

Д. А. Новиков^{1}, Л. Г. Вакуленко¹, П. А. Ян¹*

Фракционирование урана и тория в системе «вода – порода» (на примере Западно-Сибирского артезианского бассейна)

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В статье приводятся первые данные по фракционированию урана и тория в системе вода-порода, на примере анализа северных и южных районов Западно-Сибирского артезианского бассейна. Концентрации радиоактивных элементов в водах изменяются в широком интервале (мг/дм³): U ($4.90 \cdot 10^{-7} - 1.21$), Th ($3.41 \cdot 10^{-7} - 8.93 \cdot 10^{-3}$). Th/U отношение варьирует от $2.63 \cdot 10^{-5}$ до 93.1 с максимальными величинами в водах валанжинского возраста северных районов. Th/U отношение в водоупорных породах находится в довольно узком диапазоне и составляет 1.82 – 5.24, при среднем 3.56. На этом фоне самыми низкими значениями Th/U = 0.07 – 1.71 отличаются породы баженовской свиты, природа радиоактивности которой связана с ураном. Формирование радионуклидного состава подземных вод северных районов с высокими Th/U отношениями протекало в резко восстановительной среде, где торий обладает большей миграционной способностью чем уран. Эволюция осадочно-породного бассейна привела к широкому развитию элизионных процессов и перераспределению U и Th в системе вода-порода. В окислительной геохимической обстановке верхней гидродинамической зоны U растворим значительно лучше, чем Th, хотя он также адсорбируется на поверхности минералов и может связываться во вторичных минеральных фазах. В восстановительной геохимической среде повышения концентрации U и Th с увеличением возраста водовмещающих отложений не установлено.

Ключевые слова: гидрогеохимия, уран, торий, система вода – порода, фракционирование, геохимическая обстановка, Западно-Сибирский артезианский бассейн

D. A. Novikov^{1}, L. G. Vakulenko¹, P. A. Yan¹*

Uranium and thorium fractionation in the water-rock system (for the West Siberian artesian basin as example)

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Abstract. The first data on uranium and thorium fractionation in the water-rock system are reported, through the analysis of the northern and southern regions of the West Siberian artesian basin as an example. The concentrations of radioactive elements in waters vary within broad ranges (mg/dm³): U ($4.90 \cdot 10^{-7} - 1.21$), Th ($3.41 \cdot 10^{-7} - 8.93 \cdot 10^{-3}$). The Th/U ratio varies from $2.63 \cdot 10^{-5}$ to 93.1, with the maximal values in the waters of the Valanginian age in the northern regions. In waterproof rocks, the Th/U ratio is within rather narrow range 1.82 – 5.24, the average value is 3.56. Against this background, the lowest values Th/U = 0.07 – 1.71 are detected in the rocks of the Bazhenov formation, in which the specific nature of radioactivity is due to uranium. The formation of radionuclide composition of groundwaters in the northern regions with high Th/U ratio proceeded in sharply reductive environment, when thorium exhibits higher migration ability than uranium. The evolution of the sed-

imentary rock basin caused an extensive development of elision processes and redistribution of U and Th in the water-rock system. In the oxidative environment of the upper hydrodynamic zone, U is much better soluble than Th, though it is also adsorbed on mineral surfaces and may be bound in secondary mineral phases. In the reductive geochemical environment, no increase in U and Th concentrations with an increase in the age of water-bearing sediments was detected.

Keywords: hydrogeochemistry, uranium, thorium, water-rock system, fractionation, geochemical environment, the West Siberian artesian basin

Введение

Считается, что актиноиды образовались в результате быстрого захвата нейтронов во время вспышки сверхновой в момент образования Солнечной системы ($4,6 \times 10^9$ лет назад) или даже раньше. Таким образом, учитывая, что процессы образования тория (Th) и урана (U) несколько схожи, разница в периодах полураспада (^{232}Th : $14,05 \times 10^9$ лет и ^{238}U : $4,468 \times 10^9$ лет) предполагает присутствие в настоящее время большее количество Th, чем U. Химическое поведение U сильно отличается от Th, поэтому их концентрации в различных геохимических типах вод и геологических формациях разные [8]. Тория примерно в четыре раза больше, чем урана. Уран повсеместно встречается на Земле из-за большого разнообразия минералов, в кристаллическую решетку которых он входит. Торий же имеет только один оксид и, как правило, встречается в ассоциации с оксидами лантаноидов в аллювиальных песках монацита и бастнезита [11]. Как правило, радиоактивные элементы (РАЭ) не входят в состав основных породообразующих минералов, а представлены в кристаллической решетке аксессуарных: циркона, монацита, сфена, апатита и магнетита [31]. Уран также может находиться в низких концентрациях и в основных минералах, таких как полевой шпат [15].

Процессы фракционирования урана и тория в системе вода-порода изучались многими научными коллективами на примере объектов, расположенных в различных гидрогеологических обстановках Бразилии [4, 16, 29], Великобритании [7], Германии [12-13], Испании [33], Китая [17], Марокко [5], Намибии [10], Омана [28], Сирии [3], США [30, 32, 34], Туниса [26], Франции [18] и других. В настоящем исследовании сделана первая попытка обобщения собственных материалов по распределению урана и тория в системе вода-порода на примере резко восстановительных геохимических обстановок в северных и окислительных – в южных районах Западно-Сибирского артезианского бассейна (ЗСАБ).

Методы и материалы

В настоящей работе впервые обобщены материалы изучения 416 проб подземных вод, отобранных из резервуаров широкого стратиграфического диапазона (от сеномана до верхней части палеозойского фундамента) на 45 месторождениях нефти и газа северных районов ЗСАБ и около 80 объектов (месторождения питьевых и минеральных радоновых вод) в пределах Обь-Зайсанской складчатой области (ОЗСО) – на юге. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ (анали-

тики О.В. Чеботарева, Н.В. Бублий, А.С. Погуца, В.В. Куровская, К.Б. Кривцова, Л.А. Ракул, Э.С. Шведская). Для характеристики флюидоупоров была собрана коллекция образцов керна 10 скважин, пробуренных на территории ЯНАО, охватывающих стратиграфический интервал верхний триас – нижний мел. В ЦКП ИГМ СО РАН был выполнен элементный анализ ИСП-МС 40 образцов (аналитики Николаева И.В., Палесский С.В.) и рентгенофазовый анализ 73 образцов (аналитики Солотчина Э.П., Пальчик Н.А., Мирошниченко Л.В).

Результаты и их обсуждение

Изученных воды северных районов ЗСАБ и южных в пределах ОЗСО сильно различаются по величине окислительно-восстановительного потенциала и другим параметрам. Так, воды нефтяных и газовых месторождений характеризуются бескислородными ($O_{2\text{раств.}}$ до $0,8 \text{ мг/дм}^3$) резко восстановительными условиями геохимической среды со значениями окислительно-восстановительного потенциала E_h находящимися в диапазоне от -437 до -236 мВ и водородным показателем рН от $6,3$ до $8,5$. По составу воды этой группы весьма разнообразны и представлены Cl Na, Cl- HCO_3 Na и HCO_3 -Cl Na типами (по С.А. Щукареву) с величиной общей минерализации от $2-5$ до $63,3 \text{ г/дм}^3$. Подробно их геохимические особенности рассмотрены в целой серии работ [2, 19-20, 23 и другие]. Воды второй группы с окислительными ($O_{2\text{раств.}}$ от $2,7$ до $6,8 \text{ мг/дм}^3$) обстановками геохимической среды (E_h изменяется от $+54$ до $+286$ мВ, рН находится в интервале от $6,8$ до $7,7$) и характеризуются в основном HCO_3 Ca или HCO_3 Mg-Ca составом с величиной общей минерализации до $0,5 - 1,0 \text{ г/дм}^3$ [22].

Содержания РАЭ в подземных водах первой геохимической группы изменяются в диапазоне: U от $4,90 \cdot 10^{-7}$ до $5,14 \cdot 10^{-3} \text{ мг/дм}^3$ и Th от $1,90 \cdot 10^{-6}$ до $8,93 \cdot 10^{-3} \text{ мг/дм}^3$. Доминируют концентрации урана и тория не более $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ мг/дм}^3$. Рост последнего сопровождается закономерным увеличением Th/U отношения от $0,07$ до $93,1$, при среднем $5,5$. В окислительных условиях уран (преимущественно ^{238}U) очень подвижен в шестивалентном состоянии, образуя растворимые комплексы с карбонатами и фосфатами в условиях, близких к нейтральным, и с сульфатами и фторидами при более низком рН. При этом его концентрации в пределах южных районов Западной Сибири (ОЗСО) местами достигают $1,21 \text{ мг/дм}^3$ [21]. В соленых подземных водах растворимость выше, где важную роль играют хлоридные и сульфатные комплексы. В восстановительных условиях U находится в четырехвалентном состоянии и стабилен в виде $\text{U}(\text{OH})_4$ [9]. Максимальные его концентрации до $2,19 \cdot 10^{-3} - 5,14 \cdot 10^{-3} \text{ мг/дм}^3$ фиксируются в водоносных горизонтах сеномана, альба и валанжин-берриаса.

Первичные минералы, содержащие U, такие как циркон, относительно устойчивы, хотя U может также находиться в более легко растворимых минеральных фазах, таких как слюды. Множество экспериментальных работ, опубликованное по сорбционным свойствам урана, показало высокую способность глин, карбонатов и других минералов поглощать значительные его количества. Органическое вещество также может сорбировать U [27], хотя там, где это связано с восстановительной геохимической обстановкой, наблюдается его осажде-

ние из раствора. Адсорбция урана снижается при более низком pH [24] и повышенной минерализации подземных вод [6]. Важную роль в контроле миграционной способности РАЭ играют широко распространенные вторичные минералы железа. Так, ферригидрит поглощает большее количество U, чем кристаллические формы, такие как гематит и гетит [25]. Структурные изменения в Fe-минералах могут способствовать дополнительному связыванию адсорбированных частиц U. В отличие от адсорбции, которая замедляет миграцию U, процессы вторичного минералообразования Fe-минералов могут его мобилизовывать.

Концентрации тория (преимущественно ^{232}Th) в водах, как правило, очень малы из-за низкой растворимости торианита (ThO_2) и сильной сорбции. Th намного сильнее сорбируется, чем U, в окислительных геохимических обстановках, где его максимальные концентрации в условиях инфильтрационного водообмена могут достигать $6,04 \cdot 10^{-4}$ мг/дм³. В природных водах он присутствует только в четырехвалентной форме. При pH вод более 5 доминирующей формой миграции является $\text{Th}(\text{OH})_4$, которая сменяется на $\text{Th}(\text{HPO}_4)_3^{2-}$ при величинах pH между 5 и 7 при наличии в растворе фосфатов [14]. Комплексообразование с органическими лигандами также значительно увеличивает его миграционную способность. Все имеющиеся данные по концентрациям Th в условиях восстановительной геохимической обстановки находятся в узком диапазоне от $3,55 \cdot 10^{-5}$ до $9,81 \cdot 10^{-4}$ мг/дм³ (средние значения). В наибольшей степени обогащены торием подземные воды водоносных горизонтов (мг/дм³): сеномана (до $8,93 \cdot 10^{-3}$), валанжин-берриаса (до $6,23 \cdot 10^{-3}$) и альба (до $8,69 \cdot 10^{-4}$).

Для северных районов ЗСАБ публикации, содержащие данные геохимических исследований водовмещающих пород, включая водоупорные толщи, очень немногочисленны. Один из наиболее полных разрезов мезозойских отложений и особенности распределения РАЭ в породах рассмотрены для скважины Ен-Яхинская-7 в пределах группы месторождений Большого Уренгоя [1] – интервал 3500-7000 м (триас-нижний мел). Практически во всем интервале содержание U в глинистых породах варьируют от 0,1 до 4 г/т, увеличиваясь в верхнеюрской баженовской свите до 5-8 и в низах триасовой части разреза до 5,8-10,1 г/т. Подавляющее большинство образцов характеризуются содержанием U, сопоставимым со средним постархейским сланцем (РААС). Примерно такое же распределение без ярко выраженной тенденции к росту содержания сверху вниз по разрезу установлено и для Th – от 1,4 до 19,8 г/т, среднее 8,2 г/т, что составляет порядка 60% от концентрации его в РААС. Природа радиоактивности большинства изученных водоупорных толщ мезозойского разреза связана с торием, за исключением баженовской свиты, где доминирует уран. Концентрации U находятся в пределах 1,42 – 6,94 г/т и Th – 4,75 – 19,14 г/т. Средние концентрации урана составляют 3,02, тория - 10,33 г/т соответственно. Th/U отношение изменяется от 1,82 до 5,24, при среднем значении 3,56.

Как обсуждалось выше, в окислительной геохимической обстановке U растворим значительно лучше, чем Th, хотя он также адсорбируется на поверхности минералов и может связываться во вторичных минеральных фазах. В восстановительной геохимической среде повышения концентрации U и Th с увеличением

возраста водовмещающих отложений не наблюдается. По мере развития осадочно-породного бассейна, уплотняющиеся водоупорные толщи (флюидоупоры) были основным источником элизионных вод и в условиях восстановительной геохимической среды принимали активное участие в формировании радионуклидного состава подземных вод и обогащения их в большей мере торием, чем ураном. Вариация Th/U отношения в системе вода – порода (рис. 1) в зависимости от возраста водовмещающих пород выявила группу точек (синий овал) в водоносных горизонтах берриаса-валанжина с величиной близкой к 0,1. Этот факт мы можем объяснить восходящей разгрузкой элизионных вод, отжатых из баженовской свиты (желтый овал), по зонам тектонических нарушений.

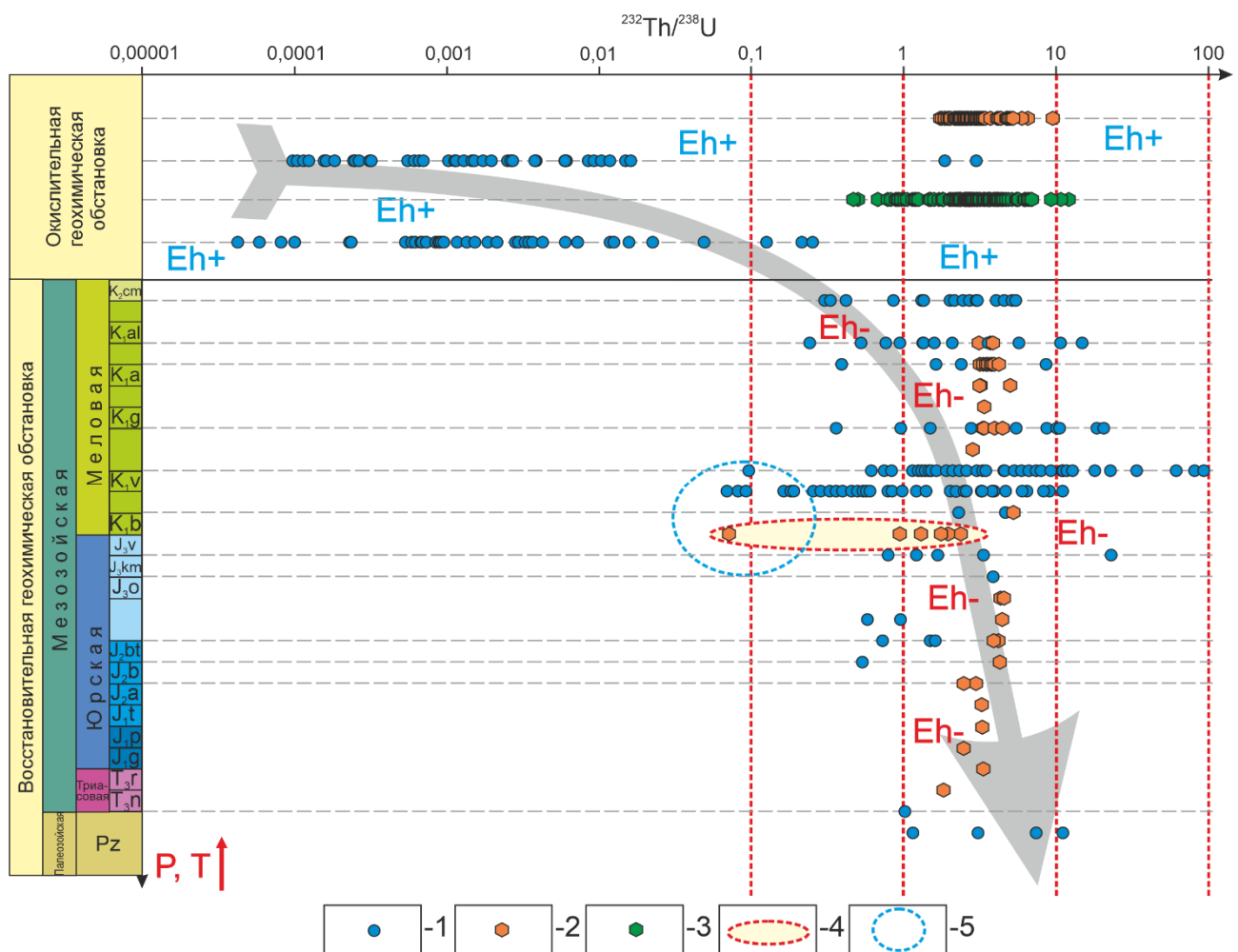


Рис. 1. Вариация Th/U отношения в системе вода-порода в зависимости от геохимических параметров среды и возраста водовмещающих отложений. Распределение Th/U отношения в: 1 – подземных водах, 2 – водоупорах (флюидоупорах) терригенного состава; 3 – в водоупорах (флюидоупорах) магматического происхождения; 4 – поле значений баженовской свиты; 5 – область влияния баженовской свиты на воды с пониженным Th/U отношением. Серой стрелкой показан тренд изменения средних значений в подземных водах.

Заключение

Значительные успехи последних лет в изучении процессов миграции РАЭ в природных водах и их перераспределения в системе вода-порода невозможны без привлечения нового фактического материала. Две группы изученных подземных вод значительно отличаются по геохимическим параметрам среды, химическому составу и величине общей минерализации (от ультрапресных до слабых рассолов). Концентрации радиоактивных элементов в водах изменяются в широком интервале (мг/дм^3): U ($4,90 \cdot 10^{-7} - 1,21$), Th ($3,41 \cdot 10^{-7} - 8,93 \cdot 10^{-3}$). По физико-химическим условиям уран в изученных пробах подземных вод должен быть неподвижен, при этом его значительное количество все же мигрирует за счет образования разнообразных комплексов (в основном $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$) в нейтрально-щелочных условиях. Кроме того, присутствие железа в растворе также влияет на мобилизацию U, который может входить в состав гидроксидов железа при превращении ферригидрита в гетит, а также сорбироваться на последнем. На миграционную способность U также влияют такие контролирующие факторы, как Ca, Mg, HCO_3 и Fe, выступающие комплексообразующими агентами. Th/U отношение варьирует от $2,63 \cdot 10^{-5}$ до 93,1 с максимальными величинами в водах валанжинского возраста северных районов. Th/U отношение в водоупорных породах находится в довольно узком диапазоне и составляет 1,82 – 5,24, при среднем 3,56. На этом фоне самыми низкими значениями $\text{Th/U} = 0,07 - 1,71$ отличаются породы баженовской свиты, природа радиоактивности которой связана с ураном. Формирование радионуклидного состава подземных вод нефтегазоносных отложений северных районов ЗСАБ шло в восстановительной среде в условиях элизионного водообмена с высокими пластовыми температурами и давлениями, вплоть до аномально высоких с коэффициентами аномальности (Ka) до 2,0 и более. Группа вод южных районов ЗСАБ, приуроченная к облатсям питания в пределах Обь-Зайсанской складчатой области помимо окислительной геохимической среды отличается высокой миграционной способностью урана, что выражается в росте его концентраций до 1,21 мг/дм^3 и более в пределах Пригородного урановорудного района Кулундино-Енисейской урановорудной минерагенической зоны, где было открыто одноименное месторождение урана.

Благодарности

Исследования по северной части Западно-Сибирского артезианского бассейна выполнены при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ № FWZZ-2022-0014, аналитические работы по изучению геохимических особенностей подземных вод и горных пород Обь-Зайсанской складчатой области – при поддержке проекта № 22-17-20029 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карасева Т.В., Маслов А.В., Ронкин Ю.Л. Особенности микроэлементного состава осадочных пород глубоких горизонтов скважины СГ-7 (Ен-Яхинская) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 5. - С. 20-27/

2. Шварцев С.Л., Новиков Д.А. Природа вертикальной гидрогеохимической зональности нефтегазоносных отложений (на примере Надым-Тазовского междуречья, Западная Сибирь) // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45. – № 8. – С. 1008-1020
3. Abdul-Hadi A., Alhassanieh O., Ghafar M. Disequilibrium of uranium isotopes in some Syrian groundwater // Applied Radiation and Isotopes – 2001. – Vol. 55 – P. 109-113
4. Bonotto D.M. The behavior of dissolved uranium in groundwaters of the morro do ferro thorium deposit, Brazil // Journal of hydrology – 1989. – Vol. 107 – P. 155-168
5. Bouchaou L., Warner N.R., Tagma T., Hssaisoune M., Vengosh A. The origin of geothermal waters in Morocco: Multiple isotope tracers for delineating sources of water-rock interactions // Applied Geochemistry. – 2017. – Vol. 84 – P. 244-253
6. Curtis G.P., Fox P., Matthias K., Davis J.A. Comparison of in situ uranium K_D values with a laboratory determined surface complexation model // Applied Geochemistry. – 2004. – V. 19. – P. 1643–1653
7. Cuttell J.C., Lloyd J.W., Ivanovich M. A study of uranium and thorium series isotopes in chalk groundwaters of Lincolnshire, U.K. // Journal of hydrology. – 1986. – Vol. 86. – P. 343-365
8. Degueldre C., Joyce M.J. Evidence and uncertainty for uranium and thorium abundance: A review // Progress in Nuclear Energy. – 2020. – Vol. 124 – P. 103299
9. Gascoyne M. Geochemistry of the actinides and their daughters / In: Uranium-Series Disequilibrium Applications to Earth, Marine, and Environmental Sciences (Eds M. Ivanovich and R.S. Harmon). – Clarendon Press, Oxford, 1992. – P. 34–61.
10. Hamutoko J.T., Mapani B.S., Ellmies R., Bittner A., Kuells C. A fingerprinting method for the identification of uranium sources in alluvial aquifers: An example from the Khan and Swakop Rivers, Namibia // Physics and Chemistry of the Earth. – 2014. – Vol. 72-75. – P. 34-42
11. Herring J.S. Origins and Resources of Uranium and Thorium // Encyclopedia of Nuclear Energy. – 2021. – P. 661-669
12. Herrmann A.D., Gordon G.W., Anbar A.D. Uranium isotope variations in a dolomitized Jurassic carbonate platform (Tithonian; Franconian Alb, Southern Germany) // Chemical Geology. – 2018. – Vol. 497 – P. 41-53
13. Kölbl L., Kölbl T., Sauter M., Schäfer T., Siefert D., Wiegand B. Identification of fracture zones in geothermal reservoirs in sedimentary basins: A radionuclide-based approach // Geothermics. – 2020. – Vol. 85 – P. 101764
14. Langmuir D., Herman J. The mobility of Th in natural waters at low temperatures. Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1980. – V. 44. – P. 1753–1766
15. Maher K., DePaolo D.J., Christensen J.N. U–Sr isotopic speedometer: Fluid flow and chemical weathering rates in aquifers. Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2006. – V. 70. – P. 4417–4435
16. Miekeley N., Linsalata P., Osmond J.K. Uranium and thorium isotopes in groundwaters from the Osamu Utsumi mine and Morro do Ferro natural analogue sites, Pogos de Caldas, Brazil // Journal of Geochemical Exploration. – 1992. – Vol. 45 – P. 345-363
17. Min M.Z., Zhai J.P., Fang C.Q. Uranium-series radionuclide and element migration around the Sanerliu granite-hosted uranium deposit in southern China as a natural analogue for high-level radwaste repositories // Chemical Geology. – 1998. – Vol. 144 – P. 313-328
18. Négrel P., Casanova J., Bourguignon A. Paleo water-rock interaction determined through isotopic tracing (Sr, O, C, U) in fracture-fill minerals: Evidence from the Vienne granitoids (France) // Applied Geochemistry – 2013. – Vol. 34 – P. 23-37
19. Novikov D.A. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins // Petroleum Exploration and Development – 2017. – Vol. 44 – № 5 – P. 780-786
20. Novikov D.A. Equilibrium modeling of water-gas systems in Jurassic–Cretaceous reservoirs of the Arctic petroleum province, northern West Siberia // Petroleum Exploration and Development. – 2022. – V. 49. – № 2. – P. 363-373

21. Novikov D, Dultsev F.F., Sukhorukova A.F., Maksimova A.A., Chernykh A.V., Derkachyov A.S. Monitoring of radionuclides in the natural waters of Novosibirsk, Russia // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2021. – V. 15. – P. 1-8
22. Novikov D.A., Khvashevskaya A.A., Kopylova Yu.G., Pyryaev A.N., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Purgina D.V. Hydrogeochemistry and stable isotopes in radon-rich thermal waters of Belokurikha (Altai, Russia) // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2022. – 29(55). – P. 83081–83098.
23. Novikov D.A., Sukhorukova A.F. Hydrogeology of the northwestern margin of the West Siberian Artesian Basin // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2015. – V. 8. – № 10. – P. 8703-8719
24. Pabalan R.T., Turner D.R., Bertetti F.P., Prikryl J.D. Uranium VI sorption onto selected mineral surfaces; key geochemical parameters / In: *Adsorption of Metals by Geomedia; Variables, Mechanisms, and Model Applications* (Ed. E.A. Jenne). Academic Press, San Diego, CA, 1998. – P. 99–130.
25. Payne T., Davis J.A., Waite T.D. Uranium retention by weathered schists – the role of iron minerals. *Radiochimica Acta*. – 1994. – V. 66/67. - P. 297–303
26. Petersen J.O., Deschamps P., Hamelina B., Goncalves J., Michelot J-L., Zouari K. Water-rock interaction and residence time of groundwater inferred by $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ disequilibria in the Tunisian Continental Intercalaire aquifer system // *Procedia Earth and Planetary Science*. – 2013. – Vol. 7. – P. 685-688
27. Porcelli D., Andersson P.S., Baskaran M., Wasserburg G.J. Transport of U- and Th-series nuclides in a Baltic Shield watershed and the Baltic Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2001. – V. 65. - P. 2439–2459
28. Pracejus B., Sundararajana N., Al-Khribasha S., Al-Hosnia T., Ebrahimia A., Al-Bulushia S., Al-Lazkib A., Al-Maashanic M. Aspects of U-Th fractionation in Tertiary limestones and calcretes of Dhofar, southern Oman // *Chemie der Erde*. – 2018. – Vol. 78 – P. 479-489
29. Reyes E., Marques L.S. Uranium series disequilibria in ground waters from a fractured bedrock aquifer (Morungaba Granitoids-Southern Brazil): Implications to the hydrochemical behavior of dissolved U and Ra // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2008. – Vol. 66 – P. 1531-1542
30. Rosen M.R., Burowb K.R., Framb M.S. Anthropogenic and geologic causes of anomalously high uranium concentrations in groundwater used for drinking water supply in the southeastern San Joaquin Valley, CA // *Journal of Hydrology*. – 2019. – Vol. 577 – P. 124009
31. Smellie J.A.T., Stuckless J.S. Element mobility studies of two drill-cores from the Gotemar granite (Krakemala test site), southeast Sweden. *Chemical Geology*. – 1985. – V. 51. - P. 55–78
32. Sturchio N.C., Binz C.M., Lewis C.H. Thorium-uranium disequilibrium in a geothermal discharge zone at Yellowstone // *Geochimica et Cosmochimica Acta* – 1987. – Vol. 51 – P. 2025-2034
33. Taboada T., Cortizas A.M., García C., García-Rodeja E. Uranium and thorium in weathering and pedogenetic profiles developed on granitic rocks from NW Spain // *Science of the Total Environment*. – 2006. – Vol. 356 – P. 192-206
34. Ulrich S., Gillowb J., Robertsc S., Byerd G., Suekera J., Farris K. Hydrogeochemical and mineralogical factors influencing uranium in background area groundwater wells: Grants, New Mexico // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. – 2019. – Vol. 26 – P. 100636

© Д. А. Новиков, Л. Г. Вакуленко, П. А. Ян, 2023