

Геохимия радоновых вод юга Сибири

Д. А. Новиков^{1,2}, Ю. Г. Копылова³, А. А. Хващевская³, А. А. Максимова¹,
А. Ф. Сухорукова¹, А. С. Деркачев¹, Ф. Ф. Дульцев¹, А. В. Черных¹*

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Российская Федерация

³ Томский политехнический университет, Томск, Российская Федерация

* e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Аннотация: Рассмотрены геохимические особенности 22 месторождений и проявлений радоновых вод юга Сибири (некоторых впервые). Изученные воды весьма разнообразны по газовому и химическому составу, величине общей минерализации, геохимическим параметрам среды и температуре. Установлено три группы радоновых вод по величине Eh: окислительной обстановки, переходной и восстановительной. Ввиду широкого разнообразия вод по химическому составу некоторые из изученных объектов относятся сразу к нескольким группам, например, природный комплекс Чойган, проявления Скалинское, Новобибеевское и Седова Заимка. Содержания природных радионуклидов составляют (мг/дм³): ²³⁸U (3,68·10⁻⁷ – 1,40), ²³²Th (4,04·10⁻⁷ – 2,16·10⁻³). Активность водорастворенного радона (²²²Rn) варьирует в интервале от 4 до 2257 Бк/дм³. ²³²Th/²³⁸U отношение изменяется от 2,63·10⁻⁵ до 26 и его максимальные значения установлены в ультрапресных, термальных, щелочных водах с восстановительной геохимической средой, в которой торий обладает повышенной миграционной способностью. Уран же, наоборот, мигрирует в окислительной геохимической обстановке.

Ключевые слова: гидрогеохимия, радоновые воды, геохимические параметры среды, радионуклиды, Западная Сибирь

Geochemistry of radon waters in the south of Siberia

D. A. Novikov^{1,2}, Yu. G. Kopylova³, A. A. Khvashevskaya³, A. A. Maksimova¹,
A. F. Sukhorukova¹, A. S. Derkachev¹, F. F. Dultsev¹, A. V. Chernykh¹*

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

³ Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

* e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Abstract. The geochemical features of 22 deposits and manifestations of radon waters in the south of Siberia (some of them for the first time) are considered. The studied waters are very diverse in terms of gas and chemical composition, total mineralization, geochemical parameters of the environment, and temperature. Three groups of radon waters have been established according to the Eh value: oxidizing conditions, transitional and reducing. Due to the wide variety of waters in terms of chemical composition, some of the studied objects belong to several groups at once, for example, the Choigan natural complex, the Skalinsky, Novobibeevskoye, and Sedova Zaimka manifestations. 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

reductive geochemical medium in which thorium possesses increased migration capacity. Quite contrary, uranium migrates in the oxidative geochemical setting.

Keywords: hydrogeochemistry, radon waters, geochemical parameters of the environment, radionuclides, Western Siberia

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 (^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra и ^{222}Rn).

В настоящей работе сделана первая попытка геохимической 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 2019-2021 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 [1-15].

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 химических 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 [16]. 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 [17], 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 [18].

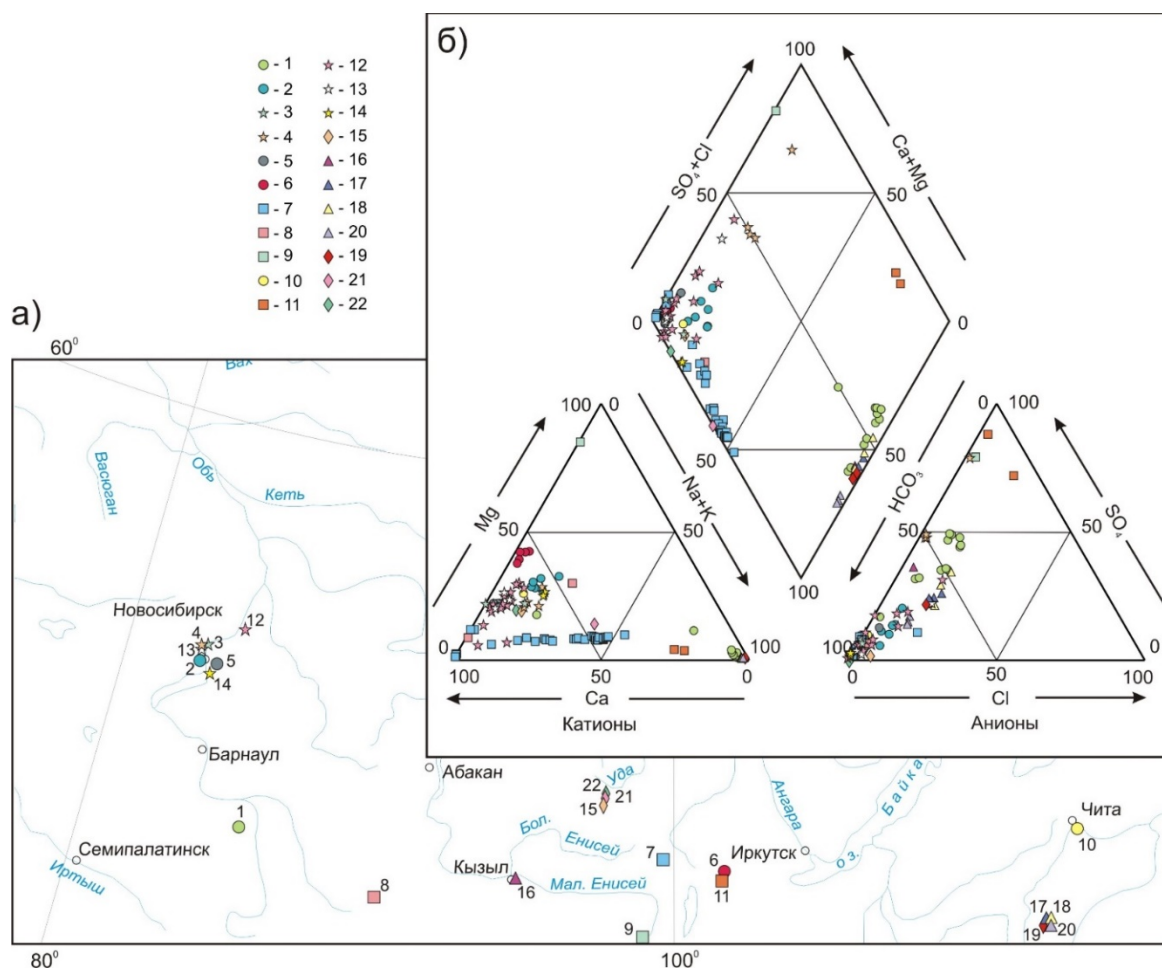


Рис. 1. Местоположение изученных месторождений и проявлений радоновых вод на юге Сибири (а), диаграмма Пайпера состава радоновых вод (б).

Месторождения и проявления: 1 – Белокурихинское, 2 – Тулинское, 3 – Седова заимка, 4 – Скалинское, 5 – Инские источники, 6 – Шумацкие источники, 7 – Чойган, 8 – Шивелигское, 9 – Тарыс, 10 – Молоковка, 11 – Нилова Пустынь, 12 – Новобибеевское, 13 – Кольванское, 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.

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 2007-2021 гг. Гидрогеохимическая характеристика источников Даштыг-Хем, Шандал-Ой и Верхнего Кадыр-Ос приводится по данным А.И. Оргильянова и др. [12], а источников долины реки Кыра – по данным Л.В. Заманы и Ш.А. Аскарова [1]. Непосредственно на объектах было выполнено определение рН, Eh, температуры, содержания растворенного O_2 , HCO_3^- с помощью полевой гидрогеохимической лаборатории. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связан-

ной 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 , $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 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; $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^- \gg 1$ и $r\text{Na}^+/r\text{Cl}^- \gg 1$ – гидролиза алюмосиликатов и окисления сульфидных минералов; пропорциональное увеличение значений $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^- = 1$, $r\text{Na}^+/r\text{Cl}^- \geq 1$, $\text{Ca/Na} > 0$ – испарительного концентрирования.

Результаты и их обсуждение

Радоновые воды изученных объектов были разделены на три группы по величине Eh согласно классификации А.В. Щербакова [19]: 1) окислительной обстановки ($\text{Eh} > +100$), 2) переходной ($+100 > \text{Eh} > 0$) и 3) восстановительной ($\text{Eh} < 0$). Ввиду широкого разнообразия вод по химическому составу (см. рис. 1б) некоторые из изученных объектов относятся сразу к нескольким группам, например, природный комплекс Чойган, проявления Скалинское, Новобибеевское и Седова Заимка.

Первая группа включает радоновые воды Тулинского месторождения, природного комплекса Чойган, проявлений Скалинское, Колыванское, Инские источники, Новобибеевское и Зырянское. Они в основном $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ 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 рН 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; $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 19,14 и SO_4/Cl 5,71 (рис. 2). 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 $2,16 \cdot 10^{-3}$. $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 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, рН 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; $r\text{Na}/r\text{Cl}$ 22,77 и снижаются у Ca/Si 21,07; Mg/Si 1,12; Si/Na 0,17; SO_4/Cl 4,82 (рис. 2). Концентрации (мг/дм³): ^{238}U изменяются в диапазоне $1,04 \cdot 10^{-4}$ – 1,40, а ^{232}Th в интервале $4,04 \cdot 10^{-7}$ – $2,96 \cdot 10^{-4}$. $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 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 За-

имка; источники Улурыйские 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 (рис. 2). 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 $8,97 \cdot 10^{-5}$. $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 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.

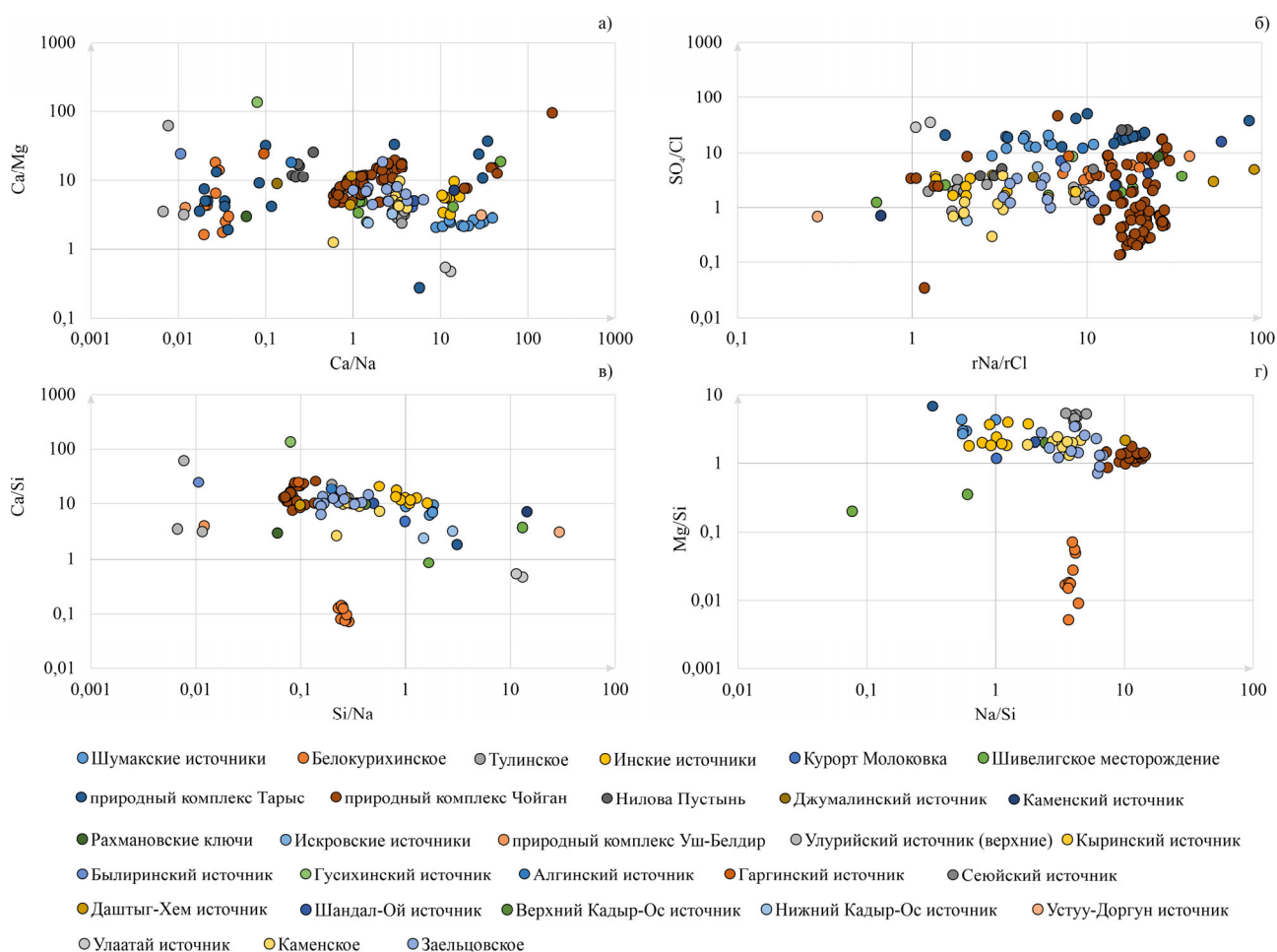


Рис. 2. Геохимическая типизация изученных вод по коэффициентам Ca/Mg – Ca/Na (а), SO_4/Cl – rNa/rCl (б), Ca/Si – Si/Na (в) и Mg/Si – Na/Si (г)

Ранее, отмечалась достаточно сложная картина соотношений радиоактивных элементов в водах [18]. 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 из-

меняются 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): Белокурухинского 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 рН среды, ее температуры, а также снижением общей минерализации. 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 осаждается со вторичными минералами. Смена окислительных обстановок на восстановительные 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.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта № 22-17-20029 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Замана Л.В., Аскарлов Ш.А. Физико-химические характеристики азотных термальных источников бассейна реки Кыра (юго-восточное Забайкалье) // Ученые записки Забайкальского государственного гуманитарно-педагогического университета. – 2011. – № 1(36). – С. 173-178.
2. Иванова К.Ю., Хващевская А.А. Особенности химического состава подземных вод родников западной Тувы // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов. – 2015. – № 2. – С. 167-173.
3. Копылова Ю.Г. Гусева Н.В., Аракчаа К.Д., Хващевская А.А. Геохимия углекислых вод природного комплекса Чойган (северо-восток Тувы) // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 11 – С. 1635-1648.
4. Копылова Ю.Г., Гусева Н.В., Аракчаа К.Д., Ойдуп Ч.К., Рычкова К.М., Хващевская А.А., Камбалина М.Г., Каричева Е.Ю., Мазурова И.С. Химический состав вод родников природного комплекса Тарыс (Восточная Тува) // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов. – 2015. – № 2. – С. 89-98.

5. Кустов Ю.И. Подземные минеральные воды в Тункинском регионе юго-западного фланга Байкальского рифта // Отечественная геология. – 2009. – № 2. – С. 53-60.
6. 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.
7. 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.
8. Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Максимова А.А., Пыряев А.Н., Фаге А.Н., Хващевская А.А., Деркачев А.С., Черных А.В. Первые результаты комплексных изотопно-гидрогеохимических исследований Новобибеевского проявления радоновых вод // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 233. – № 1. – С. 57-72.
9. Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Вакуленко Л.Г., Сухорукова А.Ф., Пыряев А.Н., Максимова А.А., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В. Изотопно-геохимические особенности проявления слаборадоновых вод "Инские источники" (юг Западной Сибири) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 135-145.
10. Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Корнеева Т.В. Гидрогеология и гидрогеохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (юг Западной Сибири) // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9. – № 4. – С. 1255–1274.
11. Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Корнеева Т.В., Каменова-Тоцева Р.М., Максимова А.А., Деркачев А.С., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В. Гидрогеология и гидрогеохимия месторождения радоновых вод "Каменское" (г. Новосибирск) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 192-208.
12. Оргильянов А.И., Аракчаа К.Д., Крюкова И.Г., Бадминов П.С., Солдатова Е.А., Шестакова А.В., Рычкова К.М. Минеральные воды Тоджинского района республики Тыва // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов. – 2017. – №3. – С. 147-156.
13. Плюснин А.М., Замана Л.В., Шварцев С.Л., Токаренко О.Г., Чернявски М.К. Гидрогеохимические особенности состава азотных терм Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 5. – С. 647-664.
14. Шпейзер Г.М., Макаров А.А., Родионова В.А., Минеева Л.А. Шумакские минеральные воды // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2012. – Т. 5. – № 1. – С. 293-309.
15. Novikov D.A., Dultsev F.F., Kamenova-Totzeva R.M., Korneeva T.V. Hydrogeological conditions and hydrogeochemistry of radon waters in the Zaeltsovsky-Mochishche zone of Novosibirsk, Russia // Environmental Earth Sciences. – 2021. – V. 80. – № 216.
16. Вернадский В.И. Очерки геохимии. – Л.: Горно-геолого-нефтяное изд-во, 1934. – 380 с.
17. 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.
18. Копылова Ю.Г., Гусева Н.В., Аракчаа К.Д., Хващевская А.А., Мазурова И.С., Аюнова О.Д., Ойдуп Ч.К., Рычкова К.М. Уран и торий в природных водах юго-востока Алтае-Саянской области // 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", ФГУПП "Урангео" и др. – 2016. – С. 339-345.
19. Щербаков А.В. Геохимия термальных вод. – М.: Наука, 1968. – 237 с.
20. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М.: Недра, 1998. – 366 с.

© Д. А. Новиков, Ю. Г. Копылова, А. А. Хващевская, А. А. Максимова, А. Ф. Сухорукова, А. С. Деркачев, Ф. Ф. Дульцев, А. В. Черных, 2022