tl}(n,\gamma)^{204}\text{Tl}$ ; 8	3,78 года	$\beta^-$ (98%) $\Xi\text{З}$ (2%)	763	98	нет	
$^{210}_{83}\text{Bi}$	В ряду $^{238}\text{U}$ $^{210}\text{Pb} \rightarrow \beta^- \rightarrow ^{210}\text{Bi}$	5,0 сут	$\beta^-$	1161	100	нет	
$^{210}_{84}\text{Po}$	$^{210}\text{Bi} \rightarrow \beta^- \rightarrow ^{210}\text{Po}$	138 сут	$\alpha$	5304	100	слабые	
$^{222}_{86}\text{Rn}$	$^{226}\text{Ra} \rightarrow \alpha \rightarrow ^{222}\text{Rn}$	3,82 сут	$\alpha$	5490	100	слабые	
$^{231}_{90}\text{Th}$	$^{235}\text{U} \rightarrow \alpha \rightarrow ^{231}\text{Th}$	25,6 ч	$\beta^-$	140	2	25	14
				206	12	84	8
				288	85	90	1
				+слабые		+слабые	
$^{232}_{90}\text{Th}$	в природной смеси изотопов 100%	$1,40 \cdot 10^{10}$ лет	$\alpha$	3954 4013	23 77	слабые	
$^{234}_{90}\text{Th}$	$^{238}\text{U} \rightarrow \alpha \rightarrow ^{234}\text{Th}$	24,1 сут	$\beta^-$	22	1	63	4
				60	5	93	5
				104	21	+слабые	
				199	73		
$^{234m}_{91}\text{Pa}$	$^{234}\text{Th} \rightarrow \beta^- \rightarrow ^{234m}\text{Pa}$	1,2 мин	$\beta^-$	2281	98	слабые	
				+слабые			
$^{234}_{91}\text{Pa}$	$^{234m}\text{Pa} \rightarrow \text{И.П.} \rightarrow ^{234}\text{Pa}$	6,7 ч	$\beta^-$	424	5	101	57
				484	50	131	20
				514	7	226	11
				654	17	569	13
				711	5	882	26
				1183	6	926	21
				+другие		946	20
$^{235}_{92}\text{U}$	в природной смеси изотопов 0,72%	$7,04 \cdot 10^8$ лет	$\alpha$	4367	17	144	11
				4397	54	186	57
				+другие		+другие	
$^{238}_{92}\text{U}$	в природной смеси изотопов 99,28%	$4,47 \cdot 10^9$ лет	$\alpha$	4150	23	слабые	
				4197	77		

Таблица П. 2

Величины  $t_\gamma$  для различных значений доверительной вероятности  $\gamma$   
и числа степеней свободы  $f$

$f$	Доверительная вероятность $\gamma$			$f$	Доверительная вероятность $\gamma$		
	0,90	0,95	0,99		0,90	0,95	0,99
1	6,31	12,71	63,66	11	1,80	2,20	3,11
2	2,92	4,30	9,93	12	1,78	2,18	3,06
3	2,35	3,18	5,84	13	1,77	2,16	3,01
4	2,13	2,78	4,60	14	1,76	2,15	2,98
5	2,02	2,57	4,03	15	1,75	2,13	2,95
6	1,94	2,45	3,71	20	1,73	2,09	2,85
7	1,90	2,37	3,50	30	1,70	2,04	2,90
8	1,86	2,31	3,36	60	1,67	2,00	2,66
9	1,83	2,26	3,25	120	1,66	1,98	2,62
10	1,81	2,23	3,17	$\infty$	<b>1,64</b>	<b>1,96</b>	<b>2,58</b>

Таблица П.3

Значения  $\chi^2$  для 5%-ного уровня значимости

Число степеней свободы, $f$	$\chi^2_{0,05}$	Число степеней свободы, $f$	$\chi^2_{0,05}$	Число степеней свободы, $f$	$\chi^2_{0,05}$
1	3,841	11	19,675	21	32,671
2	5,991	12	21,026	22	33,924
3	7,815	13	22,362	23	35,172
4	9,488	14	23,685	24	36,415
5	11,070	15	24,996	25	37,652
6	12,592	16	26,296	26	38,885
7	14,067	17	27,587	27	40,113
8	15,507	18	28,869	28	41,337
9	16,919	19	30,144	29	42,557
10	18,307	20	31,410	30	43,773

Таблица П. 4

Максимальные пробеги  $R_{\max}$ , слой половинного ослабления  $d_{1/2}$  и коэффициенты ослабления  $\mu$   $\beta$ -излучения с максимальной энергией  $E_{\beta, \max}$  в алюминии [8]

$E_{\beta, \max}$ , МэВ	$R_{\max}$ , мг/см <sup>2</sup>	$d_{1/2}$ , мг/см <sup>2</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> /Г	$E_{\beta, \max}$ , МэВ	$R_{\max}$ , мг/см <sup>2</sup>	$d_{1/2}$ , мг/см <sup>2</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> /Г
0,01	0,16	0,1	6930	0,70	250	30	23
0,02	0,70	0,3	2310	0,80	310	37	19
0,05	3,9	0,8	866	0,90	350	45	15
0,10	14	1,8	385	1,00	410	53	13
0,20	42	3,9	178	1,25	540	74	9,4
0,30	76	7,0	99	1,50	670	97	7,1
0,40	115	11,7	59	1,75	800	119	5,8
0,50	160	17,5	40	2,00	950	140	5,0
0,60	220	24,0	29	2,50	1220	173	4,0

Таблица П. 5

Линейные коэффициенты ослабления  $\mu'$  узкого пучка фотонов  
для алюминия и свинца в зависимости от энергии  $E$  [9]

$E$ , МэВ	$\mu'$ , см <sup>-1</sup>		$E$ , МэВ	$\mu'$ , см <sup>-1</sup>		$E$ , МэВ	$\mu'$ , см <sup>-1</sup>	
	Al	Pb		Al	Pb		Al	Pb
0,02	8,61	939	0,15	0,35	21,8	1,0	0,16	0,771
0,03	2,70	323	0,20	0,32	10,7	1,25	0,15	0,658
0,04	1,30	151	0,30	0,28	4,25	1,5	0,13	0,567
0,05	0,86	82,1	0,40	0,25	2,44	2,0	0,12	0,508
0,06	0,65	50,8	0,50	0,22	1,70	3,0	0,09	0,468
0,08	0,48	23,6	0,60	0,20	1,33	4,0	0,08	0,472
0,10	0,42	60,3	0,662	0,20	1,18	5,0	0,08	0,481
0,145	0,36	24,6	0,80	0,18	0,95	6,0	0,07	0,494

Таблица П. 6

Коэффициенты истинного поглощения  $\mu_e$  (см<sup>2</sup>/г) рентгеновского и  $\gamma$ -излучения  
в воздухе в зависимости от энергии фотонов  $E$  (МэВ) [9]

$E$	$\mu_e$	$E$	$\mu_e$	$E$	$\mu_e$	$E$	$\mu_e$	$E$	$\mu_e$
0,01	4,570	0,05	0,0374	0,15	0,0247	0,50	0,0298	1,3	0,0261
0,015	1,250	0,06	0,0283	0,20	0,0265	0,60	0,0295	1,5	0,0254
0,02	0,501	0,08	0,0231	0,25	0,0281	0,70	0,0292	2,0	0,0234
0,03	0,139	0,10	0,0227	0,30	0,0287	0,80	0,0287	3,0	0,0205
0,04	0,0616	0,125	0,0241	0,40	0,0294	1,00	0,0278	4,0	0,0193

Таблица П. 7

Керма-постоянные  $\Gamma_B$  (аГр·м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>·Бк<sup>-1</sup>) и гамма-постоянные  $\Gamma_\gamma$  (Р·см<sup>2</sup>·ч<sup>-1</sup>·МКи<sup>-1</sup>)  
некоторых радионуклидов [8,9]

Нуклид	$\Gamma_B$	$\Gamma_\gamma$	Нуклид	$\Gamma_B$	$\Gamma_\gamma$	Нуклид	$\Gamma_B$	$\Gamma_\gamma$
<sup>22</sup> Na	77	11,8	<sup>76</sup> As	16,7	2,55	<sup>137</sup> Cs+ <sup>137m</sup> Ba	21	3,2
<sup>24</sup> Na	111,9	18,1	<sup>82</sup> Br	87,1	13,3	<sup>133</sup> Ba	19	2,9
<sup>40</sup> K	4,8	0,74	<sup>86</sup> Rb	3,3	0,5	<sup>140</sup> Ba	7,5	1,13
<sup>42</sup> K	9,2	1,4	<sup>89</sup> Sr + <sup>89m</sup> Y	3·10 <sup>-3</sup>	5·10 <sup>-4</sup>	<sup>140</sup> La	76	11,6
<sup>51</sup> Cr	1,7	0,26	<sup>91</sup> Y	0,13	0,02	<sup>139</sup> Ce	11,8	1,8
<sup>52</sup> Mn	118	18,0	<sup>95</sup> Zr + <sup>95m</sup> Nb	27,1	4,14	<sup>141</sup> Ce	2,8	0,43
<sup>54</sup> Mn	30	4,6	<sup>95</sup> Nb	28	4,3	<sup>144</sup> Ce+ <sup>144</sup> Pr	1,78	0,27
<sup>56</sup> Mn	56	8,5	<sup>106</sup> Ru+ <sup>106</sup> Rh	7,6	1,16	<sup>144</sup> Pr	0,92	0,14
<sup>59</sup> Fe	41	6,2	<sup>110m</sup> Ag+ <sup>110</sup> Ag	101	15,4	<sup>155</sup> Eu	2,6	0,39
<sup>57</sup> Co	3,7	0,56	<sup>111</sup> Ag	0,98	0,15	<sup>170</sup> Tm	0,20	0,03
<sup>58</sup> Co	35	5,4	<sup>113m</sup> In	11,8	1,8	<sup>185</sup> W	2·10 <sup>-3</sup>	3·10 <sup>-4</sup>
<sup>60</sup> Co	84	12,8	<sup>113</sup> Sn+ <sup>113m</sup> In	18,3	2,8	<sup>192</sup> Ir	31	4,7
<sup>64</sup> Cu	7,4	1,13	<sup>124</sup> Sb	63	9,6	<sup>203</sup> Hg	8,5	1,3
<sup>65</sup> Zn	20	3,1	<sup>131</sup> I	14,1	2,16	<sup>226</sup> Ra*	55	8,4
<sup>74</sup> As	28	4,3	<sup>134</sup> Cs	57	8,7	<sup>241</sup> Am	0,92	0,14

\* - в равновесии с продуктами распада.

Таблица П.8

Нормализованные парциальные керма-постоянные  $\Gamma_{В,i}^*$  ( $\text{аГр}\cdot\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{Бк}^{-1}$ )  
и гамма-постоянные  $\Gamma_{Э,i}^*$  ( $\text{Р}\cdot\text{см}^2\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{МКи}^{-1}$ ) фотонов с энергией  $E_\gamma$  (МэВ) [11]

$E_\gamma$	$\Gamma_{В,i}^*$	$\Gamma_{Э,i}^*$									
0,03	5,74	0,876	0,08	2,44	0,373	0,4	15,0	2,292	0,9	32,6	4,98
0,04	3,42	0,522	0,10	2,96	0,452	0,5	18,9	2,89	1,0	35,6	5,44
0,05	2,58	0,394	0,15	4,76	0,727	0,6	22,6	3,45	1,5	48,6	7,42
0,06	2,30	0,351	0,20	6,81	1,040	0,7	26,2	4,00	2,0	59,7	9,11
0,07	2,32	0,354	0,30	11,0	1,679	0,8	29,4	4,89	3,0	78,8	12,0

Таблица П. 9

Дозовые факторы накопления для свинца  
(точечный изотропный источник в бесконечной среде) [9]

$E_\gamma$ , МэВ	$\mu d$											
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	10	15	20
0,13	1,40	1,59	2,06	2,46	2,88	3,38	3,99	4,77	5,82	9,21	39,7	220
0,15	1,29	1,40	1,59	1,70	1,77	1,82	1,86	1,91	1,95	2,05	2,36	2,83
0,2	1,15	1,18	1,23	1,25	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,33	1,37	1,40
0,3	1,10	1,13	1,21	1,26	1,30	1,34	1,37	1,40	1,42	1,47	1,56	1,64
0,4	1,11	1,17	1,29	1,38	1,45	1,51	1,57	1,62	1,67	1,76	1,95	2,11
0,5	1,14	1,22	1,38	1,50	1,61	1,71	1,80	1,89	1,96	2,10	2,42	2,69
0,6	1,14	1,22	1,41	1,57	1,69	1,80	1,90	2,00	2,10	2,28	2,65	2,97
0,8	1,14	1,28	1,53	1,74	1,91	2,08	2,24	2,39	2,54	2,83	3,44	4,00
1,0	1,16	1,31	1,61	1,87	2,10	2,32	2,52	2,75	2,96	3,37	4,30	5,17
2,0	1,21	1,39	1,76	2,12	2,47	2,83	3,20	3,58	3,97	4,76	6,80	8,89
3,0	1,23	1,39	1,73	2,09	2,46	2,86	3,29	3,76	4,25	5,31	8,39	12,0
4,0	1,25	1,41	1,74	2,11	2,49	2,92	3,40	3,92	4,50	5,80	10,1	16,1

Таблица П.10

Дозовые факторы накопления для алюминия (бетона\*)  
(точечный изотропный источник в бесконечной среде) [9]

$E_\gamma$ , МэВ	$\mu d$						
	1	2	4	7	10	15	20
0,1	2,9	5,8	13	25	57	130	290
0,2	2,9	5,5	12	27	73	230	500
0,4	2,5	4,5	9,9	22	48	120	220
0,5	2,37	4,24	9,47	21,5	38,9	80,8	141
1,0	2,02	3,31	6,57	13,1	21,2	37,9	58,5
2,0	1,75	2,62	4,62	8,05	11,9	18,7	26,3
3,0	1,64	2,32	3,78	6,14	8,65	13,0	17,7
4,0	1,53	2,08	3,22	5,01	6,88	10,1	13,4

\* - можно использовать для оценки значения фактора накопления в бетоне

Таблица П.11

Толщина защиты из свинца (см) в зависимости от кратности ослабления **K** и энергии  $\gamma$ -излучения (**широкий пучок**)

K	Энергия $\gamma$ -излучения, МэВ															
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,662	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25	1,5	2,0	3,0	4,0
1,5	0,02	0,05	0,12	0,21	0,32	0,39	0,45	0,48	0,58	0,66	0,74	0,89	1,0	1,2	1,4	1,4
2	0,03	0,08	0,19	0,34	0,36	0,65	0,75	0,80	0,97	1,1	1,2	1,5	1,7	2,0	2,2	2,2
5	0,06	0,17	0,42	0,76	1,1	1,5	1,7	1,8	2,1	2,4	2,7	3,2	3,7	4,4	4,7	4,7
8	0,08	0,21	0,54	0,97	1,4	1,9	2,1	2,3	2,7	3,1	3,4	4,1	4,7	5,5	5,9	5,9
10	0,08	0,24	0,59	1,1	1,6	2,0	2,3	2,5	3,0	3,4	3,8	4,5	5,2	6,0	6,5	6,5
20	0,11	0,30	0,76	1,4	2,0	2,6	3,0	3,2	3,8	4,3	4,8	5,7	6,6	7,6	8,3	8,2
30	0,12	0,34	0,86	1,5	2,3	3,0	3,4	3,6	4,3	4,8	5,4	6,4	7,4	8,6	9,3	9,3
40	0,14	0,37	0,93	1,7	2,5	3,2	3,6	3,8	4,6	5,2	5,8	6,9	8,0	9,2	10,0	10,0
50	0,14	0,39	0,98	1,8	2,6	3,4	3,8	4,0	4,8	5,5	6,1	7,3	8,4	9,7	10,6	10,6
60	0,15	0,40	1,0	1,8	2,7	3,5	4,0	4,2	5,0	5,7	6,4	7,6	8,7	10,1	11,0	11,0
80	0,16	0,43	1,1	2,0	2,9	3,7	4,2	4,5	5,4	6,1	6,8	8,1	9,3	10,8	11,8	11,7
100	0,17	0,45	1,2	2,1	3,0	3,9	4,4	4,7	5,6	6,4	7,1	8,4	9,7	11,3	12,3	12,3
200	0,20	0,52	1,3	2,4	3,5	4,5	5,1	5,4	6,4	7,3	8,1	9,6	11,1	12,8	14,0	14,0
500	0,24	0,60	1,5	2,7	4,0	5,2	5,9	6,2	7,4	8,4	9,4	11,1	12,8	14,9	16,3	16,3
1000	0,28	0,67	1,7	3,0	4,4	5,7	6,5	6,9	8,2	9,3	10,4	12,3	14,1	16,4	17,9	17,9
2000	0,31	0,74	1,9	3,3	4,9	6,3	7,1	7,6	9,0	10,2	11,3	13,4	15,5	17,9	19,6	19,6
5000	0,35	0,82	2,1	3,7	5,4	7,0	8,0	8,4	10,0	11,3	12,6	14,9	17,2	19,8	21,8	21,8
1·10 <sup>4</sup>	0,38	0,89	2,3	4,0	5,8	7,6	8,6	9,1	10,8	12,2	13,5	16,0	18,5	21,3	23,4	23,5
2·10 <sup>4</sup>	0,42	0,95	2,4	4,3	6,3	8,1	9,2	9,7	11,5	13,0	14,5	17,2	19,7	22,8	25,1	25,1
5·10 <sup>4</sup>	0,46	1,0	2,6	4,7	6,8	8,8	10,0	10,6	12,5	14,2	15,7	18,6	21,4	24,7	27,2	27,3
1·10 <sup>5</sup>	0,50	1,1	2,8	5,0	7,2	9,3	10,6	11,2	13,3	15,0	16,7	19,7	22,7	26,2	28,9	29,0
2·10 <sup>5</sup>	0,53	1,2	3,0	5,3	7,7	9,9	11,2	11,8	14,1	15,9	17,6	20,9	24,0	27,7	30,5	30,6
5·10 <sup>5</sup>	0,58	1,2	3,2	5,6	8,2	10,6	12,0	12,7	15,1	17,0	18,9	22,3	25,7	29,6	32,6	32,8
1·10 <sup>6</sup>	0,61	1,3	3,4	5,9	8,6	11,1	12,6	13,3	15,8	17,9	19,8	23,4	27,0	31,1	34,2	34,4