

## 4. Инертные газы: методы получения и свойства.

В настоящее время известно большое число радиоактивных изотопов благородных газов. Характеристики некоторых из них приведены в **табл. 1**. Для производства РБГ могут быть использованы различные ядерные реакции.

а.) Альфа -распад.

Радон получается как член  $4n+2$  природного радиоактивного ряда (**табл. 2**). При этом  $^{222}\text{Rn}$  - продукт распада уранового ряда, торон,  $\text{Tn}(^{220}\text{Rn})$ , - продукт распада ториевого ряда,  $^{232}\text{Th}$ , актинон,  $\text{An}(^{219}\text{Rn})$ , - продукт распада  $^{235}\text{U}$ . Все эманации являются  $\alpha$ -излучателями (чем короче период полураспада, тем выше энергия альфа-частиц). При своем распаде они, в свою очередь, образуют негазообразные продукты распада ("активный налет"), которые являются  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - излучателями. Несмотря на то, что все эманации обладают малыми периодами полураспада, они нашли широкое применение в диффузии, т.к. возникают из долгоживущих материнских изотопов. На практике радон получают на специальных приборах - эманаторах, которые используют или раствор соли радия, или твердые высокоэманерирующие соединения радия. Поскольку потери радона все время пополняются естественным образом, производство радона просто и широко доступно.

б.) Бета-распад.

Искусственно полученные радиоэлементы подвергаются бета-распаду и могут быть также использованы для создания атомов инертных газов. Некоторые газы и их материнские нуклиды приведены в **табл. 3**.

в.) Облучение нейтронами.

Инертные газы могут генерироваться в некоторых твердых телах путем облучения их нейтронами в ядерном реакторе. При этом используются ядерные реакции типа  $(n,p)$ ,  $(n,\alpha)$  и  $(n,\gamma)$ , а также реакция деления  $(n,f)$ . В **табл. 4** приведены инертные газы, получаемые облучением быстрыми нейтронами соединений, содержащих щелочные и щелочно-земельные элементы.

Возможные  $(n,f)$  ядерные реакции, идущие при облучении тепловыми нейтронами, приведены в табл.2-5. С помощью реакций деления образуются радиоактивные атомы галогенов, которые превращаются путем бета-распада в атомы стабильных инертных газов. В ходе облучения в реакторе стабильные инертные газы в результате вторичной нейтронной активации превращаются в радиоактивные инертные газы (**табл. 5**). В реакциях деления урана или тория несколько изотопов криптона и ксенона (например,  $^{88}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ) образуются среди большого числа других нуклидов. Методы отделения радиоактивного криптона и ксенона основаны на адсорбции на активном угле. Тяжелые инертные газы разделяют фракционной десорбцией.

Стоимость производства стабильного инертного газа находится в прямой зависимости от распространенности его в атмосфере (**табл.6**). Для большей наглядности уместно пояснить, что в  $1000 \text{ м}^3$  воздуха содержится  $9,34 \text{ м}^3$  аргона,  $18,18 \text{ л}$  неона,  $5,24 \text{ л}$  гелия,  $1,14 \text{ л}$  криптона и лишь  $86 \text{ см}^3$  ксенона. Аргон, неон, криптон и ксенон в настоящее время почти исключительно получают как побочные продукты при разделении воздуха; гелий получают из природных газов, где его содержание колеблется от десятых долей процента по объему до нескольких процентов. Технология получения благородных газов базируется на сжижении воздуха с последующей его ректификаций. Разделение их проводится адсорбцией на активных углях или цеолитах с последующей десорбцией. Сейчас все большее распространение начинают приобретать мембранные методы.

Обычно инертные газы представляют собой смесь стабильных изотопов (**табл. 7**). Их разделение проводят методами термодиффузии (т.е. диффузии в градиенте температур), газовой диффузии через пористые перегородки, фракционной дистилляции, электромагнитными методами, центрифугированием, разделением в высокоскоростной струе и др. способами.

Все инертные газы бесцветны, лишены запаха и состоят из одноатомных молекул. Инертность этих газов обусловлена насыщенностью внешней электронной оболочки: электронные конфигурации предельно замкнуты и максимально прочны. Инертные газы диамагнитны, что вытекает из замкнутого состояния их электронной оболочки.

Свойства благородных газов монотонно меняются с переходом от легкого гелия к тяжелому радону. Неуклонно возрастает радиус молекулы, число электронов вокруг ядра, причем с ростом числа слоев электронной оболочки ослабевает связь внешних электронов с ядром. Это усиливает способность молекулы к деформации, повышает поляризацию молекулы и способствует образованию диполя. Возрастающее деформируемость при последовательном переходе от легких и тяжелым благородным газам находит отражение в увеличении растворимости, адсорбции, сжимаемости, склонности к сжижению и т.п. Основные физические свойства инертных газов приведены в **табл. 3**.

В настоящее время издана обширная химия членов нулевой группы периодической системы [172], причем наиболее широко используемым соединением является тетрафторид ксенона. Существенное значение имеют и клатраты, получаемые в ходе кристаллизации органических веществ (например, гидрохинона) в атмосфере инертного газа, находящегося при высоком давлении. Атомы благородных газов располагаются в пустотах образовавшегося кристалла,

Ниже мы подробно рассмотрим диффузию и растворение инертных газов в твердых телах. Сейчас лишь коротко остановимся на проницаемости. Как известно, газы способны проникать через поверхности твердых тел: стекла, резины, полимерных пленок, металлов и др. Проницаемость газа через стекло быстро падает с повышением атомного веса диффузанта: так у неона константа проницаемости на два порядка, а у аргона - на семь порядков меньше, чем для гелия. Поток гелия через мягкое стекло примерно в 100 раз меньше потока через пирекс. Гелий быстро диффундирует через кварц при 1200°, тогда как поток аргона в этих условиях отсутствует.

Примечателен тот факт, что металлы группы платины совершенно непроницаемы для гелия вплоть до температур 1400-1600°. Палладий непроницаем для гелия даже при температуре красного каления. Аналогично ведут себя и другие металлы. Следует подчеркнуть, что отсутствие проницаемости благородных газов связано не с низкими значениями коэффициентов диффузии (если инертные газы ввести в металлы, например, с помощью ионного ускорителя, они диффундируют в нем достаточно быстро), а с практически полным отсутствием растворения инертных газов в металлах (так же как в большинстве других неорганических соединениях). Поэтому при изучении диффузии инертных газов в неорганических системах приходится прибегать к специальным способам введения их в твердое тело.

Инертные газы достаточно свободно проникают через полимерные пленки. Любопытно отметить, что проницаемость через резину не характеризуется обычной зависимостью константы проницаемости  $P$  от атомного веса:  $P$  для Ne меньше, чем для He, но затем по мере роста атомного веса константа проницаемости монотонно повышается. Из сказанного очевидно, почему метод проницаемости нашел применение для изучения полимеров с использованием всех инертных газов, для изучения стекол - гелия и неона, для металлов же этот метод применяется с использованием в качестве зонда не инертных газов, а водорода.



*Спелеология – аналог ДСА: группа товарищей спускается в пещеру, через некоторое время часть из них вылезает с противоположного конца. Измерив время пребывания в пещере и долю оставшихся в живых, мы можем судить о комфортности пещеры для путешествий. Некоторые спелеологи снабжены рациями. Пеленгуя их, мы можем отслеживать миграционную активность непосредственно внутри горы (радисты – атомы зонда, меченые радионуклидами).*

#### Литература.

1. Rutherford E.//Physik.Z., 2 (1901) 429
2. Curie M.//Dissertation, Paris, 1903
3. Kolowrat-Chervinski L.S.//Radium, A (1907) 317
4. Kolowrat-Chervinski L.S.// Compt. Rend. Acad. Sci., v.145 (1907) 425
5. Botwood B/B//Am. J. Sci., v.25 (1908) 269
6. Herohfinkel H.//Compt. Rend., v.149 (1909) 275
7. Hahn O., Muller O.//Z.Electrochem., v.29 (1923) 189
8. Hahn O.//Ann. Chem., v.440 (1924) 121
9. Hahn O.// Appl. Radiochem., Cornell University Press, Ithaca, N.Y. (1936) 191
10. Bilts M.//Z.Phys. Chem. (Leipzig), v. 126 (1927)
11. Becker A.//Ann. Physik /5/, v.1 (1929) 529
12. Erbacher O.//Z.Phys.Chem. (Leipzig), v.A149 (1930) 439
13. Muller H.//Z. Phis. Chem. (Leipzig), v.149 (1930) 257
14. Graue G.//Kolloid. Z., v.32 (1931) 403
15. Strausmann F.//Naturwissenschaften, v.19 (1931) 502
16. Fransis M.//Kolloid. Z., v. 59 (1932) 292
17. Werner O.//Z. Elektrochem., v.39 (1933) 611
18. Ja Heckter M.//Glastech. Ber., v. 12 (1934) 156
19. Jagitsch R.//Z. Phys. Chem. (Leipzig), v.A174 (1933)49
20. Numbrauer R.//Z. Phys. Chem. (Leipzig) v. A172 (1935) 64
21. Ewacher O.//Z. Phys. Chem. (Leipzig) v.B33 (1936) 47
22. Kittel H.//Z. Phys. Chem. (Leipzig) v.A178 (1936) 81
23. Born H.J.// Z. Phys. Chem. (Leipzig) v.A179 (1937) 256
24. Fricke R.//Ber. Dent. Chem. Ges. v. 70 (1937) 138
25. Fricke R.//Glemser O., Z. Phys. Chem. (Leipzig) v.B36 (1937) 27
26. Seith W.//Kupferle G., Z. Metallik., v.29 (1937) 218
27. Zimen K.E.//Naturwissenschaften, v.25 (1937) 429
28. Numbaner R., Frivke R.//Z. Phys. Chem. (Leipzig) v.176 (1937) 1
29. Sagottschew B.//Z. Phys. Chem. (Leipzig) v.176 (1936) 295
30. Bechonnek F.//Collec. Trans. Chim. (Chechoslovaque), v. 10 (1938) 60
31. Parchomenko F.//Collec. Trans. Chim. (Chechoslovaque), v. 10 (1938) 54
32. Коловрат-Червинский Л.С.//Труды радиевой экспедиции российской академии наук, 1918 9, Петроград.
33. Баранов В.И., Грачева Е.С.//Тр. Рад. ин-та, 2 (1936) 61
34. Баранов В.И., Грачева Е.С.//Тр. гос.рад.ин-та, 3(1937) 117
35. Никитин Б.А., Геринг Э.К.// Тр. Гос. рад. Ин-та, 4(1938) 318
36. Баранов В.И. Грачева В.С.//Известия АН СССР, (1936) 43

37. Грачева Е.С.//Тр. Гос. рад. Ин-та, 4 (1938) 238
38. Патнер А.П.//Тр, гос. рад, ин-т, 3 (1937) 135
39. Hecter M.//Glastechn. Ber., v.12 (1934) 156
40. Kurbatov J.D.//J.Phys. Chem., v.45 (1941) 851
41. Flugge S., Zimens K.E.//J.Phys. Chem., v.B42 (1939) 179
42. Zimens K.E.//J.Phys. Chem., v.A191 (1942) 1
43. Zimens K.E.//J.Phys. Chem., v.A192 (1943) 95
44. Zimens K.E.//J.Phys. Chem., v.A192 (1943) 1
45. Jagich R./Aktiv Kemi Mineral Geol., v.15A (1942) 37
46. Schroder W., Schrab H.//Z. Electrochem., 48 (1942) 241
47. Wickmann F.E.//Geol. Foren. Stockholm Forh., v.64 (1942) 465
48. Perry M.//J. Phys. Radium., v.6 (1947) 179
49. Fricke R.//Z. Anorg. Chem., v. 259 (1949) 299
50. Hahn O.//J. Chem. Soc. Suppl., v.2 (1949) 359
51. Kaweit H.//Z. Naturforsch., v.49 (1949) 140
52. Maortenson M., Lamm O.//Nucl. Sci. Abstr., v.2 (1949) 20
53. Jagoda H.//Nucl. Sci. Abstr., v.3 (1948) 17
54. Behonek F., Jech C.//Nature, v.166 (1950) 792
55. Gregory J.W., Moor bath S.//Trans. Farad. Soc., v.47 (1951) 844; v.47 (1951) 1064; v.48 (1952) 643
56. Jocker K.//Z. Anorg. Allsem. Chem., v.265 (1951) 49
57. Schreiner H., Oester R.// Chemiker Ztg., v.53 (1952) 233
58. Huttig G., Jobste H., Glawithsch G.//Monatsh. Chem., v.85 (1954) 976
59. Keiser H.//Z. Elektrochem., v.58 (1954) 601
60. Schreiner H., Glawitsch C.//Z. Metalik., v.45 (1954) 102
61. Gilletti B.S., Kulp J.I.//Ann. Minerologia, v.40 (1955) 481
62. Anderson J.S., Bevan D.J.M., Burden J.P.//Proc. Royal. Soc., v.A272, 1348; (1963) 15
63. Bussiere P.//Proc. 2nd Inf.Conf.Fine Particles (Boston), 1972, p69
64. Bussiere P., Clandel B., Renouf J.P., Trambonse Y., Pretre M.//J.Chem. Phys., v.58 (1961) 668
65. Баранов В.И., Новицкая А.П.//Радиохимия, 2 (1960) 485
66. Старик И.Е., Меликова О.С.//Радиохимия, т.1 (1959) 197
67. Kosov N.D., Cherdntsen V.V.//Joint Publ. Serv. (N.Y.), АЕС-тр.-4207 (1960) 19
68. Попретинский И.Ф.//Вопросы рудной геофизики, минералогии и охраны недр СССР, т.2 (1961) 105
69. Булашевич Ю.П. Карташов Н.П.//Изв. АН СССР, Физика земли, т.10 (1962) 71
70. Притчин В.//Атомная энергия, т.25 (1968) 324
71. Синицина М.Д., Жаброва Г.М., Рогинский С.З., Гордеев В.А.//Изв.АН СССР, Отд.хим.наук,(1959) 176
72. Жаброва Т.М., Шибанова М.Д.//Успехи химии, т.36 (1967) 1406
73. Заборенко К.Б., Бабешкин А.М., Боевска В.А.//Радиохимия, т.1 (1959) 336
74. Заборенко К.Б., Мелихов Л.Л., Портяной В.А.//Радиохимия, т. 14 (1969) 891
75. Бекман И.Н.//Ж.физ.хим., т.54 (1980) 2785
76. Заборенко К.Б., Поляков В.П., Шорошев Ю.Г.//Радиохимия, т.7 (1965) 324
77. Тэтнер Р., Заборенко К.Б.//Радиохимия, т.8 (1966) 482
78. Щербак Т.Н., Заборенко К.Б.//Радиохимия, т.21 (1979) №6, 894
79. Балек В., Заборенко К.Б.//Радиохимия, т.11 (1969) 436
80. Заборенко К.Б., Поляков В.П., Шорошев Ю.Г.//Радиохимия, т.7 (1965) 480
81. Оськина Т.Е., Заборенко К.Б., Цибанов Б.В.//Радиохимия, т. 16 (1974) 650
82. Заборенко К.Б., Мочалова Ю.З.//Радиохимия, т.10 (1968) 123
83. Щербак Т.И., Заборенко К.Б.//Радиохимия т.20 (1978) 290
84. Заборенко К.Б., Нитцольд Д., Бакеев Н.Ф.//Высокомолек. соед. А9 (1967) 240
85. Заборенко К.Б., Бекман И.Н.//Радиохимия, т.10 (1968) 268
86. Бекман И.Н., Заборенко К.Б.//Радиохимия, т.10, (1968) 382
87. Бекман И.Н.//Деп.ВИНИТИ, №1340-84
88. Бекмая И.Н., Швыряев А.А., Щербак Т.Н.//Радиохимия, т.29 (1987) 220
89. Капустин О.А., Заборенко К.Б.// Радиохимия, т.16 (1974) 618
90. Бекман И.Н., Швыряев А.А.//Диффузионные явления в полимерах, Черногловка, 1983, 60

91. Shviriaev A.A., Backman I.N., Balek V.//Termochim. Acta, v.11 (1987) 215
  92. Balek V.//J. Radional. Chem., v.2 (1969) 315
  93. Balek V.//J. Am. Ceram. Soc., v.53 (1970) 540
  94. Kriz J., Balek V.//Termochim. Acta., v.71 (1984) 175
  95. Kriz J., Balek V.//Termochim. Acta., v. 78 (1984) 377
  96. Kriz J., Beckman I.N., Balek V.//Termochim. Acta., v.92 (1985) 69
  97. Johns I.S., Newton A.S., Sullivan W.H.//Chicago Univ. Metallurgie lab., CC-327 (1942) 61
  98. Newton A.S., Wart J.C., Spedding F.H., Tomson O., Nottdorf R.W.//Nucleonics, v.4 (1949) 17
  99. Barnes R.S.//AERE-M/M-75 (1954) 10
  100. Zimen K.E., Schmelting P.//Z. Electrochem., v.58 (1954) 599
  101. Moodly W.E., Taylor A.J., Jonson J.R.//Oak Ridge. Nat. Lab., Tenn. ORNR-1778 (1955) 22
  102. Inthoff W., Zimen K.E.//Trans Chalm. Univ. Technol. (Goteburg) 1956, v.176, 16.
  103. Jech C.//Pros. First UNESCO Inter. Conf. Radioisotopes in Sci.Res. (Paris), v.2 (1957) 491
  104. Tobin J.W.//Acta met., v.7 (1959) 701
  105. Jech C., Int.//J. Appl. Radiation. Isotopes, v.8 (1960) 179
  106. Kennet T.J.//Thode H.G., Can. J. Phys., v.38 (1960) 945
  107. Chleck D.J.//Trans. Am. Nucl. Soc., v.5 (1962) 278
  108. Tolquessy J.//Nucl. Radiat. In chem. anal., SNTL, Bratislava-Praha, 1962.
  109. Check D.J.//Mahl R., Cuechare O., J. Appl. Radiat. Isot., v.14 (1963) 581-610
  110. Zimen K.E.//Trans. Chalmers. Univ. Technol. Gotheburg, v.175 (1956) 7
  111. Matzke H., Lindner R.//Z.Naturforsch., 150 (1960) 647
  112. Miller L.//Los Alamos Scien. Lab., M. Hex., LAMS (1960) 10
  113. Stans H.//Z. Naturforch., v 169 (1961) 1135
  114. Shiba S.//J. At. Energy Soc. Japan, v.3 (1969) 705, 763
  115. Kelly R.//Can. J. Chem., v.34 (1961) 2411
  116. Jech E.//Phys. Stat. Sol., v.2 (1962) 1299
  117. Morrison D.L., Barnes R.H., Elleman T.S., Sanderman D.N.//Trans.Am.Nucl.Soc., v.5 (1962)
- 235
118. Barnes R.C.//J.Nucl.Mater., v.11 (1964) 135
  119. Matzke H., Lindner R.//Atomenergie, v.9 (1964) 2
  120. Felix F.W.//Phys. Stat. Sol., v.27 (1968) 529
  121. Richerts G., Sorensen G.//Phys. Stat. Sol., v.32 (1969) 529
  122. Koss P.//Acta Phys. Austriaca, v.26 (1967) 251
  123. Balek V.//Chem. Listy, v.58 (1964) 1201
  124. Бекман И.Н.//Радиохимия, 29 (1987) 242
  125. Тепляков В.В., Бекман И.Н., Заборенко К.Б.//Радиохимия, 16 (1974) 283
  126. Бекман И.Н., Бровко А.П., Заборенко К.Б.//Радиохимия, 21 (1979) 531
  127. Shviryaev A.A., Bekman I.N., Balek V.//Thermochim Acta v.104 (1986) 255
  128. Kelly R.//Acta Met., v.12 (1964) 123
  129. Kelly R.//Phys. Stat. Sol., v.21 (1967) 451
  130. Cians H.//Z. Naturforsch., v.170 (1962) 297
  131. Cians H.//Z. Naturforsch., v. 20a (1965) 1298
  132. Бекман И.Н., Швыряев А.А.//Радиохимия, 29 (1987) 384
  133. Бекман И.Н.//Диффузия в дефектных средах, в кн. Балеk В., Тельдеши Ю., Эманационно-термический анализ, М. Мир (1986) 315
  134. Амирханов Х.И., Брандт С.Б., и др.//Сб.статей: Сохранность радиогенного аргона в горных породах, Махачкала(1958)
  135. Герлинг Э.К., Морозова И.М.//Геохимия, №7 (1958) 615
  136. Мурын А.Н., Банасевич С.Н., Морозова И.М.//Геохимия, т.10 (1962) 874
  137. Левский Л.К.//Геохимия №6 (1963) 544
  138. Морозова И.М., Ашкинадзе Г.Ш.//Миграция атомов редких газов в минералах. Наука, Л. (1971) 120
  139. Readhead A.//Vacuum, 12 (1962) 203
  140. Carter G.//Vacuum, 12 (1962) 245
  141. Jech C.//Nature, 178 (1956) 1343
  142. Farrell G., Grant W.A., Erents K., Carter G.//Vacuum, v.16, (1966) 295
  143. Brandt W.M.//Int. J. Heat. Mass. Transfer., 13 (1970) 1559

144. Carter G., Evans V.I., Farrell G.//Vacuum, 25 (1975) 197  
 145. Кунин Л.Л., Головин А.М., Суровой Ю.М., Хохрин В.М.//Проблемы дегазации металлов. Наука, М. (1972) 195  
 146. Купряжкин А.Я., Попов Е.В., Волобуев П.В.//Ж.техн.физ., т.49 (1975) 2214  
 147. Donnelly S.E., Arman D.G.//Vacuum, 27 (1977) 21  
 148. Mc Carroll B.J.//Appl. Phys., 40 (1969) 1  
 149. Cham R.//Surface Science, 43 (1974) 651  
 150. Kornelsen E.V., Sinha M.K.//J. Appl. Phys., 40 (1969) 2888  
 151. Jaquard A., Perrot F.L.//Comp. Rend., 139 (1904) 789  
 152. Watson H.C.//J.Chem.Soc., v.97 (1910) 810  
 153. Richardson O.W., Ditte R.C.//Phil. Mag., 22 (1911) 704  
 154. Johnson J.B., Burt R.C.//J.Opt.Soc.Am.. 6 (1922) 734  
 155. Lombard V.J, Chem. Phys., 25 (1926) 567  
 156. Barrer R.M.//Nature, 140 (1937) 106  
 157. Barrer R.M.//Trans. Farad. Soc., 35 (1939) 623  
 158. Barrer R.M.//Trans. Farad. Soc., 36 (1940) 644  
 159. Чалых А.Е.//Диффузия в полимерных системах, М: Химия (1987)  
 160. Pohl-Puling// J. Chem. Abstr., v. 50 (1956) 3924  
 161. Финкель Э.Э.// Ж.физ.хим., т.31 (1957) 1650  
 162. Бекман И.Н., Бровка А.П.//Радиохимия, т.23 (1981) 275  
 163. Бекман И.Н.//Радиохимия, т.23 (1981) 281  
 164. Бекман И.Н.//Радиохимия, т.23 (1981) 425  
 165. Бекман И.Н., Бунцева И.М.//Радиохимия, т.23 (1981) 434  
 166. Бекман И.Н.//Радиохимия, т.23 (1981) 760  
 167. Бекман. И.Н., Швыряев А.А.//Радиохимия, 24 (1982) 126  
 168. Жаброва Г.М., Шибанова М.Д.//Успехи химии, т.36 (1968) 436  
 169. Балек В., Заборенко К.Б.//Радиохимия, т.10 (1969) 436  
 170. Balk V., Beckman I.N.//Shem. Lysty, v. 79 (1985) 19  
 171. Балек В., Тельдеша Ю.//Эманационно-термический анализ. Применение в химии твердого тела, аналитической химии и технике: Пер. с англ. -М.: Мир (1986) 368  
 172. Cook G.A.//Argon, helium and rare gases, v. 1-2, L., (1961)  
 173. Краткая химическая энциклопедия, М.: "Советская энциклопедия" (1963) 266  
 174. Тепляков В.В., Дургарьян С.Г.//Высокомолек. соед., A26 (1984) 1498.

Табл. 1. Радиоизотопы инертных газов.

Нуклид инертного газа	Период полураспада	Тип распада и энергия излучения	Метод получения
1	2	3	4
$^6\text{He}$	-0,8 с	$-\beta$ , 3,5 МэВ	$^9\text{Be}(n,\alpha)$
$^{23}\text{Ne}$	38 с	$-\beta$ , 4,4 МэВ $\gamma$ , 439 КэВ	$^{22}\text{Ne}(n,\gamma)$ ; $^{23}\text{Na}(n,p)$ ; $^{26}\text{Mg}(n,\alpha)$
$^{24}\text{Ne}$	3,38 мин	$-\beta$ , 2,0 МаВ $\gamma$ , 874 кэВ	$^{22}\text{Ne}(t,p)$
$^{37}\text{Ar}$	35,1 сут	Эл.захват	$^{34}\text{S}(\alpha,n)$ ; $^{37}\text{Cl}(d,2n)$ ; $^{37}\text{Cl}(p,n)$ ; $^{39}\text{K}(d,\alpha)$ ; $^{40}\text{Ca}(n,\alpha)$
$^{39}\text{Ar}$	269 лет	$-\beta$ , 0,6 МэВ	$^{38}\text{Ar}(n,\gamma)$ ; $^{39}\text{K}(n,p)$
$^{41}\text{Ar}$	1,83 ч	$-\beta$ , 1,2 МэВ $\gamma$ , 1,3 МэВ	$^{40}\text{Ar}(d,p)$ ; $^{40}\text{Ar}(n,\gamma)$ ; $^{41}\text{K}(n,p)$
$^{42}\text{Ar}$	33 года	$-\beta$ , 0,6 МэВ	$^{41}\text{Ar}(n,\gamma)$ ; материнский $^{42}\text{K}$
$^{76}\text{Kr}$	14,6 ч	Эл. захват	$^{89}\text{Y}$ (р. скалывание)
$^{77}\text{Kr}$	1,24 ч	$+\beta$ , 1,9 МэВ $\gamma$ , 130 кэВ	$^{74}\text{Ce}(\alpha,n)$
$^{79}\text{Kr}$	34,9 ч 50 с	Эл.захват $\gamma$ , 130 кэВ	$^{76}\text{Se}(\alpha,n)$ ; $^{79}\text{Br}(d,n)$ ; $^{78}\text{Kr}(n,\gamma)$
$^{81}\text{Kr}$	$2,1 \cdot 10^5$ лет 13,3 с	Эл,захват $\gamma$ : 191 кэВ	$^{81}\text{Br}(p,n)$ ; $^{80}\text{Kr}(n,\gamma)$ ; дочерн. $^{81}\text{Rb}$
$^{83\text{m}}\text{Kr}$	1,83 ч	$\gamma$ , 9 кэВ	$^{80}\text{Se}(\alpha,n)$ ; $^{82}\text{Kr}(d,p)$ ; $^{82}\text{Kr}(n,\gamma)$ , рентгеновское облучение $^{85}\text{Kr}$ , деление U, дочерний $^{83}\text{Br}$ и $^{83}\text{Rb}$

$^{85m}\text{Kr}$	4,48 ч	$-\beta$ , 0,8 МэВ $\gamma$ , 151 кэВ	$^{82}\text{Se}(\alpha, n)$ ; $^{84}\text{Kr}(n, \gamma)$ ; $^{85}\text{Rb}(n, p)$ ; $^{88}\text{Sr}(n, \alpha)$ ; U(n, f), дочерний $^{85}\text{Br}$
$^{85}\text{Kr}$	10,76 лет	$-\beta$ , 0,7 МэВ	$^{84}\text{Kr}(n, \gamma)$ ; U(n, f)
$^{87}\text{Kr}$	76,3 мин	$-\beta$ , 3,5 МэВ $\gamma$ , 403 кэВ	$^{86}\text{Kr}(n, \gamma)$ ; $^{87}\text{Rb}(n, p)$ , деление U
$^{88}\text{Kr}$	2,8 ч	$-\beta$ , 0,5 МэВ $\gamma$ , 2,39 МэВ	U(n, f); Th(n, f)
$^{89}\text{Kr}$	3,18 мин	$-\beta$ , 3,5 МэВ $\gamma$ , 221 кэВ	U(n, f); Th(n, f)
$^{90}\text{Kr}$	32,3 с	$-\beta$ , 26 МэВ $\gamma$ , 1,19 МэВ	U(n, f); Pu(n, f)
$^{91}\text{Kr}$	8,6 с	$-\beta$ , 4,6 МэВ $\gamma$ , 109 кэВ	U(n, f); Pu(n, f)
$^{92}\text{Kr}$	1,84 с	$-\beta$ , 4,6 МэВ $\gamma$ , 142 кэВ	U(n, f); Th(n, f); Pu(n, f)
$^{93}\text{Kr}$	1,29 с	$-\beta$ , 6,2 МэВ $\gamma$ , 1,12 МэВ	U(n, f); Pu(n, f)
$^{94}\text{Kr}$	0,2 с	$-\beta$	U(n, f);
$^{121}\text{Xe}$	38,8 мин	$+\beta$ , 2,8 МэВ $\gamma$ , 253 кэВ	$^{127}\text{I}(p, 7n)$
$^{122}\text{Xe}$	20,1 час	Эл. захват $\gamma$ , 350 кэВ	$^{127}\text{I}(p, 6n)$
$^{123}\text{Xe}$	2,08 ч	Эл. захват $+\beta$ , 1,5 МэВ	$^{127}\text{I}(p, 5n)$
$^{125m}\text{Xe}$	5,7 с	$\gamma$ , 112 кэВ	$^{127}\text{I}(\alpha, 6n)$ , $^{125}\text{Cs}$ , дочерний $^{125}\text{Cs}$
$^{125}\text{Xe}$	16,8 ч	Эл. захват $+\beta$ , $\gamma$ 188 кэВ	$^{122}\text{Te}(\alpha, n)$ , $^{124}\text{Xe}(n, \gamma)$
$^{127m}\text{Xe}$	70 с	$\gamma$ , 125 кэВ	$^{127}\text{I}(\alpha, 4n)$ , $^{127}\text{Cs}$ , дочерний $^{127}\text{Cs}$
$^{127}\text{Xe}$	36,4 сут	Эл. захват $\gamma$ , 188	$^{124}\text{Te}(\alpha, n)$ , $^{127}\text{I}(\alpha, 2n)$ , $^{127}\text{I}(p, n)$ $^{126}\text{Xe}(n, \gamma)$
$^{129m}\text{Xe}$	8,89 сут	$\gamma$ , 40 кэВ	$^{128}\text{Xe}(n, \gamma)$
$^{131m}\text{Xe}$	12,0 сут	$\gamma$ , 164 кэВ	$^{131}\text{Xe}(n, n)$ , деление урана
$^{133m}\text{Xe}$	2,2 сут	$\gamma$ , 233 кэВ	$^{132}\text{Xe}(n, \gamma)$ , деление урана
$^{133}\text{Xe}$	5,29 сут	$-\beta$ , 0,3 МэВ $\gamma$ , 81 кэВ	$^{132}\text{Xe}(n, \gamma)$ , $^{132}\text{Xe}(d, p)$ , $^{134}\text{Xe}(n, 2n)$ $^{130}\text{Te}(\alpha, n)$ , $^{133}\text{Cs}(n, p)$ , $^{136}\text{Ba}(n, \alpha)$ , деление U
$^{135m}\text{Xe}$	15, 3 мин	$\gamma$ , 527 кэВ	$^{136}\text{Xe}(n, 2n)$ , $^{134}\text{Xe}(n, \gamma)$ , $^{138}\text{Ba}(n, \alpha)$ , деление U
$^{135}\text{Xe}$	9,17 ч	$-\beta$ , 0,9 МэВ $\gamma$ , 250 кэВ	$^{134}\text{Xe}(n, \gamma)$ , $^{134}\text{Xe}(d, p)$ , $^{136}\text{Xe}(n, 2n)$ $^{138}\text{Ba}(n, \alpha)$ , деление U
$^{137}\text{Xe}$	3,83 мин	$-\beta$ , 4,1 МэВ $\gamma$ , 455 кэВ	$^{136}\text{Xe}(n, \gamma)$ , деление U
$^{138}\text{Xe}$	14,1 мин	$-\beta$ , 0,8 МэВ $\gamma$ , 258 кэВ	Деление U
$^{139}\text{Xe}$	39,7 с	$-\beta$ , 4,6 МэВ $\gamma$ , 219 кэВ	Деление U, Th
$^{140}\text{Xe}$	13,5 с	$-\beta$ , 2,6 МэВ $\gamma$ , 806 кэВ	Деление U, Th
$^{141}\text{Xe}$	1,79 с	$-\beta$ , 4,9 МэВ $\gamma$ , 119 кэВ	Деление U
$^{143}\text{Xe}$	0,83 с	$-\beta$ $\gamma$ , 572 кэВ	Деление U
$^{206}\text{Rn}$	5,67 мин	$\alpha$ , 6,26 Эл. захват	$^{197}\text{Au}(^{14}\text{N}, 5n)$
$^{207}\text{Rn}$	9,3 мин	Эл. захват A, 6,126 МэВ $\gamma$ , 345 кэВ	$^{197}\text{Au}(^{14}\text{N}, 4n)$
$^{208}\text{Rn}$	24,4 мин	$\alpha$ , 6,14 МэВ Эл. захват	Скальвание Th, Pb ( $^{12}\text{C}$ , осколки)

$^{209}\text{Rn}$	30 мин	Эл. Захват + $\beta$ $\alpha$ , 6,039 МэВ	Скалывание Th, Pb ( $^{12}\text{C}$ , осколки)
$^{210}\text{Rn}$	2,4 ч	$\alpha$ , 6,04 МэВ Эл. Захват $\gamma$ , 458 кэВ	Скалывание Th, Pb ( $^{12}\text{C}$ , осколки)
$^{211}\text{Rn}$	14,6 ч	Эл. Захват $\alpha$ , 5,783 МэВ $\gamma$ , 684 кэВ	Скалывание Th, Pb ( $^{12}\text{C}$ , осколки)
$^{212}\text{Rn}$	24 мин	$\alpha$ , 6,264 МэВ	Скалывание Th, Pb ( $^{12}\text{C}$ , осколки)
$^{219}\text{Rn}$	396 с	$\alpha$ , 6,819 МэВ $\gamma$ , 271 кэВ	Член ряда $^{235}\text{U}$
$^{220}\text{Rn}$	55,6 с	$\alpha$ , 6,288 МэВ	Член ряда $^{232}\text{Th}$
$^{221}\text{Rn}$	25 мин	$-\beta, \alpha$ 6,0 МэВ	Член ряда $^{232}\text{Th}$ (p, осколки)
$^{222}\text{Rn}$	3,824 сут	$\alpha$ , 5,4896 МэВ	Член ряда $^{238}\text{U}$

Табл. 2. Нуклиды инертных газов, возникающие в результате  $\alpha$ -распада (в скобках указан  $T_{1/2}$  соответствующего нуклида)

Схема распада	Активный налёт ( $T_{1/2}$ самого долгоживущего нуклида)
$^{226}\text{Ra}$ (1600 лет) $\xrightarrow{\alpha, 4,78 \text{ МэВ}}$ $^{222}\text{Rn}$ (3,82 сут) $\xrightarrow{\alpha, 5,5 \text{ МэВ}}$	$^{218}\text{Po}$ , $^{214}\text{Pb}$ , $^{214}\text{Bi}$ , $^{214}\text{Po}$ , $^{220}\text{Tl}$ , $^{210}\text{Pb}$ (22 года), $^{210}\text{Bi}$ , $^{210}\text{Po}$
$^{228}\text{Th}$ (1,91 года) $\xrightarrow{\alpha, 5,42 \text{ МэВ}}$ $^{224}\text{Ra}$ (3,64 сут) $\xrightarrow{\alpha, 5,68 \text{ МэВ}}$ $^{220}\text{Rn}$ (55,6 с) $\xrightarrow{\alpha, 6,29 \text{ МэВ}}$	$^{216}\text{Po}$ , $^{212}\text{Pb}$ (10,6 час), $^{212}\text{Bi}$ , $^{212}\text{Po}$ , $^{208}\text{Tl}$
$^{227}\text{Ac}$ (21,8 года) $\xrightarrow{-\beta, 0,045 \text{ МэВ}}$ $^{227}\text{Th}$ (18,7 сут) $\xrightarrow{\alpha, 6,04 \text{ МэВ}}$ $^{223}\text{Ra}$ $\xrightarrow{\alpha}$ $^{219}\text{Rn}$ (3,96 с) $\xrightarrow{\alpha, 6,82 \text{ МэВ}}$	$^{215}\text{Po}$ , $^{215}\text{Bi}$ (764 мин), $^{211}\text{Pb}$ , $^{211}\text{Bi}$ , $^{211}\text{Po}$ , $^{207}\text{Tl}$

Табл. 3. Схемы распада, в результате которых получают нуклиды инертных газов, возникающие в результате  $\beta$ -распада (в скобках указан  $T_{1/2}$  соответствующего нуклида).

$^{83}\text{Se}$ $\xrightarrow{-\beta, (69\text{с}); -\beta(25 \text{ мин})}$ $^{83}\text{Br}$ (2,4 час) $\xrightarrow{-\beta}$ $^{83}\text{Kr}$ (1,9 ч) $\xrightarrow{\gamma}$
$^{133}\text{Te}$ $\xrightarrow{-\beta, (54 \text{ мин}); -\beta(12,5 \text{ мин})}$ $^{133}\text{I}$ (20,8 ч) $\xrightarrow{-\beta}$ $^{133}\text{Xe}$ (5,6 сут) $\xrightarrow{-\beta}$
$^{135}\text{I}$ (6,7 ч) $\xrightarrow{-\beta}$ $^{135}\text{Xe}$ $\xrightarrow{\gamma, (15,6 \text{ мин}); -\beta(9,1 \text{ мин})}$

Табл. 4. Нуклиды инертных газов, возникающие в результате реакций  $M(n,p)\Gamma^*$  и  $M(n,p)\Gamma^*$

Реакция $M(n,p)\Gamma^*$		Реакция $M(n,\alpha)\Gamma^*$	
M	$\Gamma^*$	M	$\Gamma^*$
Li	$^6\text{He}$	Be	$^6\text{He}$
Na	$^{23}\text{Ne}$	Mg	$^{23}\text{Ne}$
K	$^{38}\text{Ar}$ , $^{41}\text{Ar}$	Ca	$^{37}\text{Ar}$ , $^{41}\text{Ar}$
Rb	$^{85\text{m}}\text{Kr}$ , $^{87}\text{Kr}$	Sr	$^{85\text{m}}\text{Kr}$
Cs	$^{133\text{m}}\text{Xe}$ , $^{133}\text{Xe}$	Ba	$^{135}\text{Xe}$ , $^{133}\text{Xe}$

Табл. 5. Нуклиды инертных газов, возникающие в результате ядерной реакции  $(n,\gamma)$ .

$X(n,\gamma)X^* \xrightarrow{-\beta} \Gamma$ ( $\Gamma$ – стабильный газ)	Радиоактивные газы, полученные по реакции $\Gamma(n,\gamma)\Gamma^*$ (в скобках – период полураспада)
F $\xrightarrow{11 \text{ с}}$ $^{20}\text{Ne}$	
Cl $\xrightarrow{37 \text{ мин}}$ $^{38}\text{Ar}$	$^{39}\text{Ar}$ (269 лет)
Br $\xrightarrow{4,5 \text{ час}}$ $^{80}\text{Kr}$	
Br $\xrightarrow{36 \text{ час}}$ $^{82}\text{Kr}$	$^{83\text{m}}\text{Kr}$ (1,9 час)
I $\xrightarrow{25 \text{ мин}}$ $^{128}\text{Xe}$	$^{129}\text{Xe}$ (8,0 сут)



Табл. 6. Содержание инертных газов в атмосфере [173].

Содержание	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn
Объёмные %	0,00046	0,00161	0,9326	0,000108	0,000008	$6 \times 10^{-18}$

Табл. 7. Стабильные изотопы и их относительное содержание в атмосфере

Элемент	Средний атомный вес	Массовое число изотопа	Относительное содержание, об.%
Гелий (He)	4,003	3	0,00013
		4	100
Неон (Ne)	20,183	20	90,92
		21	0,257
		22	8,82
Аргон (Ar)	39,944	36	0,337
		38	0,063
		40	99,60
Криптон (Kr)	83,80	78	0,354
		80	2,27
		82	11,56
		83	11,55
		84	56,90
		86	17,37
Ксенон (Xe)	131,30	124	0,096
		126	0,090
		128	1,919
		129	26,44
		130	4,08
		131	21,18
		132	26,89
		134	10,44
		136	8,87

Табл. 8 Основные физические свойства инертных газов [173, 174].

Элемент	Атомный вес	Атомный Диаметр, А	Атомный диаметр в крист. А	Потенционизации, В	Плотность г/л 0°C, 760 мм рт ст	При 760 мм рт ст		Критическое состояние			Силовая пост. в потенц. Леннарда Джонса, (ε/к)эф °К
						T <sub>кип.</sub> °С	T <sub>плав.</sub> °С	Темпер. °С	Давл. кг/см <sup>2</sup>	Плотн кг/л	
He	4,0026	1,78	2,44	24,58	0,17846	-264,93	-272,6*	-267,90	2,335	0,0693	9,5
Ne	20,123	2,30	3,2	21,56	0,90035	-245,9	-248,6	-228,6	27,75	0,4835	27,1
Ar	39,948	3,00	3,84	15,76	1,7839	-185,9	-189,3	-122,43	49,59	0,5308	122,3
Kr	83,80	3,22	3,96	14,00	3,745	-153,2	-157,1	-63,8	55,6	0,909	176,6
Xe	131,30	3,52	4,36	12,13	5,851	-108,1	-111,8	+16,59	60,16	1,155	231,9
Rn	222	3,77	-	10,75	9,96	ок. -63	ок. -71	+104	64,6	-	300,5