Радионуклиды в природных водах Новосибирской городской агломерации

Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Сухорукова А.Ф., Максимова А.А., Черных А.В., Деркачев А.С.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия,

E-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

АННОТАЦИЯ: Впервые приводятся результаты изучения распределения ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra и ^{222}Rn в природных водах Новосибирской городской агломерации. Особенности гидрогеологического строения предопределили существующую гидравлическую взаимосвязь водоносных комплексов четвертичных, неогеновых и палеогеновых отложений, верхнедевонско-нижнекаменноугольных пород и верхнепалеозойских гранитов. По химическому составу установлено 25 химических типов вод при доминировании $\text{HCO}_3 \text{ Mg-Ca}$, $\text{HCO}_3 \text{ Na-Mg-Ca}$ и $\text{SO}_4\text{-HCO}_3 \text{ Na-Mg-Ca}$ с величиной общей минерализации от 127 до 1848 мг/дм³ и содержанием кремния от 0,14 до 11,77 мг/дм³. Они характеризуются pH от нейтральных до щелочных (6,9 – 9,5). Величины Eh варьируют от восстановительных -157 мВ ($\text{O}_2 \text{ раств.} = 0,3 \text{ мг/дм}^3$) до окислительных +280 мВ ($\text{O}_2 \text{ раств.} = 19,4 \text{ мг/дм}^3$). Концентрации природных радионуклидов в водах составляют (мг/дм³): ^{238}U ($9,8 \cdot 10^{-8} - 6,5$), ^{232}Th ($1,9 \cdot 10^{-7} - 5,6 \cdot 10^{-4}$), ^{226}Ra ($1,6 \cdot 10^{-12} - 3,7 \cdot 10^{-7}$). Активность водорастворенного радона (^{222}Rn) варьирует в интервале от 0 до 43764 Бк/дм³. $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ отношение составляет $4,20 \cdot 10^{-5} - 2,96$. Природа радиоактивности изученных объектов в основном связана с ураном, поскольку воды характеризуются окислительными параметрами геохимической среды. Наиболее высокие концентрации радионуклидов характеризуют водные ореолы рассеяния Пригородного месторождения урановых руд.

Radionuclides in the natural waters of the Novosibirsk agglomeration

Novikov D.A., Dultsev F.F., Sukhorukova A.F., Maksimova A.A., Chernykh A.V., Derkach A.S.

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia,

E-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

ABSTRACT: The results of studying the distribution of ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , and ^{222}Rn in natural waters of the Novosibirsk city agglomeration are presented for the first time. The features of the hydrogeological structure predetermined the existing hydraulic relationship between the aquifers of the Quaternary, Neogene, Paleogene, Upper Devonian-Lower Carboniferous rocks and Upper Paleozoic granites. According to the chemical composition, 25 types of natural waters were established with dominance of Mg-Ca HCO_3 , Na-Mg-Ca HCO_3 and $\text{Na-Mg-Ca SO}_4\text{-HCO}_3$ with TDS ranged from 127 to 1848 mg/dm³. Silicon content varies from 0.14 to 11.77 mg/dm³. pH varies from neutral to alkaline (6.9 - 9.5). Eh values range from reductive -157 mV (dissolved $\text{O}_2 = 0.3 \text{ mg/dm}^3$) to oxidative +280 mV (dissolved $\text{O}_2 = 19.4 \text{ mg/dm}^3$). Concentrations of natural radionuclides in waters are (mg/dm³): ^{238}U (from $9.8 \cdot 10^{-8}$ to 6.5), ^{232}Th (from $1.9 \cdot 10^{-7}$ to $5.6 \cdot 10^{-4}$) and ^{226}Ra ($1.6 \cdot 10^{-12}$ to $3.7 \cdot 10^{-7}$). The content of radon-222 range from 0 to 43764 Bq/dm³. The ratio of $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ is $4.20 \cdot 10^{-5} - 2.96$. The radioactivity of the studied objects is mainly associated with uranium, because the geochemical environment are characterized by the oxidizing parameters. The highest concentrations of radionuclides characterize the water dispersion halos of the Prigorodny uranium ore deposit.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно п. 1 статьи 43 Водного кодекса РФ для целей питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения должны использоваться защищенные от загрязнения и засорения поверхностные водные объекты и подземные водные объекты, пригодность которых для указанных целей определяется на основании санитарно-эпидемиологических заключений. Научный комитет ООН по воздействию атомной радиации (UNSCEAR) оценил, что воздействие естественных источников вносят более 98% дозы облучения населения. Естественная радиоактивность природных вод вызывает в мире

большой интерес к радиологическому качеству питьевой воды.

На территории Новосибирской городской агломерации (НГА) комплексные радиохимические исследования природных вод ранее никогда не проводились. Имеются разрозненные гидрогеохимические данные разных лет, полученные во время поисково-разведочных работ на воды хозяйственно-питьевого назначения, включая минеральные радоновые или материалы, полученные при массовых поисках урана. Наибольший вклад в изучение гидрогеологических условий региона внесли И.П. Карпицкий, Е.К. Вериге, В.С. Кусковский, Г.Л. Самсонов,

Н.К. Ахмеджанова, С.В. Шабанов, И.П. Карпинский, П.Л. Макидон, Т.В. Терехова, Е.П. Виценко, Б.Л. Врабий, Н.Н. Бусоргина, М.Н. Козлова, В.П. Мочалов и многие другие [2-3]. Последние результаты гидрологических и гидрогеологических исследований приведены в работах [4-6, 11].

В настоящей работе впервые приводятся результаты обобщения архивных и новых данных по распределению ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra и ^{222}Rn в природных водах НГА. В полевой сезон 2019 г. были изучены водопункты в пределах (рис. 1): зоны распространения пород юргинской свиты

(D₃jur): I – с. Верх-Тула, II – ст. Геодезическая; Новосибирского гранитного массива: III – южной части, IV – северной части; V – зоны развития пород бещеульской свиты (N₁bš); Колыванского гранитного массива: VI – южной части и VII – северной части. Особенности гидрогеологического строения города Новосибирска предопределили гидравлическую взаимосвязь водоносных комплексов четвертичных, неогеновых и палеогеновых отложений, верхнедевонско-нижнекаменноугольных пород и верхнепалеозойских гранитов.

Рис. 1. Местоположение изученных объектов (а) и зависимость pH (б) и Eh (в) от содержания растворенного O_2 в природных водах Новосибирской городской агломерации.

1 – изученные водопункты: источники, поверхностные воды, скважины; 2 – группы изученных объектов; природные воды: 3 – поверхностные; 4 – подземные

ГЕОХИМИЯ ПРИРОДНЫХ ВОД

Изученные природные воды НГА пресные и ультрапресные преимущественно HCO_3 Mg-Ca, HCO_3 Na-Mg-Ca и SO_4 - HCO_3 Na-Mg-Ca состава (наименование химических типов дано в соответствии с формулой М.Г. Курлова, от 10 %-экв.) с величиной общей минерализации от 127 до 1848 мг/дм³. Большинство изученных вод характеризуется соленостью, не превышающей 1 г/дм³, что связано с формированием их химического состава за счет инфильтрации атмосферных осадков. Отмечается закономерный рост основных солеобразующих компонентов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- и SO_4^{2-}) с увеличением общей минерализации природных

вод в четкой корреляции с их химическим типом.

Геохимические параметры (pH, Eh и O_2) контролируются в первую очередь условиями залегания природных вод и характером их водообмена, что хорошо иллюстрируется полученными данными (см. рис. 1б-в). Изученные воды характеризуются pH от нейтральных до щелочных (6,9 – 9,5). Величины Eh варьируют от восстановительных -157 мВ (O_2 раств. = 0,3 мг/дм³) до окислительных +280 мВ (O_2 раств. = 19,4 мг/дм³). Среди подземных вод особый интерес представляют объекты с восстановительной средой, поскольку они характеризуют воды фонового состава без разбавления их поверхностными и водами зоны подтопления. К таким

можно отнести воды Святого источника в с. Верх-Тула для которых Eh изменяется в интервале -157,4 – -44,9 мВ при содержании O_2 раств. $0,5 - 1,4$ мг/дм³.

Поверхностные воды (речные, озерные и затопленные карьеры) имеют преимущественно SO_4-HCO_3 Na-Mg-Ca и HCO_3 Mg-Ca состав с величиной общей минерализации $214 - 789$ мг/дм³. Они в основном слабощелочные с pH = 8,4 и окислительными условиями геохимической обстановки с Eh +96,2 – +280 мВ и средними содержаниями O_2 раств. = $10,4$ мг/дм³ и Si = $1,7$ мг/дм³. По отношению Si/Na > 0,3 резко отличаются воды рек Каменка, Камышенка и Скалушка в которых можно предполагать высокую долю подземного питания. В большинстве случаев Si/Na < 0,1, а содержание Si = $0,1-1,8$ мг/дм³.

Подземные воды (источники, скважины и разрабатываемые карьеры) по составу в основном HCO_3 Mg-Ca, HCO_3 Na-Mg-Ca и SO_4-HCO_3 Na-Mg-Ca с величиной общей минерализации от 127 до 1848 мг/дм³. По величине pH доминируют нейтральные с окислительно-восстановительным потенциалом Eh от -157 до +280 мВ, величиной O_2 раств. $0,3 - 14,2$ мг/дм³ и содержанием Si $0,3 - 11,8$ мг/дм³, при среднем значении $6,2$ мг/дм³. Они значительно различаются по величинам геохимических коэффициентов (Ca/Na, Ca/Mg, Ca/Si, Mg/Si, Na/Si, Si/Na, rNa/rCl и SO_4/Cl), позволяющих проследить источники поступление элементов при формировании их состава. Например, подземные воды зоны трещиноватости гранитов карьеров «Борок», «Скала» и «Новобибеевский» за счет процессов длительного взаимодействия в системе вода – порода характеризуются превышением значений Na/Si (2,9-7,7) над Mg/Si (2,4-4,4), пониженными значениями Ca/Mg (2,5-5,5), Ca/Na в среднем 2,7 и Ca/Si (7,9-18,9). Гидрогеохимический мониторинг радоновых вод скважины Городской клинической больницы № 34 выявил рост отношений Na/Si (3,9-5,1) и Mg/Si (4,0-5,2) за счет более высокой степени гидрогеологической закрытости недр. Сравнительный анализ подземных вод Святого источника в с. Верх-Тула и Инских источников зоны распространения пород юргинской свиты (D₃jur) также показал существенные отличия. Так, средние значения отношений Na/Si = 6,0 и Mg/Si = 7,2 в водах Святого источника значительно выше, чем в Инских источниках, где они составляют 1,1 и 2,2 соответственно. Эти различия становятся еще больше при рассмотрении микрокомпонентного состава. Так, например, содержания Mn отличаются на два мате-

матических порядка, составляя $0,63-0,69$ мг/дм³ в первом случае и $5,2 \cdot 10^{-5}-5,3 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³ во втором. Схожие тенденции установлены по концентрациям: Co, Ni, Zn, Ga, As, Sr, Mo, Rh, Sn, Ba, U и др.

ПРИРОДНЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В ВОДАХ

Изученные природные воды НГА характеризуются в основном окислительной геохимической обстановкой и как следствие природа их радиоактивности связана с ураном (²³⁸U), концентрации которого достигают до $6,5$ мг/дм³ (рис. 2а). Торий (²³²Th) в основном мигрирует в восстановительных условиях и поэтому его содержания незначительны и составляют $1,9 \cdot 10^{-7} - 5,6 \cdot 10^{-4}$ мг/дм³ (рис. 2б). Радий (²²⁶Ra), концентрации которого составляют $1,6 \cdot 10^{-12} - 3,7 \cdot 10^{-7}$ мг/дм³ (рис. 2в) и его дочерний продукт радиоактивного распада радон (²²²Rn) представляет наибольшую опасность для здоровья населения и считается второй наиболее распространенной причиной рака легких после курения сигарет. Ввиду незначительной глубины залегания источников эманации радона (гранитных массивов) в природных водах НГА отмечаются концентрации, достигающие местами 43764 Бк/дм³ (рис. 2г). Рассмотрим особенности распределения радионуклидов в изученных группах (I-VII) природных вод НГА (см. рис. 1а).

Первая группа объектов (I) расположена в левобережье реки Обь. Здесь под четвертичными отложениями развита юргинская свита (D₃jur), представленная песчаниками в составе обломочного материала которых преобладают карбонатные породы. Средняя и верхняя части представлены более хорошо сортированными песчаниками, алевролитами и аргиллитами. Концентрации природных радионуклидов в водах составляют (мг/дм³): ²³⁸U ($2,7 \cdot 10^{-6} - 7,1 \cdot 10^{-3}$), ²³²Th ($7,0 \cdot 10^{-6} - 8,0 \cdot 10^{-6}$), ²²⁶Ra (в среднем $2,2 \cdot 10^{-10}$). Активность радона (²²²Rn) варьирует в интервале от 0 до 66 Бк/дм³.

Инские источники (группа II) изучены в правобережье реки Обь, где под толщей четвертичных отложений распространена юргинская свита, представленная только ее верхней частью - переслаиванием глинистых сланцев, песчаников, алевролитов и аргиллитов в верхней части и чередованием черных глинистых сланцев, мелкозернистых песчаников, алевролитов и аргиллитов. Содержания радионуклидов в водах (мг/дм³): ²³⁸U ($2,8 \cdot 10^{-3}-4,1 \cdot 10^{-3}$), ²³²Th ($2,4 \cdot 10^{-6}-1,2 \cdot 10^{-5}$), ²²⁶Ra ($3,8 \cdot 10^{-10}-4,9 \cdot 10^{-10}$). Активность радона (²²²Rn) составляет $7-149$ Бк/дм³.

Новосибирский гранитоидный массив представлен двумя фазами. Первая сложена биотитовыми и роговообманково-биотитовыми мон-

цогранитами, реже граносиенитами, гранитами и гранодиоритами. Вторая фаза представлена мелкими штокообразными телами и дайками. В южной части гранитного массива изучена третья группа объектов (III). Концентрации радионуклидов в водах составляют (мг/дм³): ²³⁸U (9,8·10⁻⁸–9,3·10⁻²), ²³²Th (9,6·10⁻⁷–5,1·10⁻⁵), ²²⁶Ra (4,9·10⁻¹⁰–1,7·10⁻⁸). Активность радона (²²²Rn) изменяется от 0 до 1216 Бк/дм³.

Четвертая группа (IV) расположена в северной части Новосибирского гранитного массива в зоне контакта с песчано-глинистыми осадками пачинской и юргинской свит. Содержания радионуклидов в водах (мг/дм³): ²³⁸U (1,1·10⁻¹⁰–9,8·10⁻²), ²³²Th (1,3·10⁻⁶–3,4·10⁻⁵), ²²⁶Ra (1,6·10⁻¹²–3,5·10⁻⁷). Активность радона (²²²Rn) составляет 0–892 Бк/дм³.

Пятая группа (V) расположена близ города Новосибирска. Под толщей четвертичных отложений распространена бещеульская свита

(N₁bš), представленная преимущественно глинами и алевроитами с прослоями песков. Концентрации радионуклидов составляют (мг/дм³): ²³⁸U (5,4·10⁻⁴–5,0·10⁻³) и ²³²Th (1,8·10⁻⁶–3,4·10⁻⁶). Активность радона (²²²Rn) изменяется от 0 до 84 Бк/дм³.

Шестая и седьмая группы приурочены к Барлакскому гранит-лейкогранитовому мезоабиссальному комплексу (Колыванскому гранитному массиву). В его южной части (группа VI) содержания радионуклидов в водах составляют (мг/дм³): ²³⁸U (1,3·10⁻⁴–0,24), ²³²Th (2,2·10⁻⁷–1,3·10⁻⁵), ²²⁶Ra (6,0·10⁻¹⁰–1,3·10⁻⁷). Активность радона (²²²Rn) варьирует от 0 до 25220 Бк/дм³. В северной части Колыванского гранитного массива (группа VII) концентрации радионуклидов в водах равны (мг/дм³): ²³⁸U (5,8·10⁻⁶–6,5), ²³²Th (7,1·10⁻⁷–3,9·10⁻⁵), ²²⁶Ra (2,7·10⁻⁹–3,7·10⁻⁷). Активность радона (²²²Rn) составляет от 1 до 43764 Бк/дм³.

Рис.2. Распределение урана (а), тория (б), радия (в) и радона (г) в природных водах НГА

Содержания урана и тория в водах в первую очередь контролируются их распространением в водовмещающих отложениях. В изученных геологических объектах НГА их концентрации варьируют в следующих пределах (г/т) [1]: в породах юргинской свиты ²³⁸U = 1,6 – 2,7 и ²³²Th = 5,6 – 11,7; в гранитах Новосибирского массива ²³⁸U = 2,3 – 13,8 и ²³²Th = 4,6 – 28,0; в гранитах Колыванского массива ²³⁸U = 6,1 – 47,2 и ²³²Th = 15,5 – 37,7 соответственно.

Уран мигрирует в окислительных обстановках преимущественно в виде анионных комплексов $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ и $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$, в меньшей степени (< 1% от общего содержания) в виде $\text{Ca}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3(\text{aq})$ и $\text{CaUO}_2(\text{CO}_3)_3^{2-}$ [8]. Экспериментальные и теоретические исследования форм, растворимости и сорбции тория в водах с низкой ионной силой говорят о том, что он может находиться в форме ThO_2 или $\text{Th}(\text{OH})_3\text{CO}_3^-$ [8-9, 12]. В природных водах концентрации радия ограничены соосаждением, адсорбцией, растворением и радиоактивными процессами.

За исключением труднорастворимых RaCO_3 и RaSO_4 [10], большинство радийсодержащих твердых веществ обладает высокой растворимостью. Как правило, концентрации радия в подземных водах слишком малы для осаждения чистого RaSO_4 , но радий может соосаждаться с барием в виде $(\text{Ba}, \text{Ra})\text{SO}_4$ или с кальцием в водах, содержащих умеренно-высокие концентрации сульфатов [7, 13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя вышесказанное можно сделать следующие выводы: 1) В пределах НГА по составу установлено 25 химических типов вод при доминировании $\text{HCO}_3^- \text{Mg-Ca}$, $\text{HCO}_3^- \text{Na-Mg-Ca}$ и $\text{SO}_4\text{-HCO}_3^- \text{Na-Mg-Ca}$ с величиной общей минерализации от 127 до 1848 мг/дм³ и содержанием кремния от 0,14 до 11,77 мг/дм³. Они характеризуются pH от нейтральных до щелочных (6,9 – 9,5). Величины Eh варьируют от восстановительных -157 мВ ($\text{O}_2 \text{ раств.} = 0,3 \text{ мг/дм}^3$) до окислительных +280 мВ ($\text{O}_2 \text{ раств.} = 19,4 \text{ мг/дм}^3$). 2) Концентрации природных радионуклидов в водах составляют (мг/дм³): ^{238}U ($9,8 \cdot 10^{-8}$ – $6,5$), ^{232}Th ($1,9 \cdot 10^{-7}$ – $5,6 \cdot 10^{-4}$), ^{226}Ra ($1,6 \cdot 10^{-12}$ – $3,7 \cdot 10^{-7}$). Активность водорастворенного радона (^{222}Rn) варьирует в интервале от 0 до 43764 Бк/дм³. $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ отношение составляет $4,20 \cdot 10^{-5}$ – $2,96$. 3) Уран мигрирует в окислительных обстановках преимущественно в виде анионных комплексов $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ и $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$, в меньшей степени (< 1% от общего содержания) в виде $\text{Ca}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3(\text{aq})$ и $\text{CaUO}_2(\text{CO}_3)_3^{2-}$; торий может находиться преимущественно в форме ThO_2 , а радий в форме RaSO_4 . 4) Природа радиоактивности изученных объектов в основном связана с ураном, поскольку воды характеризуются окислительными параметрами геохимической среды. Наиболее высокие концентрации радионуклидов характеризуют водные ореолы рассеяния Пригородного месторождения урановых руд.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025 и Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 19-45-540004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Бабин Г.А., Черных А.И., Головина А.Г., Жигалов С.В., Долгушин С.С., Ветров Е.В., Кораблева Т.В., Бодина Н.А., Светлова Н.А., Федосеев Г.С., Хилько

А.П., Епифанов В.А., Лоскутов Ю.И., Лоскутов И.Ю., Михаревич М.В., Пихутин Е.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М.: 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтай-Саянская. Л. N-44 – Новосибирск. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕ-ГЕИ. – 2015. – 392 с. + 4 вкл.

2 Варкасин Ю.Н., Свиридов В.Г., Росляков Н.А., Афанасьев А.Т., Вавилихин Г.А., Васильев И.П., Виниченко В.И., Леонов А.Н., Марус А.И., Михантьева Л.С., Нестеренко Г.В., Самсонов Г.Л., Сердюк З.Я. Геологическое строение и полезные ископаемые Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1998. – Т. 2. – 254 с.

3 Гусев В.К., Вериго Е.К. Радоновые воды Колывань-Томской складчатой зоны, их использование и охрана // Изменение природных условий под влиянием деятельности человека, 1984. – С. 99–107.

4 Мальцев А.Е., Леонова Г.А., Богущ А.А., Булычева Т.М. Эколого-геохимическая оценка степени антропогенного загрязнения экосистем обводненных карьеров г. Новосибирска // Экология промышленного производства, 2014. – № 2 (86). – С. 44–53.

5 Новиков Д.А., Деркачев А.С., Сухорукова А.Ф. Гидрогеохимия Засельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2019. – Т. 2. – № 1. – С. 125–132.

6 Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Корнеева Т.В. Гидрогеология и гидрогеохимия Засельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (юг Западной Сибири) // Геодинамика и тектонофизика, 2018. – Т. 9. – № 4. – С. 1255–1274.

7 Beddow H., Black S., Read D. Naturally occurring radioactive material (NORM) from a former phosphoric acid processing plant // Journal of Environmental Radioactivity. – 2006. – V 86(3). – PP. 289–312.

8 Brookins D.G. Eh-pH Diagrams for Geochemistry // Springer-Verlag. – 1988. – 184 p.

9 Langmuir D., Herman J.S. The mobility of thorium in natural waters at low temperatures // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1980. – V. 44. – P. 1753–1766.

10 Langmuir D., Riese A.C. The thermodynamic properties of radium // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1985. – V 49(7). – P. 1593–1601.

11 Novikov D.A., Korneeva T.V. Microelements in radon waters of the Zaelsovsky field (the southern part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series, 2019. – V. 1172. № 012096.

12 Ostholts E., Bruno J., Grenthe I. On the influence of carbonate on mineral dissolution: III. The solubility of microcrystalline ThO_2 in $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ media // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1994. – V. 58 (2). – P. 613–623.

13 Yoshida Y., Nakazawa T., Yoshikawa H., Nakanishi T. Partition coefficient of Ra in gypsum // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2009. – V.280. – P. 541–545.