

- зональных отложений (на примере Надым-Тазовского междуречья, Западная Сибирь) // Геология и геофизика, 2004. – Т. 45. – № 8. – С. 1008–1020.
16. Эдер В. Г. Литология и условия образования баженновской свиты Западной Сибири. Автореферат на соискание ученой степени д.г.-м.н. – Москва, 2021. – 46 с.
17. Novikov D. A. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins // Petroleum Exploration and Development, 2017. – V. 44. – № 5. – P. 780–788.

ТОРИЙ-УРАНОВАЯ ТИПИЗАЦИЯ РАДОНОВЫХ ВОД ЮГА СИБИРИ

Д. А. Новиков^{1,2}, Ю. Г. Копылова³, А. А. Хвощевская³, А. А. Максимова¹,
А. С. Деркачев¹, Ф. Ф. Дульцев¹, А. В. Черных¹

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН

Новосибирск, Россия, NovikovDA@ipgg.sbras.ru

²Новосибирский государственный университет

Новосибирск, Россия, NovikovDA@ipgg.sbras.ru

³Томский политехнический университет

Томск, Россия, unpc_voda@mail.ru

THORIUM-URANIUM TYPIFICATION OF RADON-RICH WATERS IN THE SOUTH OF WEST SIBERIA

D. A. Novikov^{1,2}, Yu. G. Kopylova³, A. A. Khvashevskaya³, A. A. Maksimova¹,
A. S. Derkachev¹, F. F. Dultsev¹, A. V. Chernykh¹

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS

Novosibirsk, Russia, NovikovDA@ipgg.sbras.ru

²Novosibirsk State University

Novosibirsk, Russia

³Tomsk Polytechnic University

Tomsk, Russia, unpc_voda@mail.ru

Thorium-uranium typification has been proposed for the first time for 22 deposits and occurrences of radon-rich waters in the southern part of West Siberia. The studied waters are extremely diverse in gas and chemical composition, TDS, and geochemical parameters of the medium. The concentrations of natural radionuclides are (mg/dm³): ²³⁸U (3.68 • 10⁻⁷ – 1.40), ²³²Th (4.04 • 10⁻⁷ – 2.16 • 10⁻³). The activity of dissolved radon (²²²Rn) varies from 4 to 2257 Bq/dm³. The ²³²Th/²³⁸U ratio varies from 2.63 • 10⁻⁵ to 26, and its maximal values were detected in ultrafresh, thermal, alkaline waters with the reductive geochemical medium in which thorium possesses increased migration capacity. Quite the contrary, uranium migrates in the oxidative geochemical setting.

Введение

Одним из важнейших ресурсов для успешного развития любого региона являются природные воды, используемые в питьевых целях и бальнеолечении. К сожалению, в настоящее время среди огромного количества месторождений и проявлений минеральных вод Сибири современными методами изучены лишь несколько десятков. Для их полноценного использования необходимо иметь актуальное представление об их составе, в первую очередь это касается радионуклидов (²³⁸U, ²³²Th, ²²⁶Ra и ²²²Rn).

В настоящей работе сделана первая попытка торий-урановой типизации 22 месторождений и проявлений радоновых вод южных районов Сибири (рис. 1а). Следует отметить, что по некоторым из них гидрогеохимические данные приводятся впервые.

Это связано с тем, что они были открыты авторами на территории Новосибирской городской агломерации и в ее окрестностях в течение полевых сезонов 2019–2020 гг. – Инские источники, Седова заимка, Новобибеевское и Зырянское. Радоновые воды Сибири изучаются на протяжении многих лет и результаты их исследований приведены в работах В. К. Гусева, Е. К. Вериги, В. А. Елисеева, Ю. И. Кустова, Л. В. Заманы, Ю. Г. Копыловой, А. М. Плюснина, Г. М. Шпейзера, А. И. Оргильянова, А. А. Булатова, Д. А. Новикова и других [2, 4–9, 11–19, 22–23].

Поведение урана и тория в природных водах различного изотопно-геохимического облика определяется в первую очередь параметрами среды. В. И. Вернадский считал, что торий не переходит в раствор и в земных условиях находится в рассеянном состоянии. «Торий принадлежит к числу тех химиче-

ских элементов, которые стоят вне геохимии воды, вернее водных растворов». При этом, отмечая постоянство Th/U отношения в продуктах магматических процессов, он подчеркивает высокую степень подвижности урана в водных растворах и инертность тория, концентрации которого в земных условиях должны быть ничтожными [3]. Такое разделение урана и тория обусловлено, прежде всего, миграционной способностью их соединений в условиях земной коры, определяемой внутренними свойствами этих элементов, благодаря чему в водах зоны гипергенеза чаще всего наблюдается преобладание концентраций урана над концентрациями тория. При этом информация о их соотношениях в горных породах и водах, полученная различными авторами [1], позволяет считать, что в зоне гипергенеза происходит накопление урана в водах, а тория – в донных осадках. Торий как элемент – гидролизат не склонен накапливаться

в водах под воздействием экзогенных процессов разрушения алюмосиликатных пород, а стремится к образованию гидроокислов и осаждению с вторичной фазой в условиях окислительной среды [10].

Материалы и методы

В настоящей работе представлены актуальные данные по 22 месторождениям и проявлениям радоновых вод южных районов Сибири. Гидрогеохимическое опробование этих объектов (310 проб) проводилось во время полевых работ 2007–2020 гг. Гидрогеохимическая характеристика источников Даштыг-Хем, Шандал-Ой и Верхнего Кадыр-Ос приводится по данным А. И. Оргильянова и др. [18], а источников долины реки Кыра по данным Л. В. Заманы и Ш. А. Аскарлова [6]. Непосредственно на объектах было выполнено определение pH, Eh, тем-

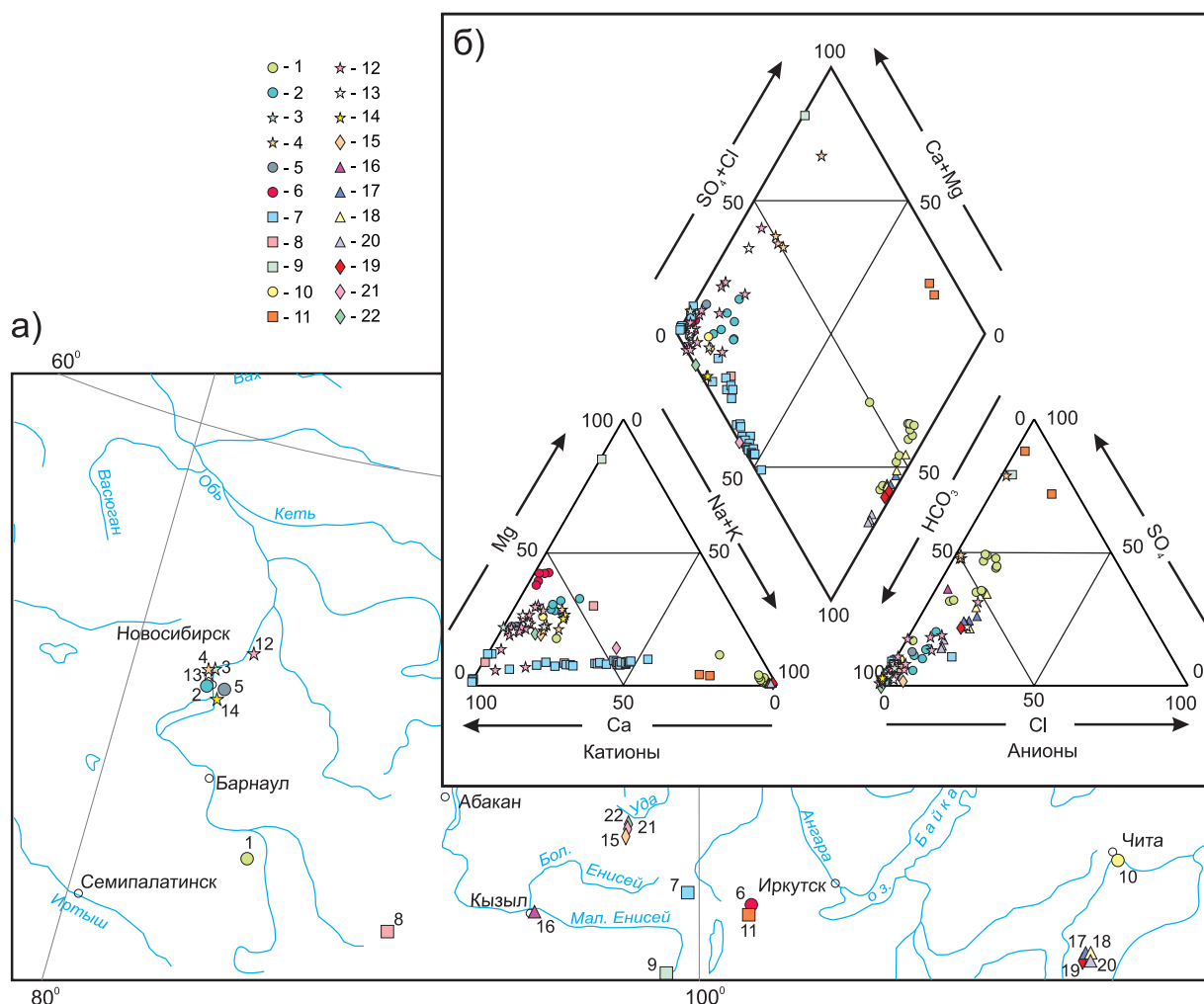


Рис. 1. Местоположение изученных месторождений и проявлений радоновых вод на юге Сибири (а), диаграмма Пайпера состава радоновых вод (б)

Месторождения и проявления: 1 – Белокурихинское, 2 – Станиславское, 3 – Седова заимка, 4 – Скалинское, 5 – Инские источники, 6 – Шумакские источники, 7 – Чойган, 8 – Шивелигское, 9 – Тарыс, 10 – Молоковка, 11 – Нилова Пустынь, 12 – Новобибеевское, 13 – Колыванское, 14 – Зырянское, 15 – Верхний Кадыр-Ос, 16 – Уш-Белдир, 17 – Улурийский источник (верхние), 18 – Улурийский источник (нижние), 19 – Кыринский источник, 20 – Былиринский источник, 21 – Даштыг-Хем, 22 – Шандал-Ой.

пературы, содержания растворенного O_2 , HCO_3^- с помощью полевой гидрогеохимической лаборатории. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ. Выделение однородных геохимических совокупностей проводилось с помощью коэффициентов (Ca/Si , Mg/Si , Na/Si , Si/Na , Ca/Na , Ca/Mg , rNa/rCl и SO_4/Cl). Отношения Ca/Na , Ca/Mg , Ca/Si , Mg/Si , Na/Si использованы для оценки особенностей обогащения вод за счет процессов гидролиза алюмосиликатов и конгруэнтного растворения карбонатов; $SO_4^{2-}/Cl^- \gg 1$ и $rNa^+/rCl^- \gg 1$ – гидролиза алюмосиликатов и окисления сульфидных минералов; пропорциональное увеличение значений $SO_4^{2-}/Cl^- = 1$, $rNa^+/rCl^- \geq 1$, $Ca/Na > 0$ – испарительного концентрирования.

Результаты и их обсуждение

Радоновые воды изученных объектов были разделены на три группы по величине Eh согласно классификации А. В. Щербакова [21]: 1) окислительной обстановки ($Eh > +100$), 2) переходной ($+100 > Eh > 0$) и 3) восстановительной ($Eh < 0$). Ввиду широкого разнообразия вод по химическому составу (см. рис. 16) некоторые из изученных объектов относятся сразу к нескольким группам, например, природный комплекс Чойган, проявления Скалинское, Новобибеевское и Седова Заимка (рис. 2а).

Первая группа включает радоновые воды Станиславского месторождения, природного комплекса Чойган, проявлений Скалинское, Колыванское, Инские источники, Новобибеевское и Зырянское. Они в основном $SO_4-HCO_3 Na-Mg-Ca$, $HCO_3 Mg-Ca$ и $HCO_3 Na-Ca$ состава с величиной общей минерализации, варьирующей от 385 до 2647 мг/дм³ и содержанием кремния 0,52–21,21 мг/дм³. Геохимическая обстановка характеризуется Eh от +107,8 до +250,0 мВ, широкой вариацией pH от слабокислых до слабощелочных (5,9–8,3). Величины средних геохимических коэффициентов для этой группы равны для Ca/Na 16,53; Ca/Mg 15,87; Ca/Si 26,62; Mg/Si 2,33; Na/Si 5,98; Si/Na 0,54; rNa/rCl 19,14 и SO_4/Cl 5,71. Содержания радионуклидов составляют (мг/дм³): ^{238}U от $1,61 \cdot 10^{-4}$ до $1,21$ и ^{232}Th от $1,86 \cdot 10^{-7}$ до $2,16 \cdot 10^{-3}$. $^{232}Th/^{238}U$ отношение в радоновых водах варьирует в интервале от $4,20 \cdot 10^{-5}$ до $7,39 \cdot 10^{-2}$, при среднем $3,83 \cdot 10^{-3}$. Активность ^{222}Rn изменяется в широком диапазоне от 2 до 655 Бк/дм³.

Во вторую группу входят ряд источников природного комплекса Чойган, проявления Новобибеевское, Скалинское и Седова Заимка. Они в основном $HCO_3 Na-Ca$ и $HCO_3 Mg-Ca$ состава с величиной общей минерализации, варьирующей от 364 до 2712 мг/дм³ и концентрацией кремния 12,04–25,64 мг/дм³. Геохимическая обстановка характеризуется переходными Eh от +10,0 мВ до +84,6 мВ, pH от слабокислых

до слабощелочных (6,2–7,6). Значения средних геохимических коэффициентов по сравнению с первой группой возрастают у Ca/Na 26,36; Ca/Mg 37,88; Na/Si 11,33; rNa/rCl 22,77 и снижаются у Ca/Si 21,07; Mg/Si 1,12; Si/Na 0,17; SO_4/Cl 4,82. Концентрации (мг/дм³): ^{238}U изменяются в диапазоне $1,04 \cdot 10^{-4}$ – 1,40, а ^{232}Th в интервале $4,04 \cdot 10^{-7}$ – $2,96 \cdot 10^{-4}$. $^{232}Th/^{238}U$ отношение варьирует от $2,63 \cdot 10^{-5}$ до 0,20 при среднем 0,01. Активность ^{222}Rn в радоновых водах составляет 6,5–947 Бк/дм³.

Третья разновидность объединяет в себе радоновые воды природных комплексов Тарыс, Чойган и Уш-Белдир; проявления Новобибеевское и Седова Заимка; источники Улурийские верхние и нижние, Кыринские, Былиринские. Они преимущественно $HCO_3 Na-Ca$, $HCO_3 Mg-Ca$ и $Cl-SO_4-HCO_3 Na$ состава с величиной общей минерализации от 195 до 2525 мг/дм³ и содержанием кремния 19,05–32,90 мг/дм³. Геохимическая обстановка характеризуется восстановительными условиями с Eh от –482,0 до –24,0 мВ, слабокислыми и щелочными pH (6,3–10). Значения средних геохимических коэффициентов по сравнению с первой группой возрастают у Ca/Mg 23,14; Na/Si 9,96; rNa/rCl 24,16 и снижаются у Ca/Na 4,73; Ca/Si 19,32; Mg/Si 1,77; SO_4/Cl 2,87, а сопоставимые величины у Si/Na 0,54. Содержания радионуклидов составляют (мг/дм³): ^{238}U от $3,68 \cdot 10^{-7}$ до $8,83 \cdot 10^{-4}$ и ^{232}Th от $1,40 \cdot 10^{-6}$ до $8,97 \cdot 10^{-5}$. $^{232}Th/^{238}U$ отношение в радоновых водах варьирует в диапазоне от 0,0022 до 26, при среднем 2,42. Активность ^{222}Rn изменяется в широком интервале от 16 до 655 Бк/дм³.

Ранее, отмечалась достаточно сложная картина соотношений радиоактивных элементов в водах [10]. Это разнообразие связано с различным характером поведения этих элементов в условиях зоны гипергенеза – малую способность тория к миграции в водах окислительной обстановки, благоприятной для миграции и накопления урана [20]. Концентрации урана в изученных радоновых водах изменяются в широком диапазоне от $3,68 \cdot 10^{-7}$ до 1,4 мг/дм³. Максимальные содержания характеризуют источник Даштыг-Хем (до 1,02 мг/дм³) и Скалинское проявление (0,93–1,4 мг/дм³). Наибольший интерес представляет наименее изученный торий, концентрации которого изменяются в диапазоне от $1,86 \cdot 10^{-7}$ до $2,16 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³, при среднем значении $4,62 \cdot 10^{-5}$ мг/дм³. На фоне в целом невысоких концентраций тория выделяются ряд объектов с максимальными значениями в пределах (мг/дм³): Белокурихинского месторождения (до $8,57 \cdot 10^{-4}$), природного комплекса Чойган (до $3,34 \cdot 10^{-4}$) и Скалинского проявления (до $2,16 \cdot 10^{-3}$). Безусловно, такие высокие концентрации говорят о наличии редкоземельных и ториевых минералов в водовмещающих породах.

Установлено, что торий-урановое отношение в изученных радоновых водах растет с увеличением

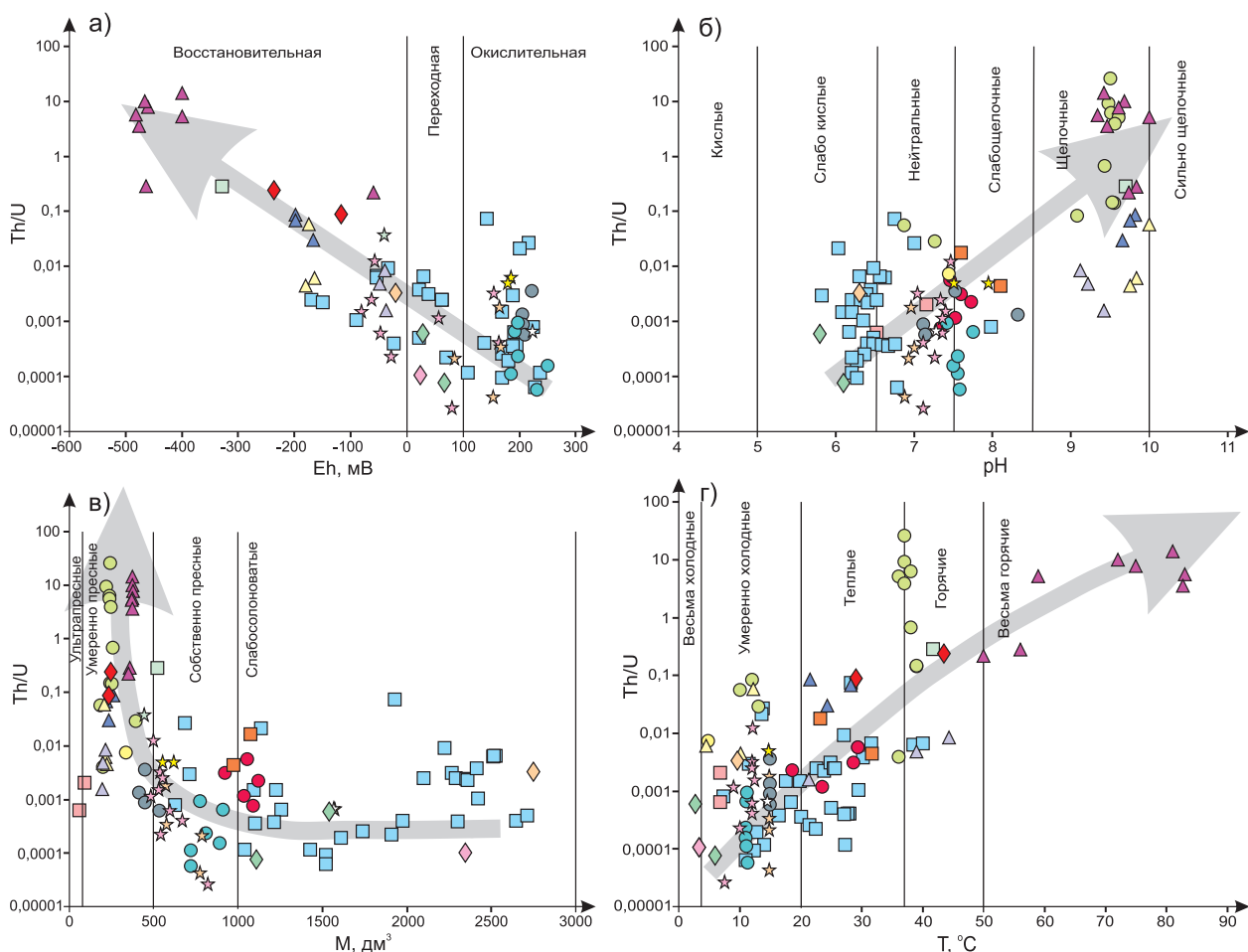


Рис. 2. Зависимость Th/U отношения в радоновых водах Сибири от геохимических параметров среды Eh, pH, величины общей минерализации и температуры
Условные обозначения см. рис. 1.

pH среды, ее температуры, а также снижением общей минерализации (рис. 2 б–г). Эти факты требуют скрупулёзных исследований.

Заключение

Резюмируя вышесказанное, отметим, что до настоящего времени минеральные воды Сибири крайне слабо изучены. Установлено, что поведение тория и урана в изученных радоновых водах в первую очередь определяется геохимическими параметрами среды. Торий мигрирует в восстановительной среде, а уран в окислительной, где первый образует гидроокислы и осажается со вторичными минералами. Смена окислительных обстановок на восста-

новительные приводит к росту $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ отношения, которое изменяется от $4,20 \cdot 10^{-5} - 7,39 \cdot 10^{-2}$ в окислительных, составляя $2,63 \cdot 10^{-5} - 0,20$ в переходных и достигает $0,0022 - 26$ в восстановительных. Влияние пластовой температуры резервуара на миграционную способность урана и тория требует дальнейшего изучения с привлечением имеющихся данных по подземным водам глубоких горизонтов осадочных бассейнов, которые являются термальными.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025, РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках гранта № 19-45-540004 и Государственного Задания РФ «Наука» в рамках проекта № FSWW-0022-2020.

Литература

1. Арбузов С. И. Геохимия радиоактивных элементов: учебное пособие. Рихванов Л. П. / – 3-е изд., исправленное и дополненное. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 304 с.
2. Булатов А. А. Новые сведения о составе радоновых вод (Шивелигское месторождение) /
3. Ю. Г. Копылова, Н. К. Джабарова, К. М. Рычкова, К. Д. Аракчаа, А. А. Хвощевская, Н. В. Гусева, А. В. Пашагин // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов, 2013. – № 1. – С. 154–161.
3. Вернадский В. И. Очерки геохимии. – Л.: Горно-геолого-нефтяное изд-во, 1934. – 380 с.

4. Гусев В. К., Радоновые воды Колывань-Томской складчатой зоны, их использование и охрана / Е. К. Вериго // Изменение природных условий под влиянием деятельности человека. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1984. – 176 с.
5. Елисеев В. А. Радоновые воды Алтая и их использование в санаторно-курортной практике / Ю. Н. Акуленко, А. В. Пузанов // Известия Алтайского государственного университета, 2000. – № 3 (17). – С. 63–65.
6. Замана Л. В. Физико-химические характеристики азотных термальных источников бассейна реки Кыра (юго-восточное Забайкалье) / Ш. А. Аскараров // Ученые записки Забайкальского государственного гуманитарно-педагогического университета, 2011. – № 1 (36). – С. 173–178.
7. Иванова К. Ю. Особенности химического состава подземных вод родников западной Тувы / А. А. Хвощевская // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов, 2015. – № 2. – С. 167–173.
8. Копылова Ю. Г. Геохимия углекислых вод природного комплекса Чойган (северо-восток Тувы) / Н. В. Гусева, К. Д. Аракчаа, А. А. Хвощевская // Геология и геофизика, 2014. – Т. 55. – № 11 – С. 1635–1648.
9. Копылова Ю. Г. Химический состав вод родников природного комплекса Тарыс (Восточная Тува) / Н. В. Гусева, К. Д. Аракчаа, Ч. К. Ойдулуп, К. М. Рычкова, А. А. Хвощевская, М. Г. Камбалина, Е. Ю. Каричева, И. С. Мазурова // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов, 2015. – № 2. – С. 89–98.
10. Копылова Ю. Г. Уран и торий в природных водах юго-востока Алтае-Саянской области / Н. В. Гусева, К. Д. Аракчаа, А. А. Хвощевская, И. С. Мазурова, О. Д. Аюнова, Ч. К. Ойдулуп, К. М. Рычкова // В сборнике: Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Материалы V Международной конференции. ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Российская академия наук, Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами», ФГУП «Урангео» и др., 2016. – С. 339–345.
11. Кустов Ю. И. Подземные минеральные воды в Тункинском регионе юго-западного фланга Байкальского рифта // Отечественная геология, 2009. – № 2. – С. 53–60.
12. Кустов Ю. И. Минеральные воды центральной части азиатского материка в пределах республики Тува // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов, 2015. – № 2. – С. 139–143.
13. Минеева Л. А. Физико-химическая характеристика минеральных вод месторождений Шумак и Чойган // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле», 2016. – Т. 17. – С. 115–134.
14. Новиков Д. А. Гидрогеохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод / А. С. Деркачев, А. Ф. Сухорукова // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2019. – Т. 2. – № 1. – С. 125–132.
15. Новиков Д. А. Изотопно-геохимические особенности проявления слаборадоновых вод «Инские источники» (юг Западной Сибири) / Ю. Г. Копылова, Л. Г. Вакуленко, А. Ф. Сухорукова, А. Н. Пыряев, А. А. Максимова, Ф. Ф. Дульцев, А. В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 135–145.
16. Новиков Д. А. Гидрогеология и гидрогеохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (юг Западной Сибири) / А. Ф. Сухорукова, Т. В. Корнеева // Геодинамика и тектонофизика, 2018. – Т. 9. – № 4. – С. 1255–1274.
17. Новиков Д. А. Гидрогеология и гидрогеохимия месторождения радоновых вод «Каменское» (г. Новосибирск) / А. Ф. Сухорукова, Т. В. Корнеева, Р. М. Каменова-Тоцева, А. А. Максимова, А. С. Деркачев, Ф. Ф. Дульцев, А. В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 192–208.
18. Оргильянов А. И. Минеральные воды Тоджинского района республики Тыва / К. Д. Аракчаа, И. Г. Крюкова, П. С. Бадминов, Е. А. Солдатов, А. В. Шестакова, К. М. Рычкова. // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов, 2017. – №3. – С. 147–156.
19. Плюснин А. М. Гидрогеохимические особенности состава азотных терм Байкальской рифтовой зоны / Л. В. Замана, С. Л. Шварцев, О. Г. Токаренко, М. К. Чернявский // Геология и геофизика, 2013. Т. 54. – № 5. – С. 647–664.
20. Шварцев С. Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М.: Недра, 1998. – 366 с.
21. Щербачев А. В. Геохимия термальных вод. – М.: Наука, 1968. – 237 с.
22. Шпейзер Г. М. Шумакские минеральные воды / А. А. Макаров, В. А. Родионова, Л. А. Минеева // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле», 2012. – Т. 5. – № 1. – С. 293–309.
23. Novikov D. A. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaeltsovsky-Mochishche zone of Novosibirsk, Russia / F. F. Dultsev, R. M. Kamenova-Totzeva, T. V. Korneeva // Environmental Earth Sciences, 2021. – V. 80. – № 216.